

---

# Physics Education

# Laboratory

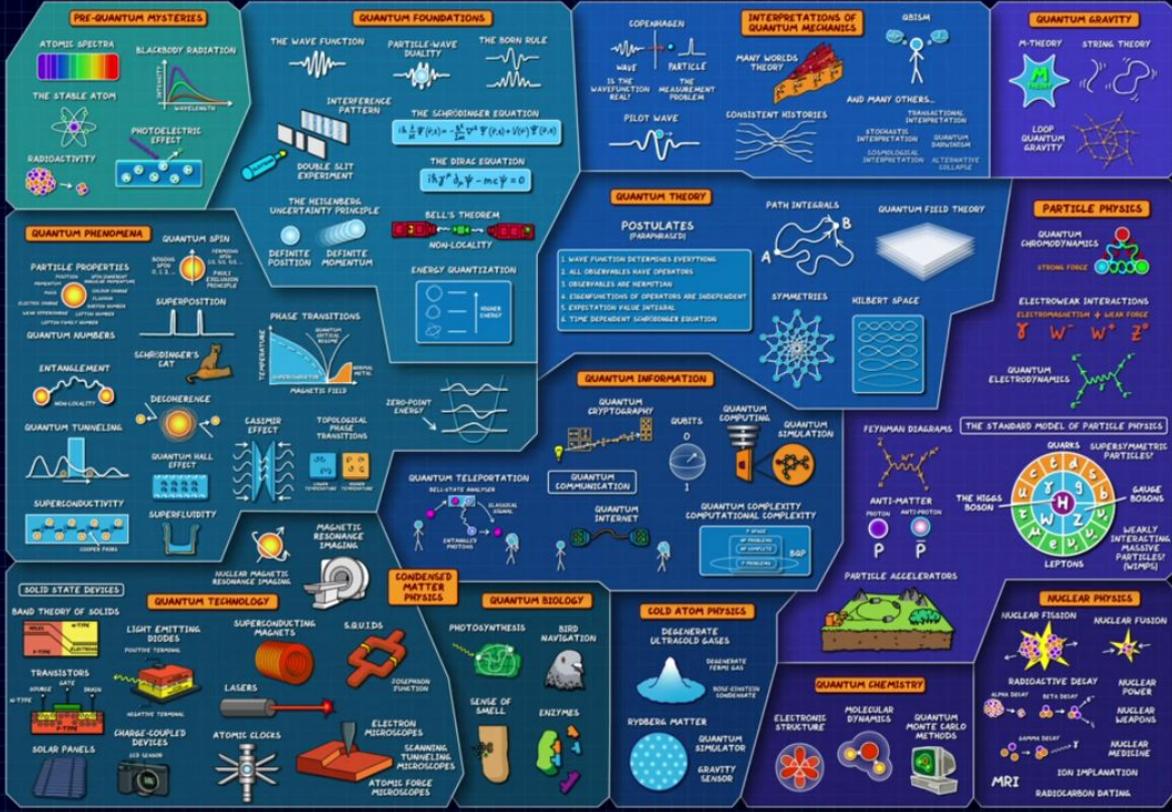
# Lecture 23

## The use of metaphors & the history of Physics for Quantum Mechanics

Francesco Longo • 15/12/2025

---

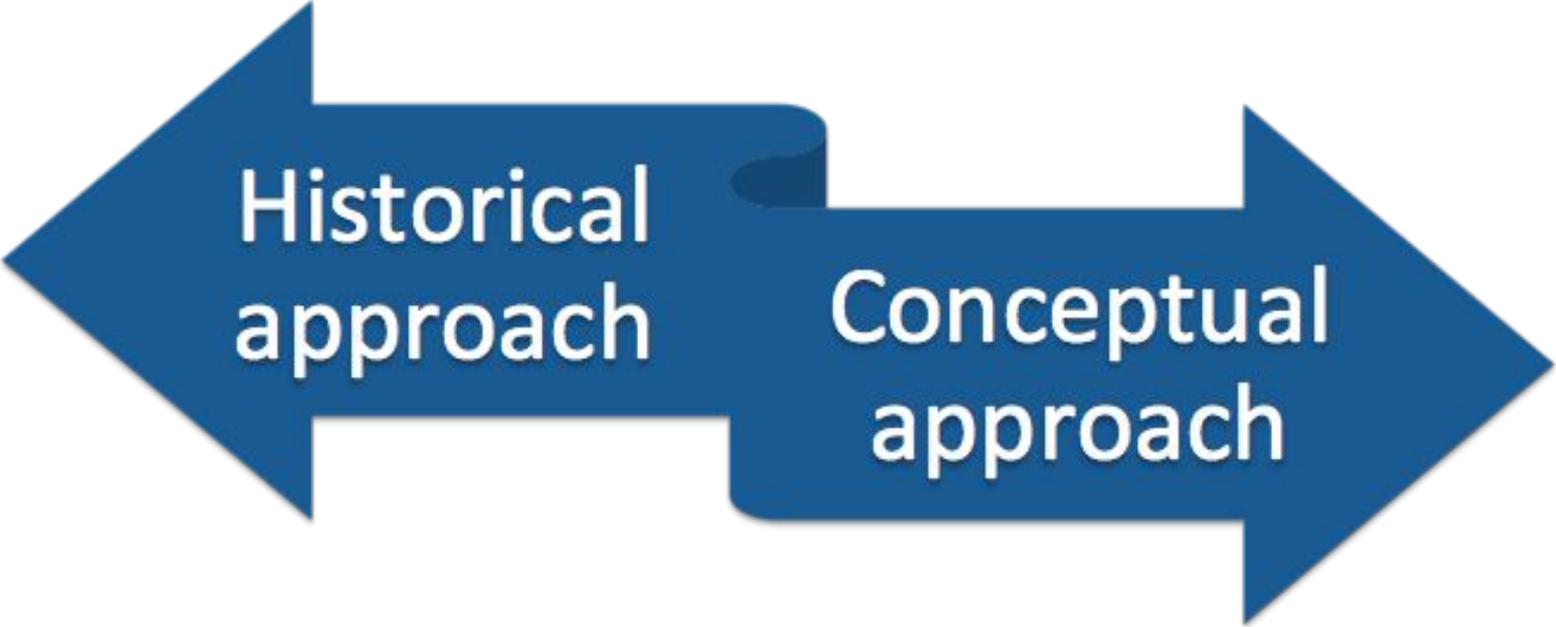
# THE MAP OF QUANTUM PHYSICS



---

**WHAT IS REALLY  
IMPORTANT TO TEACH?**

---



Historical  
approach

Conceptual  
approach



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# Riflessioni sull'insegnamento/ apprendimento della fisica quantistica

**Olivia Levrini**

Dipartimento di Fisica e Astronomia

# Interplay between mathematics and physics to catch the nature of a scientific breakthrough: The case of the blackbody

Laura Branchetti\*

*Department of Mathematical, Physical and Computer sciences, University of Parma, Parma 43124, Italy*

Alessia Cattabriga<sup>†</sup>

*Department of Mathematics, University of Bologna, Bologna 40126, Italy*

Olivia Levrini<sup>‡</sup>

*Department of Physics and Astronomy, University of Bologna, Bologna 40126, Italy*



(Received 26 December 2018; published 23 September 2019)

This paper aims to provide a contribution to the research in physics education regarding the interplay between mathematics and physics in teaching and learning physics at the university level. The argument is developed through a study focused on the historical case study of the blackbody that led Planck to make one of the most significant scientific breakthroughs in physics: the introduction of discreteness and quantization into physical processes. The study is methodologically guided by the model that Udden, Karam, Pietrocola, and Pospiech elaborated to highlight the interplay between physics and mathematics within teaching and learning practices [O. Udden, R. Karam, M. Pietrocola, and G. Pospiech, *Modelling mathematical reasoning in physics education*, *Sci. Educ. Netherlands* **21**, 485 (2012)]. The model emphasizes the distinction between the technical and structural roles of mathematics in physics, with the latter role being argued to correspond to processes of mathematization and interpretation. We used this model to analyze Planck's original papers and to reconstruct the reasoning that, thanks to the structural role played by mathematics, paved the way for the quantistic scientific breakthrough. The results of the analysis led us to design a teaching tutorial that we implemented with mathematics and physics university students. Students' reactions are reported to discuss the educational potential of the approach beyond the specific case and to argue for its potential general application to other similar physics topics.

L'istruzione "tradizionale" per argomenti di fisica quantistica è molto simile in tutti i paesi occidentali.

Corpo nero

Effetto fotoelettrico

Effetto Compton

Modello atomico di Thomson

Modello atomico di Rutherford

Modello atomico di Bohr

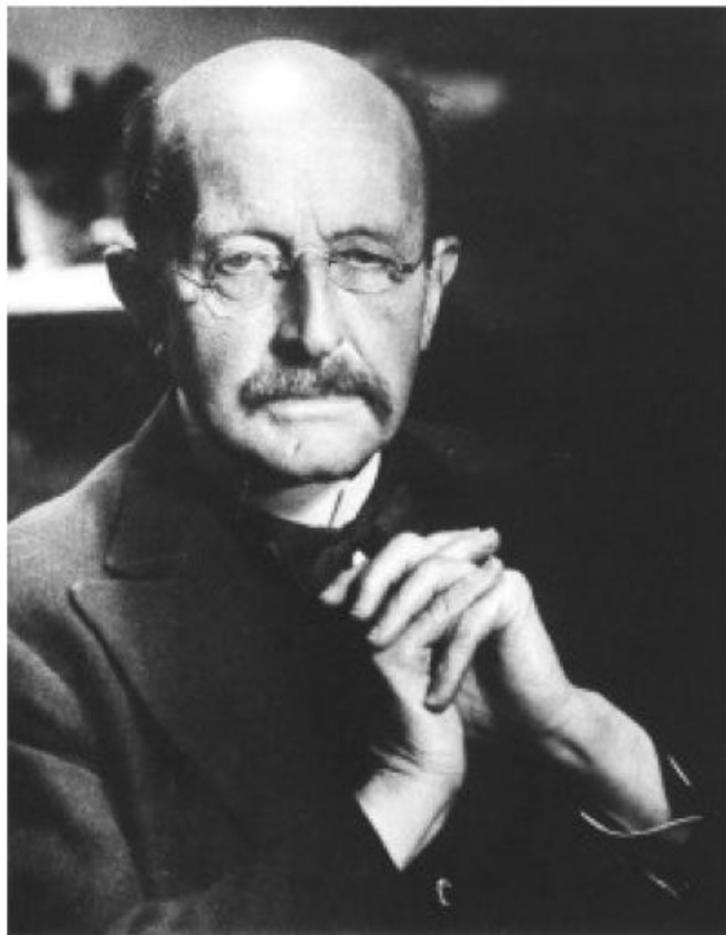
De Broglie...

L'elettrone  
come una  
trottola

Modello  
atomico di  
Sommerfeld

Il principio di  
indeterminazione  
(microscopio di  
Heisenberg)

Modello  
atomico a  
orbitali



**Max Planck**  
**(Kiel 1858, Gottinga 1947)**

- a. *On an Improvement of Wien's Equation for the Spectrum (1900a)*
- b. *On the Distribution Law of Energy in the Normal Spectrum (1900b)*
- c. ...

---

**“We must now give the distribution of the energy over the separate resonators of each group, first of all the distribution of the energy  $E$  over the  $N$  resonators of frequency  $\nu$ .**

**If  $E$  considered to be continuously divisible quantity, this distribution is possible in infinitely many ways.**

**We consider, however – this is the most essential point of the whole calculation –  $E$  to be composed of a very definite number of equal parts and use thereto the constant of nature  $h = 6.55 \times 10^{-27}$  erg·sec.” (Planck, 1900b)**

---

**Albert Einstein**  
**(Ulm 1979, Princeton 1955)**



*[...] mi sembra che le osservazioni effettuate sulla “radiazione del corpo nero”, la fotoluminescenza, l’emissione di raggi catodici mediante luce ultravioletta e su altri fenomeni che **implicano l’emissione o la trasformazione della luce, possano essere meglio comprese se si adotta l’ipotesi** che l’energia della radiazione sia distribuita nello spazio in modo discontinuo. In base all’ipotesi che qui viene avanzata, quando un raggio di luce si propaga partendo da un punto, l’energia non si distribuisce con continuità su di un volume sempre crescente, bensì consiste in un numero finito di quanti di energia, localizzati nello spazio, che si muovono senza suddividersi e che possono essere assorbiti o emessi solo globalmente”.*

Albert Einstein, “Un’ipotesi euristica sulla natura della radiazione”,  
Annalen der Physik 177, 1905



## Effetto fotoelettrico e la nuova tappa del dilemma continuo-discreto

“Le due grandi «scoperte» [di Einstein] del 1905, la teoria dei quanti di luce e la teoria della relatività, hanno in comune **l'attacco spregiudicato all'etere**, fino allora considerato in modo pressoché unanime l'ente fisico primario. Dimostrare che una gamma molto ampia di fatti sperimentali **rende necessario attribuire anche alla radiazione una struttura corpuscolare**, significa allora per Einstein indicare una strada per ricomporre lo stridente dualismo tra onde e corpuscoli che caratterizzava il punto di arrivo dei recenti sviluppi della fisica teorica.

**Con Einstein il dilemma onda-corpuscolo entra nella sua fase decisiva.** La teoria dei quanti di luce non può spiegare tutti i fatti sperimentali, così come non può farlo la teoria ondulatoria. Per la prima volta nella storia della fisica appare allora evidente che *lo stesso oggetto, la radiazione, deve possedere contemporaneamente proprietà corpuscolari e proprietà ondulatorie.* “ (Tarsitani, 1983)



## I processi della fisica classica e la legge di continuità

*“natura non operator per saltum”*

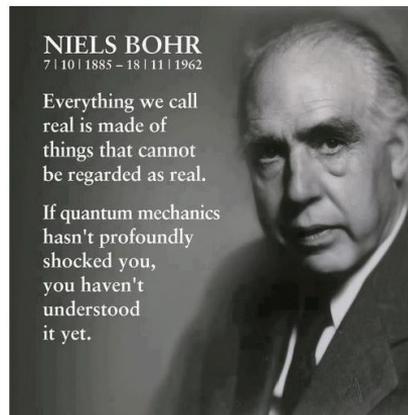
uno dei dogmi centrali della descrizione fisica



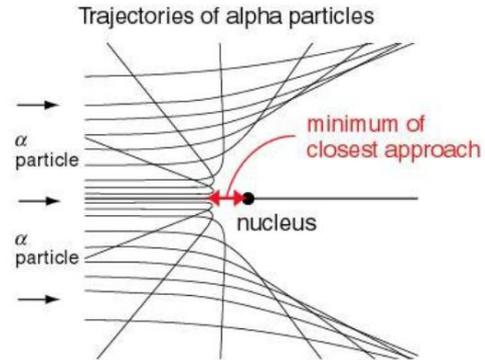
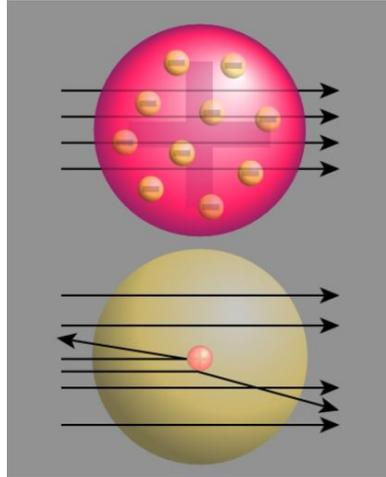
# I livelli energetici...

*1913: natura facit saltus...*

**Niels Bohr**  
**(Copenaghen 1885-1962)**



# L'atomo di Rutherford (1911)



Un "nucleo nudo"



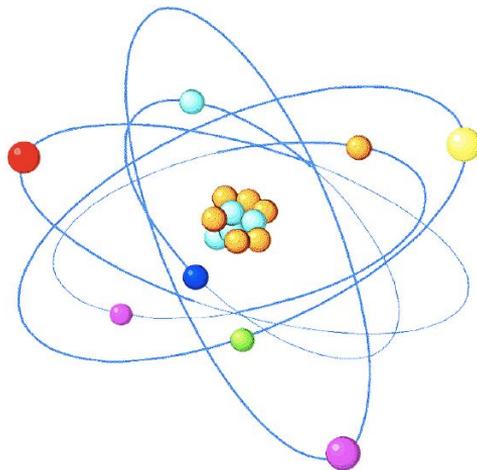
## Il problema della struttura atomica...

“Mentre Rutherford e Darwin avevano considerato il nucleo e gli elettroni atomici separatamente, ignorando di volta in volta l’una o l’altra componente dell’atomo, Bohr comprese che una teoria che riuscisse a spiegare il modo in cui le particelle alfa interagivano con gli elettroni atomici ci avrebbe potuto svelare la vera struttura dell’atomo” (Kumar, 2008)

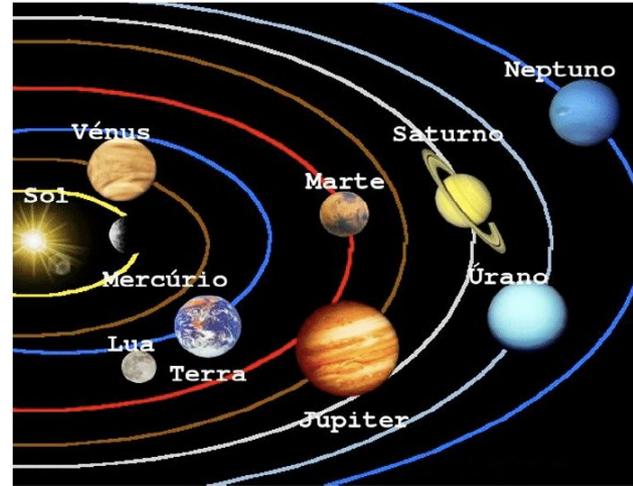
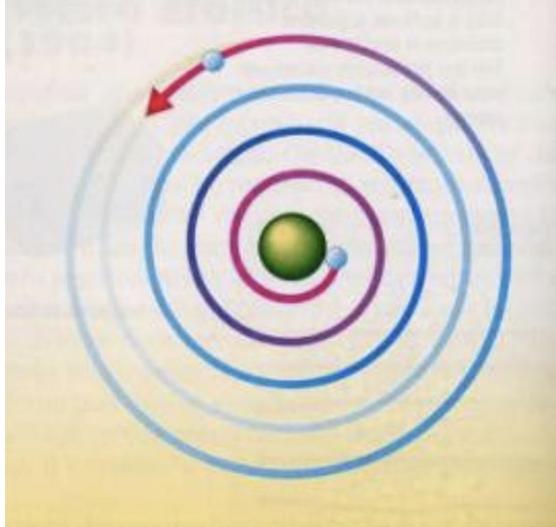
**... che necessariamente non era  
“classica”.**



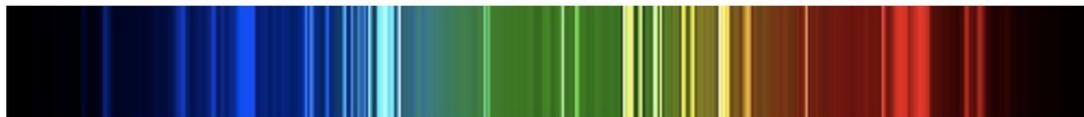
**Un “classico” modello planetario, benché elegante,  
semplicemente non poteva funzionare**



## Il problema della stabilità



# I “fatti” sul tappeto di cui tener conto



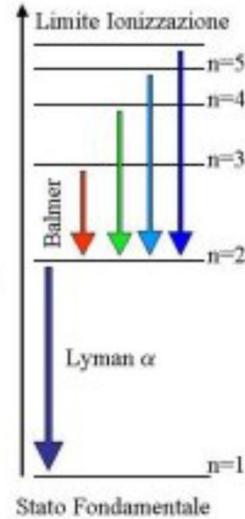
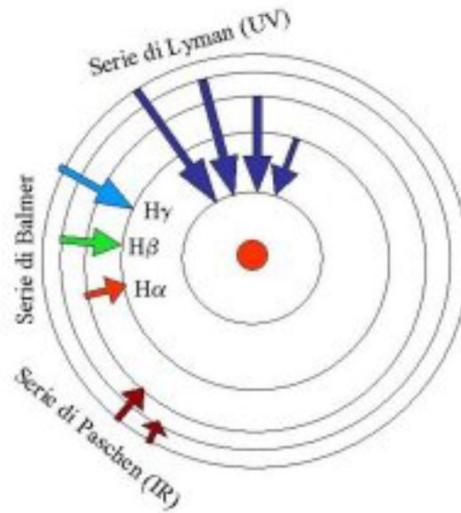
La “firma” dell’azoto



La “firma” del ferro



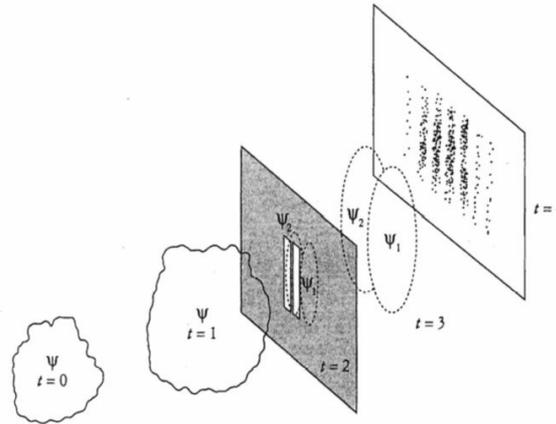
# L'atomo di Bohr e le sue forme di rappresentazione



## E. SCHRÖDINGER:

“Le particelle sono semplici apparenze” (The Interpretation of Quantum Mechanics, Ox Bow Press, Woodbridge 1995)

*“Non si deve attaccare alcun significato speciale al cammino dell’elettrone... e ancor meno alla posizione di un elettrone nel suo cammino.... l’onda...non solo riempie tutto il cammino simultaneamente, ma si estende addirittura notevolmente in tutte le direzioni”.*



## M. BORN: “l’interpretazione [ondulatoria di Schrödinger] sembrava inaccettabile”

(The statistical interpretation of quantum mechanics - Nobel Lecture, December 11, 1954. In Nobel Lectures in Physics 1942-1962, Elsevier, Amsterdam 1964)

*“Schrödinger credeva ancora che la sua teoria ondulatoria permettesse un ritorno alla fisica classica deterministica [...]*

*Alla luce dei fatti sperimentali, a noi di Gottinga questa interpretazione sembrava inaccettabile. A quel tempo era infatti già possibile contare le particelle mediante scintillazione o col contatore di Geiger, e fotografare le loro tracce con l’aiuto della camera a nebbia di Wilson.”*



## Il dualismo onda-particella (\*)

Introdotta da Einstein nel 1909, a proposito della relazione di Planck sul corpo nero;

Esplorato in tutte le sue possibili accezioni:

-una forma è manifestazione dell'altra (Schrödinger e Born);

-sia onda sia particella (De Broglie, Bohm);

-a volte l'una, a volte l'altra (un po', un po') (Bohr, Pauli).

-la fisica deve occuparsi di *perché* conosce e di *come* conosce (epistemologia e metodologia) e abbandonare ogni pretesa di dire come è fatto il mondo (ontologia) (Heisenberg e Jordan);

(\*) Introzzi G. (2010). Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni. Atti Acc. Rov. Agiati, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.



I dati ottenuti in **condizioni sperimentali diverse [ponendo l'attenzione a diverse fenomenologie]** non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari. Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un elemento essenziale di ambiguità, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali.

(Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in Autobiografia scientifica, pp. 113- 114)



“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana e queste RIGUARDANO OGGETTI DI GRANDI DIMENSIONI. Per di più, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo tale da renderlo adatto a descrivere i processi atomici, visto che le parole possono solo descrivere cose di cui possiamo formarci immagini mentali; e anche questa è una capacità che ci viene dall’esperienza quotidiana. Per fortuna la matematica non ha queste limitazioni ed è possibile inventare uno schema matematico – la teoria quantistica – che sembra del tutto adatta alla trattazione dei processi atomici; per quel che riguarda la visualizzazione, quindi, ci dobbiamo accontentare di due analogie incomplete – l’immagine ondulatoria e quella corpuscolare.”

**(W. Heisenberg)**



“La fisica è un tentativo di afferrare concettualmente la realtà fisica, quale la si concepisce indipendentemente dal fatto di essere osservata. In questo senso si parla di “realtà fisica”. Nella fisica prequantistica, non c’era alcun dubbio sul modo di intendere queste cose: nella teoria di Newton, la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. Nella meccanica quantistica, la rappresentazione della realtà non è così facile.”

(A. Einstein, Autobiografia scientifica, pp. 49-51)

“La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del gran Vecchio. In ogni caso, sono convinto che questi non gioca a dadi col mondo”.

(A. Einstein, 1926. Lettera a Max Born)



## EINSTEIN

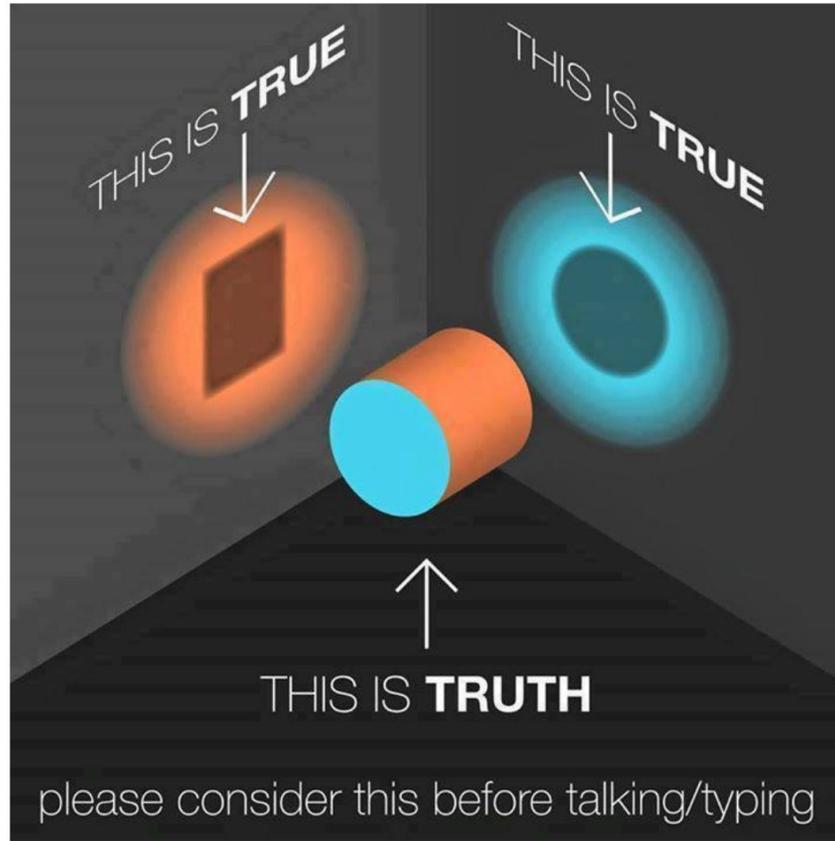
“Credo ancora  
nella possibilità di  
un modello di  
realtà – cioè una  
teoria – che  
rappresenti le cose  
di per sé, e non  
solamente la  
probabilità che  
esse accadano.”



## Per alcuni fisici....

“I fisici [...] hanno capito che il punto essenziale non è se una teoria piaccia o non piaccia, ma se fornisca previsioni in accordo con gli esperimenti. La ricchezza filosofica, la facilità, la ragionevolezza di una teoria sono tutte cose che non interessano” (Feynman)





## La relazione di indeterminazione

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

“h tagliato” =  $1,054 \times 10^{-34} \text{Js}$

Apparentemente...

“[...] una formuletta - in sé piuttosto arida e arcana - che abbiamo imparato a recitare sui libri di Liceo, dal nome fastidiosamente indimenticabile: il principio di indeterminazione di Heisenberg.”

(M. Cattaneo, Heisenberg e la rivoluzione quantistica, I grandi della scienza, Le Scienze, 2000)



**“... in certo senso cessa di essere valida la legge di causalità”**

“Nella formulazione rigorosa della legge causale - ***se conosciamo il presente possiamo calcolare il futuro*** - non è la conclusione ad essere sbagliata bensì la premessa.

Non si possono conoscere con certezza la posizione e la velocità iniziali per cui si può calcolare solo un intervallo di possibilità, per posizione e velocità, in ogni istante futuro.

[...] le leggi e le predizioni della meccanica quantistica ‘sono in generale solo di tipo statistico’. Non si può mai predire esattamente il risultato di una singola misura di un qualsiasi processo atomico, ma si può predire solo la probabilità di un risultato in un intervallo di possibilità.”

Heisenberg, 1927



Nella fisica quantistica non sarà più possibile dire che:

a) *l'oggetto possiede valori determinati di posizione e di velocità ad ogni istante,*

b) *l'incertezza è di origine sperimentale,*

c) *la misura rivela il valore della proprietà posseduta dall'oggetto.*

Il concetto di variabili coniugate (la determinazione dell'una determina una indeterminazione nell'altra), di "spettro di valori" e di "probabilità non epistemica"



## Il '900 e la Meccanica Quantistica

“La difficoltà con la teoria dei quanti risiede nei concetti, o meglio nelle parole che sono utilizzate nell'abituale descrizione della natura, che hanno tutte origine nella teoria classica” - N. Bohr

“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana...” -  
W. Heisenberg

Termini classici come particella, onda, traiettoria o orbita non sono più idonei a descrivere la natura dei fenomeni quantistici.  
Occorre pensare a quale linguaggio la fisica può utilizzare.



## Ruoli della metafora (o dell'analogia) nella storia della Scienza

Nel corso della storia della scienza, la  
Metafora è stata oggetto di pareri spesso contrastanti



- Artificio per celare il sapere (Alchimia)
- Fonte di 'inquinamento' del linguaggio scientifico (Bacone)



- Segno d'ingegno (Aristotele)
- Strumento per indagare nuovi fenomeni (Carnot, Keplero...)
- 'Science forming' ed analogia formale (Maxwell)



## La metafora nella didattica della Fisica

Strumento noto nella letteratura di ricerca in didattica e che può svolgere differenti ruoli.



“A è B” oppure “A è come B in quanto...”  
Attivazione di risorse cognitive per interpretare fenomeni nuovi:  
● Circuito elettrico / acqua

Sostitutivo/comparativo (Boyd)



Fa cogliere il meccanismo di ragionamento che sta alla base della modellizzazione:  
● Sistema solare / modello atomico

Interazione (Black)



## Vantaggi:

- Ricerca delle similitudini e dei limiti: grazie alle dinamiche di mapping allena lo studente a ragionare e a migliorare la comprensione concettuale dei contenuti scientifici.
- Accomodamento: richiama all'attenzione dello studente modelli fisici già incontrati e favorisce così la rappresentazione di nuovi oggetti (corpo nero, fotone, dualismo..)

## Svantaggi:

- Eccessiva banalizzazione: termini non chiari e poco comprensibili dagli studenti, metafore eccessivamente cristallizzate o troppo semplici possono allontanare troppo dal concetto che si vuole insegnare generando conoscenze imprecise e approssimative.



---

# Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning

David T. Brookes

*Department of Physics; Loomis Laboratory of Physics; 1110 West Green St.; Urbana, IL 61801-3080*

Eugenia Etkina

*The Graduate School of Education; 10 Seminary Place; New Brunswick, NJ 08901*

This paper introduces a theory about the role of language in learning physics. The theory is developed in the context of physics students' and physicists' talking and writing about the subject of quantum mechanics. We found that physicists' language encodes different varieties of analogical models through the use of grammar and conceptual metaphor. We hypothesize that students categorize concepts into ontological categories based on the grammatical structure of physicists' language. We also hypothesize that students over-extend and misapply conceptual metaphors in physicists' speech and writing. Using our theory, we will show how, in some cases, we can explain student difficulties in quantum mechanics as difficulties with language.

PACS numbers: 01.40.Fk;01.40.Ha;03.65.-w

---

## METAFORE SULLA FISICA QUANTISTICA

Tratto da

Fabbi F., *Le metafore nell'insegnamento/apprendimento della fisica quantistica: una sperimentazione con docenti di liceo*. Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna (Relatrici: O. Levrini, L. Branchetti)

I brani riportati di seguito sono stati scelti da diversi libri divulgativi di autori noti (prevalentemente scienziati americani) i quali si propongono, con esempi pittoreschi e avvincenti, di spiegare ad un vasto pubblico concetti di base della meccanica quantistica come indeterminazione o quantizzazione dell'energia. Un ultimo esempio è stato preso invece da un libro di testo universitario di introduzione alla Meccanica Quantistica.

La scelta di ricercare i brani accessibili ad un vasto pubblico con un diverso tipo di conoscenza nella materia specifica, e non in riviste specializzate o testi universitari, è giustificata dal fatto che l'attività è pensata anche per essere realizzata in classi quinte di Liceo.

Le metafore riguardano:

### 1. la discretizzazione dell'energia

- Brian Greene (1999), *L'universo elegante*, Einaudi, p. 44. *Effetto fotoelettrico*
- Brian Greene (1999), *L'universo elegante*, Einaudi, p. 41. *Quantizzazione dell'energia e corpo nero*

### 2. il dualismo onda-corpuscolo:

- Lévy-Leblond (2003), *On the nature of quanta*. *Science & Education. L'orbitario*

### 3. la funzione d'onda:

- Jim al-Khalili (2014), *La fisica dei perplessi*, Nuovi saggi bollati Boringhieri. *Il ladro*

### 4. concetti di base di fisica quantistica

- Brian Greene (2004), *La trama del cosmo*, Einaudi p. 95. *Il menù cinese*
- David H. McIntyre 2012, *Quantum mechanics – A paradigms approach*, p. XXI. *I calzini di Erwin*.

---

**Brian Greene (1999), *L'universo elegante*, Einaudi, p. 44. *Effetto fotoelettrico***

Per capire come Einstein sia riuscito a spiegare il fenomeno dell'effetto fotoelettrico, torniamo al nostro stanzone, dove ora fa un bel calduccio. L'orrido proprietario detesta i bambini e costringe tutti i minori di quindici anni a vivere in un seminterrato, che gli adulti possono vedere affacciandosi a una balconata. Come crudeltà aggiuntiva, ha stabilito che un bambino può lasciare quel postaccio solo se paga a una guardia una tassa di 950 lire. I bimbi non possiedono denaro, e così gli adulti cercano di salvarli gettando loro monete e banconote dalla balconata.

Ricordiamo che i soldi sono stati ridistribuiti in modo che ogni adulto possieda solo banconote e monete di un unico tipo. Il portatore delle cinquanta lire inizia a gettare qualche moneta, ma la somma è troppo scarsa per soddisfare la marea «infinita» di bambini che lottano selvaggiamente per accaparrarsi il denaro. Anche se la quantità di monete da 50 lire gettate è enorme, praticamente nessuno riuscirà in questo modo a raccogliere la cifra sufficiente per andarsene. Lo stesso accade quando iniziano i lanci di monete da 100, 200 e 500 lire. Ma quando il possessore delle 1.000 lire inizia a gettare banconote, succede un fatto nuovo: i fortunati bambini che riescono ad afferrare anche un solo biglietto possono andarsene immediatamente. Al crescere della quantità di banconote gettate cresce anche il numero dei fuggiaschi, ognuno dei quali si ritrova esattamente con 50 lire di resto.

---

### Griglia delle corrispondenze per la metafora dell'effetto fotoelettrico

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
bambini	elettroni
Il proprietario costringe tutti i minori di quindici anni a vivere in un seminterrato	l'elettrone si trova in uno stato legato
Seminterrato/ stanza	stato legato in cui si trova l'elettrone prima dell'interazione con la radiazione/ orbitale
un bambino può lasciare quel postaccio solo se paga a una guardia una tassa di 950 lire.	un elettrone può essere estratto dall'atomo soltanto a costo di un lavoro di estrazione
tassa	lavoro di estrazione
adulti che lanciano le monete	radiazione incidente
monete/banconote	radiazione (nella forma di "pacchetti discreti" di energia) con cui viene colpito l'atomo e, quindi, l'elettrone
50, 100, 1000 lire	valori possibili dei pacchetti di energia
I soldi sono stati ridistribuiti in modo che ogni adulto possieda solo banconote e monete di un unico tipo.	La radiazione incidente non è monocromatica e l'energia trasportata è "distribuita" sulle diverse lunghezze d'onda
Il portatore delle cinquanta lire inizia a gettare qualche moneta	La radiazione di una certa lunghezza d'onda colpisce l'atomo
Raccogliere	Assorbire un fotone
I fortunati bambini che riescono ad afferrare anche un solo biglietto (da 1000 lire) possono andarsene immediatamente.	Gli elettroni colpiti da un fotone "sufficientemente" energetico (che supera il valore di soglia) vengono estratti
Andarsene con il resto	L'elettrone, dopo l'estrazione, possiede una energia cinetica pari a $E = h\nu - W$
resto	Energia cinetica che rimane all'elettrone, una volta estratto $E = h\nu - W$
Al crescere della quantità di banconote gettate cresce anche il numero dei fuggiaschi	Al crescere del numero dei fotoni che interagiscono con l'atomo, cresce l'intensità del fascio di elettroni estratti

Brian Greene (1999 ), *L'universo elegante*, Einaudi, p. 41. *Quantizzazione dell'energia e corpo nero*

Vi trovate insieme con un enorme numero di individui -diciamo un numero «infinito» - in scatolati in uno stanzone gelido, il cui proprietario è un profittatore. Un termostato ultimo modello fa mostra di sé alla parete; ma vi accorgete presto che le tariffe imposte dal proprietario per il riscaldamento sono altissime. Se il termostato viene messo sui 10° C, ognuno deve pagare 100.000 lire al giorno; se si alza a 15° C, la cifra sale a 150.000 e così via. Visto che i vostri compagni di sventura sono infiniti, vi rendete conto che il malvagio proprietario guadagnerà una quantità infinita di denaro non appena il riscaldamento verrà acceso.

Ma leggendo meglio il contratto di affitto, vi accorgete di una possibile scappatoia. Il proprietario è un uomo molto occupato e non intende dare resto, soprattutto a un numero infinito di inquilini. Esiste dunque un sistema basato sulla fiducia: solo chi può pagare la cifra esatta paga interamente, gli altri danno quello che hanno. Vi viene allora in mente di raccogliere tutti i soldi dei vostri compagni e di organizzare il pagamento in questa maniera: un individuo prende tutte le monete da 50 lire, un altro tutte quelle da 100, e così via; in questo strano mondo, però, esistono strane banconote, e dopo quelle da 500 000 lire ve ne sono altre di valore ancora superiore, senza un limite massimo. Spavaldamente, posizionate il termometro a 25°C. Subito il proprietario si presenta a riscuotere il dovuto (250.000 lire a testa). Ecco cosa succede: chi ha le monete da 50 lire gliene dà 5000, chi ha quelle da 100 lire gliene dà 2500 e così via, fino ad arrivare a chi ha le banconote da 50 000, che ne paga 5, e a chi ha quelle da 100.000, che ne dà solo 2 (perché con 3 il proprietario dovrebbe dare resto). Tutti gli altri, però, hanno solo banconote da 500 000 in su, e quindi non possono pagare, perché ci sarebbe comunque un resto. Il proprietario, che si aspettava una quantità infinita di denaro, si ritrova invece con la misera somma di 2.450 000 lire (ci sono 9 tipi di monete e banconote dalle 50 alle 50.000 lire, e quindi 9 persone che possono pagare 1e 250.000; aggiungendo 1e 200.000 pagate da chi ha le banconote da 100.000 il conto torna).

Planck si comportò in modo molto simile nei confronti delle pretese dell'energia infinita. Arditamente, avanzò l'ipotesi che l'energia trasportata da un'onda elettromagnetica potesse presentarsi - come il denaro contante - solo in pacchetti ben precisi. Introdotta una «Moneta energetica», i valori possibili sono solo multipli interi di questa unità: uno, due, tre eccetera, e nient'altro, proprio come non esiste un quarto di cento lire o mezza banconota da mille. Come gli inquilini che non possono pagare il proprietario perché hanno banconote troppo grandi, se un'onda ha un'energia minima intrinseca più grande del valore che dovrebbe teoricamente fornire all'energia totale, non «paga» e rimane inerte.

### Griglia delle corrispondenze per la metafora del corpo nero

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
Numero infinito di individui	Onde all'interno del corpo nero/ oscillatori
Stanzone gelido	Interno della cavità rappresentante un corpo nero
Termostato	Misuratore della temperatura e, quindi, indicatore dell'equilibrio termico all'interno della cavità.
Numero infinito di individui	Numero degli oscillatori delle pareti su cui può essere distribuita l'energia totale presente nella cavità (nell'ipotesi classica di continuità del campo stesso).
Tariffa imposta dal proprietario (a seconda della temperatura)	Quantità di energia emesso da ciascun oscillatore, in virtù della temperatura, nell'ipotesi termodinamica classica
Quantità infinita di denaro guadagnata dal proprietario	Catastrofe ultravioletta
50,100,....,50000 lire	Discretizzazione dei "pacchetti" d'energia che il campo può scambiare con gli oscillatori delle pareti
Raccogliere i soldi [...] organizzare il pagamento	Quantizzazione/ nuovo modo di "contare"
Un individuo prende tutte le monete da 50 lire, un altro tutte quelle da 100, e così via	Divisione delle energie degli oscillatori in base alla loro frequenza, come multipli di una grandezza fondamentale, come illustra il postulato di Planck [ <i>Qualsiasi grandezza fisica con un grado di libertà la cui "coordinata" è una funzione sinusoidale del tempo può possedere solo energie totali E tali che sia soddisfatta la relazione <math>E = nh\nu</math></i> ]
Il proprietario si ritrova invece con la misera somma di 2.450 000 lire (ci sono 9 tipi di monete e banconote dalle 50 alle 50.000 lire, e quindi 9 persone che possono pagare 1e 250.000; aggiungendo 1e 200.000 pagate da chi ha le banconote da 100.000 il conto torna).	Tramite le intuizioni di Planck, sostituendo all'integrale per il calcolo dell'energia media una sommatoria sui valori discreti dell'energia, si riesce superare i risultati di Rayleigh-Jeans ed evitare la catastrofe ultra violetta

---

**Jim al-Khalili (2014), La fisica dei perplessi, Nuovi saggi bollati Boringhieri. *Metafora del ladro***

Un ladro è appena uscito di prigione e la polizia non è per nulla convinta che abbia cambiato vita, per cui, studiando una cartina della città, cerca di seugire i suoi movimenti dopo il rilascio. I poliziotti non riescono a determinare esattamente dove di trovi il ladro in ogni istante, ma possono cercare di indovinare la probabilità che avvengano furti negli appartamenti dei vari quartieri. Per cominciare, le case vicino alla prigione saranno più a rischio, ma l'aera interessati si allarga con il tempo; si può anche dire con relativa certezza che le zone più ricche saranno più a rischio di quelle povere. Questa ondata di crimini dovuti a un solo uomo si estende in tutta la città, e si può considerare come un'onda di probabilità: non è una cosa tangibile, o reale, è solo un insieme di numeri astrattamente assegnati a ogni luogo in città. In modo simile, la funzione d'onda si estende dal punto in cui l'elettrone è stato visto l'ultima volta e ci permette di calcolare quanto è probabile che ora si trovi in un punto o in un altro.

Gli investigatori si accorgono che la loro intuizione era corretta quando avviene un furto in un certo appartamento. Questo cambia la distribuzione di probabilità, perché ora si sa che il ladro sarà nei paraggi della scena del crimine. Allo stesso modo, se l'elettrone viene rilevato in un certo punto, allora la sua funzione d'onda cambia immediatamente. Nel momento della rilevazione ci sarà probabilità zero di trovarlo in qualunque altro posto, e poi la funzione d'onda evolve nel tempo e si estende di nuovo.

---

### Griglia delle corrispondenze per la metafora della funzione d'onda

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
Ladro	Elettrone
Polizia	Osservatore/scienziato/sperimentatore
Cartina della città	Spazio in cui l'elettrone può essere trovato (scatola vuota, in un orbitale, in una buca di potenziale...)
I poliziotti non riescono a determinare esattamente dove di trovi il ladro in ogni istante	La posizione dell'elettrone non è determinabile con certezza sulla base di una legge deterministica
Probabilità che avvengano furti nei vari quartieri	Probabilità di trovare l'elettrone nei vari punti dello spazio
Furto	Interazione tra l'elettrone e lo strumento (atto della misura)
Distribuzione di probabilità di trovare il ladro	Distribuzione di probabilità di trovare l'elettrone
Le case vicino alla prigione saranno più a rischio, ma l'area interessata si allarga con il tempo.	La funzione d'onda evolve nel tempo
Questo [il furto] cambia la distribuzione di probabilità, perché ora si sa che il ladro sarà nei paraggi della scena del crimine.	L'atto della misura permette di affermare che, subito dopo la misura stessa, l'elettrone si trova in una zona precisa

---

**Brian Greene (2004), La trama del cosmo, Einaudi p. 95. *Il menù cinese***

Per capire di che cosa si tratta [il principio di indeterminazione], pensiamo al menù a prezzo fisso di alcuni ristoranti cinesi: le pietanze sono elencate in due colonne, A e B. Se ordiniamo il primo piatto della colonna A, non possiamo ordinare il primo piatto della colonna B; se ordiniamo il secondo piatto della colonna A, non possiamo ordinare il secondo della colonna B, e così di seguito. In questo modo il ristorante istituisce una sorta di dualismo alimentare, una complementarità culinaria (che impedisce, in particolare, al cliente di scegliere tutti i piatti più cari). Nei menù cinesi a prezzo fisso possiamo avere l'anatra alla pechinese o l'aragosta alla cantonese, ma non entrambe.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg fa una cosa molto simile: a grandi linee, inserisce le caratteristiche fisiche del mondo microscopico in due elenchi distinti A e B. La conoscenza della prima caratteristica dell'elenco A compromette sostanzialmente la capacità di conoscere la prima della lista B; la conoscenza della seconda caratteristica dell'elenco A compromette la capacità di conoscere la seconda dell'elenco B, e così via. Inoltre, proprio cose se ci fosse concesso di assaporare

un piatto contenente un po' di anatra alla pechinese e di aragosta alla cantonese, ma solo in proporzioni tali da corrispondere allo stesso prezzo totale, quanto più precisa è la nostra conoscenza di un aspetto della lista A, tanto meno precisa sarà quella dell'aspetto corrispondente della lista B. L'incapacità fondamentale di determinare simultaneamente tutte le caratteristiche dei due elenchi, ossia di stabilire con certezza tutte le proprietà del mondo microscopico, è l'indeterminazione illustrata dal principio di Heisenberg.

---

**Griglia delle corrispondenze per la metafora del principio di indeterminazione.**

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
Menù a prezzo fisso	Oggetto quantistico
Piatti	Proprietà dell'oggetto/ grandezze misurabili
Divisione in colonna A e colonna B	Divisione in due classi di proprietà dell'oggetto non commutabili
Anatra alla pechinese/aragosta alla cantonese	Esempio di grandezze coniugate da misurare: es. posizione e quantità di moto
Prezzo totale fissato	Il prodotto delle dispersioni è sempre $\geq \hbar/2$
Ordiniamo	Misuriamo una grandezza del sistema
Possiamo avere [...] ma non entrambi Tanto più precisa è....tanto meno precisa sarà...	Possiamo conoscere una grandezza del sistema con la precisione che vogliamo ma non entrambe le grandezze. Tanto più precisa è la misura dell'una, tanto meno precisa sarà l'altra

---

David H. McIntyre 2012, Quantum mechanics – A paradigms approach, p. XXI. *I calzini di Erwin*

Erwin aveva una collezione di calzini molto semplice – rossi o blu, per andare all'università o per giocare a pallone, corti o lunghi a seconda che li portasse con pantaloni o pantaloncini.

Erwin teneva i calzini in due cassette: in uno teneva i calzini rossi e nell'altro quelli blu, ritenendo di poter capire se erano lunghi o corti semplicemente toccandoli.

Ma non era proprio così: infatti ogni volta che dal cassetto dei calzini rossi, estraeva due calze lunghe o due corte, c'era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse rosso o blu; stesso risultato per il cassetto blu. I calzini sembravano aver *dimenticato* la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente, ovvero il loro colore!

Erwin decise così di organizzare i calzini secondo la loro lunghezza: fece un cassetto con i calzini lunghi ed uno per i calzini corti. Quando però andava a prendere da uno dei due cassettei due calze rosse o blu, c'era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse lungo o corto...avevano *dimenticato* la proprietà di essere lunghi o corti.

---

### Griglia delle corrispondenze per la metafora dei calzini.

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale (in riferimento ad un apparato Stern &amp; Gerlach)</i>
Erwin	Scienziato/sperimentatore
Collezione di calzini	Insieme di oggetti quantistici (fascio di fotoni, elettroni...)
Colore (rossi o blu) Lunghezza (corti o lunghi)	Coppia di grandezze fisiche che non commutano, ciascuna delle quali può assumere soltanto due valori (es. spin lungo z e spin lungo x)
Calzini rossi e blu	Ad esempio, stato di spin z su e di spin z giù
Calzini lunghi e corti	Ad esempio, stato di spin x su e di spin x giù
"Erwin teneva i calzini in due cassette: in uno teneva i calzini rossi e nell'altro quelli blu."	Lo scienziato prepara il sistema fisico, facendolo passare attraverso uno strumento di misura, ad esempio attraverso un apparato di Stern e Gerlach disposto in modo tale da misurare lo spin degli atomi d'argento lungo z.
Due cassette	I due autostati (possibili esiti di una misura) di una grandezza come lo spin
"[Erwin] dal cassetto dei calzini rossi estrae due calze lunghe o due corte" [] "andava a prendere da uno dei due cassette [o corto o lungo] due calze rosse o blu"	Lo scienziato seleziona il fascio con spin z su e, su questo, fa una misura di spin x, facendolo passare attraverso un apparato di Stern e Gerlach disposto lungo x. Quindi seleziona il fascio corrispondente a spin x su o a spin x giù e lo fa di nuovo passare attraverso un apparato di Stern e Gerlach disposto lungo z.
Se scelgo un calzino lungo o corto "c'è una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse rosso o blu" Se scelgo un calzino rosso o blu "c'è una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse lungo o corto"	Se lo scienziato seleziona gli atomi dal fascio corrispondente a spin x su o giù, c'è una probabilità del 50% che gli atomi di ciascun fascio abbiano spin z su o giù. Se lo scienziato seleziona gli atomi dal fascio corrispondente a spin z su o giù, c'è una probabilità del 50% che gli atomi di ciascun fascio abbiano spin x su o giù.
"I calzini sembravano aver dimenticato la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente"  "avevano dimenticato la proprietà di essere lunghi o corti."	Gli atomi sembrano aver dimenticato la proprietà che lo scienziato aveva determinato nella misura che aveva preceduto quella della variabile coniugata, ad esempio avevamo dimenticato la proprietà di avere spin z su, se su questo fascio poi faccio una misura di spin x.
Proprietà di colore Proprietà di lunghezza	Non si può dire che gli oggetti quantistici abbiano una proprietà determinata: questa proprietà, in generale, esiste solo in uno stato di sovrapposizione.

---

# Quantum Mechanics Simulations

---

---

## Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics

S. B. McKagan, K. K. Perkins, M. Dubson, C. Malley, S. Reid, R. LeMaster, and C. E. Wieman

Citation: *American Journal of Physics* **76**, 406 (2008); doi: 10.1119/1.2885199

View online: <https://doi.org/10.1119/1.2885199>

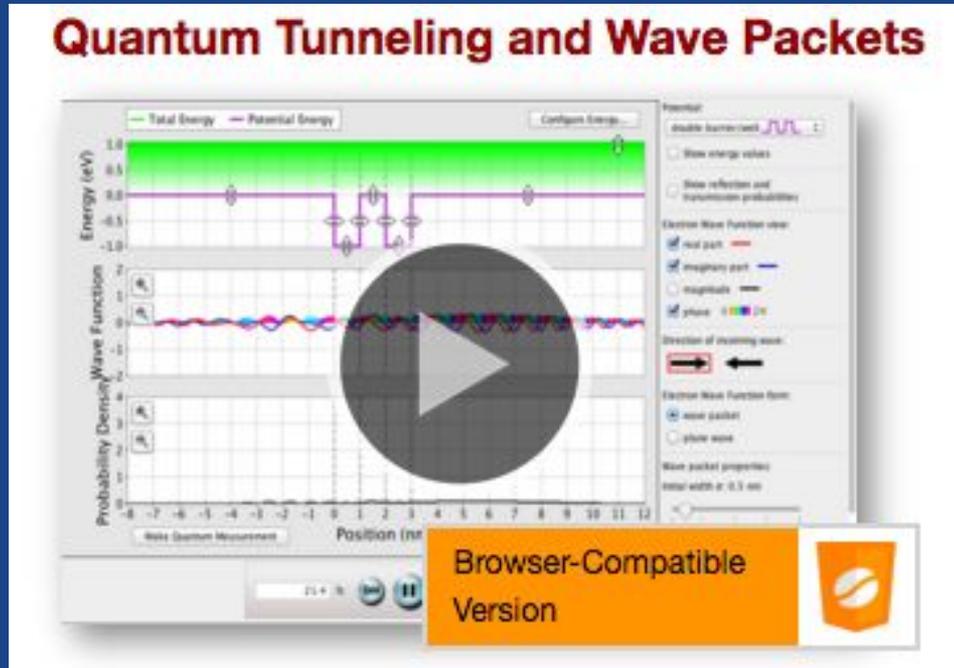
View Table of Contents: <https://aapt.scitation.org/toc/ajp/76/4>

Published by the [American Association of Physics Teachers](#)

<https://doi.org/10.1119/1.2885199>

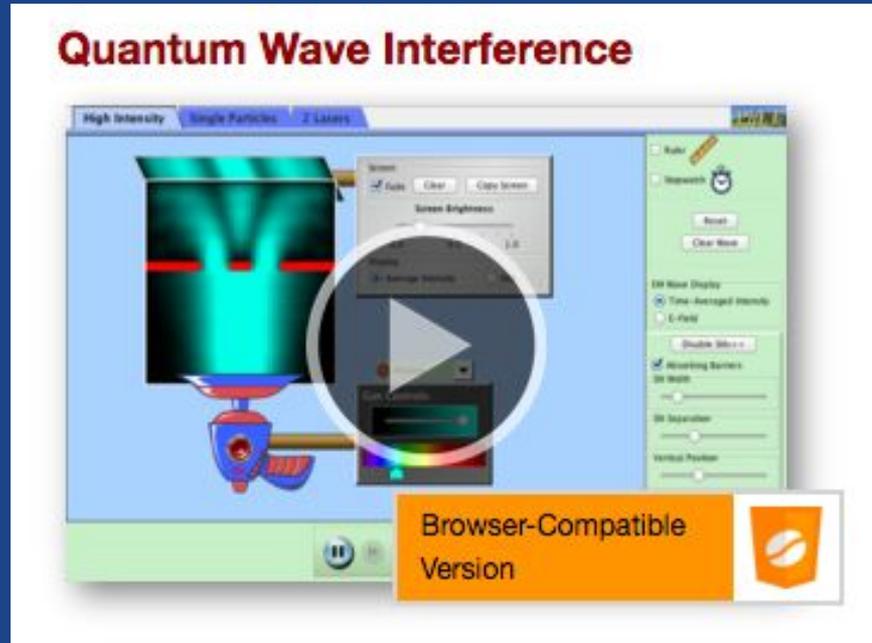
---

# Quantum Tunneling and Wave Packets



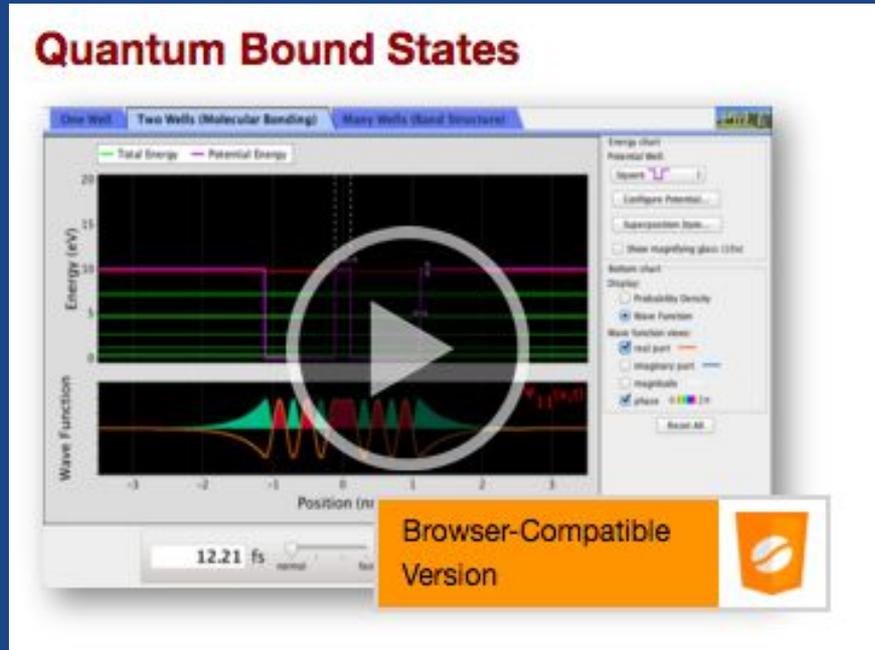
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling>

# Quantum Wave Interference



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-wave-interference>

# Quantum Bound States



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/bound-states>

# Double Wells and Covalent Bonds

**Double Wells and Covalent Bonds**

Energy (eV)

Position (m)

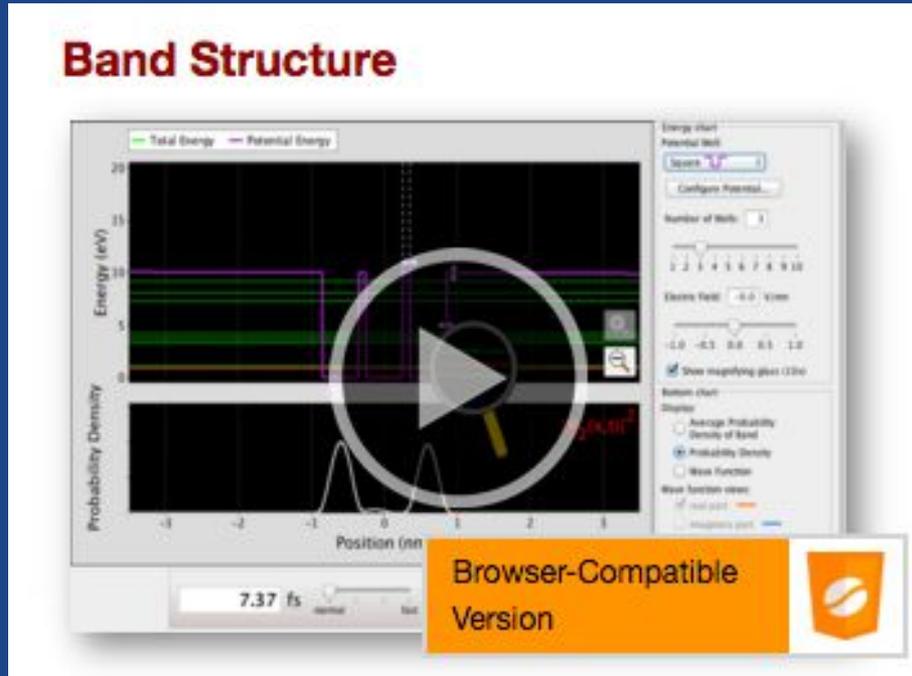
Wave Function

14.23 fs

Browser-Compatible Version

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/covalent-bonds>

# Band Structure



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/band-structure>

---

# Optical Quantum Control

**Optical Quantum Control**

Watch the pink output pulse shape to make the molecule break apart!

Browser-Compatible Version

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/optical-quantum-control>

---

---

# MQ nella formazione degli insegnanti

## **GLI INSEGNANTI RIFLETTONO SUI NODI CONCETTUALI DELLA MECCANICA QUANTISTICA**

**M. Michelini, L. Santi, A. Stefanel**

*Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università di Udine*

### **1. Introduzione**

Accanto alla formazione in rete sulla meccanica quantistica (MQ) nell'ambito di IDIFO sono state proposte diverse attività nei workshop in presenza. Esse erano in particolare mirate alla riflessione e alla discussione sui nodi concettuali fondanti della teoria:

- una tavola rotonda di presentazione e confronto sulle diverse impostazioni delle proposte sull'insegnamento della MQ offerte in IDIFO (Sperandeo 2004; Stefanel 2008, Battaglia et al. 2010) e delle esperienze di sperimentazione
- una serie di seminari partecipati sui suoi contenuti concettuali, epistemologici, storici
- un work-shop di analisi approfondita di una proposta didattica basata sulla ricerca (Ghirardi et al. 1997; Michelini et al. 2000)
- approfondimenti sull'analisi di casi proposti in forma problematica, come angoli di riflessione di percorsi didattici sulla MQ, in particolare incentrati su: logica quantistica; formalismo; aspetti storici; nodi concettuali

<http://www.fisica.uniud.it/URDF/articoli/ftp/2010/2010-43.pdf>

---

---

# MQ nella formazione degli insegnanti

- Q1.1** Il comportamento quantistico: quali sono gli elementi che lo caratterizzano/identificano.
- Q1.2** Le proprietà di un sistema: conoscerle o non conoscerle implica l'esistenza di tali proprietà?
- Q1.3** La misura: come cambiano significato e ruolo della misura in MQ rispetto alla fisica classica?
- Q1.4** Il risultato di una misura: sua prevedibilità e natura oggettiva delle proprietà misurate
- Q1.5** Il dominio della MQ: Si può applicare la MQ ai sistemi macroscopici?

---

# MQ nella formazione degli insegnanti

**Q2.1** Perché insegnare MQ?

**Q2.2** Concetti di base irrinunciabili in una proposta didattica in MQ. Spiegare le ragioni delle scelte.

**Q2.3** Quali aspetti privilegiare (formali, storici, logici, concettuali, applicativi)?

---

# Quantum Physics ISLE approach

---

L'area B mostra ciò che la buca di potenziale potrebbe essere fisicamente. Sarebbe un filo unidimensionale con aree in cui l'elettrone si muove liberamente (aree bianche) e aree dove non può accedere (aree nere)

L'area G mostra la statistica dei risultati sotto forma di istogrammi. Gli istogrammi ci dicono quante volte la particella è stata misurata a sinistra e quante volte è stata misurata a destra. Per ogni tempo di misura scelto in D vi è un istogramma.

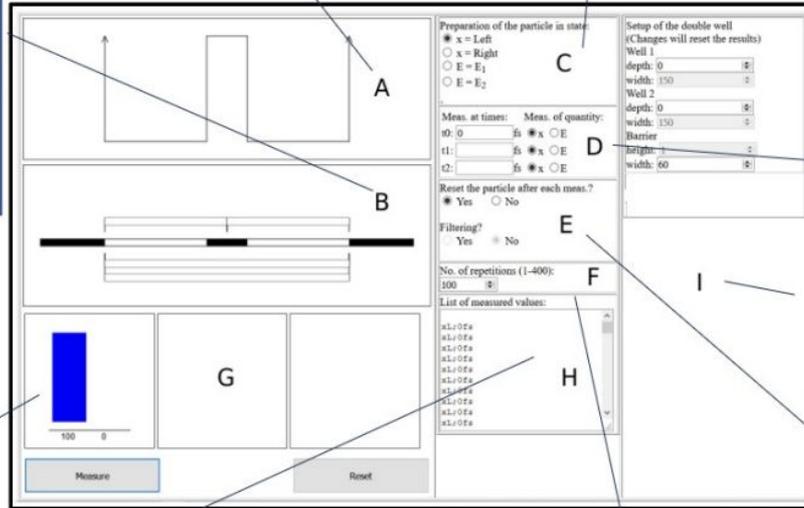
L'area A mostra la doppia buca di potenziale.

L'area C permette di preparare lo stato iniziale dell'elettrone: puoi scegliere se inizialmente metterlo nella buca a sinistra o destra ( $x=Left$  o  $x=Right$ ) o puoi scegliere il livello di energia ( $E=E_1$  o  $E=E_2$ ).

L'area D permette di decidere il tempo della misura espresso in femtosecondi (1 fs equivale a  $1 \times 10^{-15}$  s). Puoi eseguire in totale tre misure. Puoi scegliere se misurare posizione o energia.

L'area I permette di modificare le impostazioni della buca. Non verrà usata.

L'area E ti serve quando devi fare misure una dopo l'altra. Se selezioni 'Yes', dopo una misura la particella ritorna allo stato iniziale definito nell'area C, se selezioni 'No', la simulazione non ritorna allo stato di preparazione iniziale.



L'area H mostra i singoli risultati.

L'area F ti permette di eseguire più misure della stessa particella automaticamente, senza dover ogni volta premere manualmente il tasto Measure.

# Project Based Learning

# Project Based Learning

BUCK INSTITUTE FOR EDUCATION

**PBLworks**

[What is PBL?](#) [Why PBL?](#) [Get Started](#) [Services](#) [Research](#) [Projects & Resources](#)

[Twitter](#) [Instagram](#) [Facebook](#)



**What is PBL?**

Project Based Learning (PBL) is a teaching method in which students learn by actively engaging in real-world and personally meaningful projects.

The image shows a group of students in a classroom or studio setting. In the foreground, a young man with glasses is holding a professional microphone on a boom stand. Next to him, another young man with glasses is looking at a camera. To the right, a young woman with long, curly hair is operating a professional video camera. In the background, another student is visible, and the room is filled with various pieces of equipment, suggesting a hands-on learning environment.

<https://www.pblworks.org/what-is-pbl>

# Project Based Learning

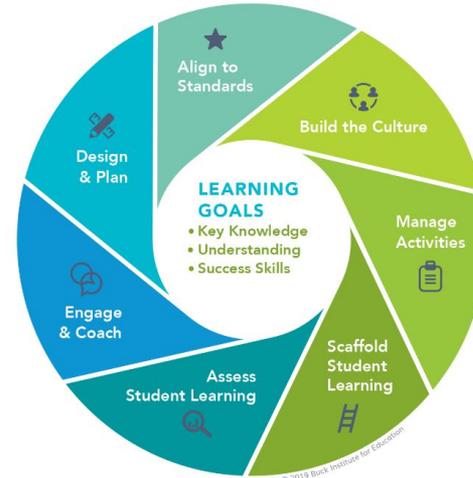
## Gold Standard PBL

Seven Essential Project Design Elements



## Gold Standard PBL

Seven Project Based Teaching Practices



# Project Based Learning

## Project-Based Learning: Teaching Guide

### Introduction

Project-based learning (PBL) involves students designing, developing, and constructing hands-on solutions to a problem. The educational value of PBL is that it aims to build students' creative capacity to work through difficult or ill-structured problems, commonly in small teams. Typically, PBL takes students through the following phases or steps:

1. Identifying a problem
2. Agreeing on or devising a solution and potential solution path to the problem (i.e., how to achieve the solution)
3. Designing and developing a prototype of the solution
4. Refining the solution based on feedback from experts, instructors, and/or peers

# Project Based Learning



## Project Based Learning (PBL): cos'è e come funziona

18

GIU

*L'apprendimento basato su progetti può migliorare sensibilmente l'efficacia di un corso di formazione e amplificarne gli effetti nel contesto extra-didattico. Scopriamo come.*

👤 Sonia Melilli 📁 Progettazione, Piattaforme elearning, Formazione, Buone pratiche

La **formazione tradizionale** è spesso ancorata a metodologie formative inadeguate che non forniscono agli studenti gli stimoli, i metodi e le soluzioni per applicare le nozioni apprese alla realtà extra-formativa e alle attività lavorative. Questo perché gli approcci didattici utilizzati sono ancora molto legati alla **memorizzazione meccanica di nozioni alienate dai loro usi concreti** nel mondo reale.

Ma come fare in modo che la formazione contribuisca a sviluppare l'intelligenza critica necessaria ad affrontare e risolvere le questioni complesse che si affrontano nella realtà (lavorativa e non) quotidiana?

In questo articolo analizzeremo le opportunità offerte dal **Project Based Learning (PBL)**, concentrandoci in particolare su:

- Cos'è il Project Based Learning
- I 7 elementi essenziali del Project Based Learning
- I principali vantaggi dell'apprendimento basato sui progetti

# Project Based Learning

CHAPTER 19

## Project-Based Learning

*Joseph S. Krajcik and Phyllis C. Blumenfeld*

Learning sciences research provides a potential solution to these problems. Drawing on the cognitive sciences and other disciplines, learning scientists are uncovering the cognitive structure of deeper conceptual understanding, discovering principles that govern learning, and showing in detail that schools teach superficial knowledge rather than deeper knowledge. Drawing on this research, many learning scientists are developing new types of curricula, with the goal of increasing student engagement and helping them develop deeper understanding of important ideas. Our own contribution is articulating the features of *project-based learning* (Blumenfeld et al., 2000; Krajcik et al., 1994). Project-based learning allows students to learn by doing and applying ideas. Students engage in real-world activities that are similar to the activities that adult professionals engage in.

# Project Based Learning

Dec. 2008, Volume 5, No.12 (Serial No.49)

US-China Education Review, ISSN1548-6613, USA

## Effective teaching methods —Project-based learning in physics\*

*Renata Holubova*

*(Faculty of Science, Palacky University Olomouc, Svobody 26 77146, Czech Republic)*

**Abstract:** The paper presents results of the research of new effective teaching methods in physics and science. It is found out that it is necessary to educate pre-service teachers in approaches stressing the importance of the own activity of students, in competences how to create an interdisciplinary project. Project-based physics teaching and learning seems to be one of the most effective methods for teaching science for understanding. It is necessary to provide in-service teachers instruction (seminars) and prepare sample projects with proposals how to develop, run and evaluate interdisciplinary projects. Projects are important “real-world” physics modules, modern physics and everyday life problems can be integrated into the high school curriculum. Examples of projects that were worked out are presented.

**Key words:** physics; teaching method; project-based learning; renewable energy; water

# Project Based Learning

## Project-based learning: a review of the literature

### Defining characteristics of project-based learning

Project-based learning is a student-centred form of instruction which is based on three constructivist principles: learning is context-specific, learners are involved actively in the learning process and they achieve their goals through social interactions and the sharing of knowledge and understanding (Cocco, 2006). It is considered to be a particular type of inquiry-based learning where the context of learning is provided through authentic questions and problems within real-world practices (Al-Balushi & Al-Aamri, 2014) that lead to meaningful learning experiences (Wurdinger, Haar, Hugg & Bezon, 2007). Blumenfeld, Fishman, Krajcik, Marx and Soloway (2000), for example, described the process of project-based science as follows:

*'The presumption is that students need opportunities to construct knowledge by solving real problems through asking and refining questions, designing and conducting investigations, gathering, analysing, and interpreting information and data, drawing conclusions, and reporting findings' (p.150).*

# Project Based Learning



<https://www.youtube.com/watch?v=crMM4z3oKmQ>

# Project Based Learning

## Project based learning

### Descrizione

Project Based Learning (PBL) è un modello di insegnamento e apprendimento intorno ai progetti, centrato sullo studente. I progetti sono compiti complessi, basati su domande stimolanti o problemi, che coinvolgono collaborativamente, per periodi piuttosto lunghi di tempo, gli studenti nella progettazione, nella risoluzione di problemi, nel processo decisionale o in attività di ricerca. Mediante i progetti gli allievi acquisiscono autonomia e responsabilità, sviluppano competenze e applicano conoscenze, apprendendo in modo significativo, I progetti culminano con la realizzazione di prodotti autentici. Riferimenti pedagogici: costruttivismo e il costruttivismo sociale



<https://www.metodologiedidattiche.it/project-based-learning/>

# Project based Learning

## I 7 elementi essenziali del Project Based Learning

Il modello PBL si compone di questi 7 elementi principali.

### 1. PROBLEMA DA RISOLVERE

Per prima cosa, il progetto è inquadrato da un **problema significativo** da risolvere o da una domanda a cui rispondere. Per garantire il massimo coinvolgimento, consigliamo di creare progetti o compiti autentici, collegati al mondo reale, interessanti per gli studenti e, soprattutto, legati al programma didattico.

### 2. INDAGINE

Una volta assegnato il problema, gli studenti si impegnano in un processo rigoroso volto a porre domande, trovare risorse e informazioni utili alla sua risoluzione. La **fase di indagine** può durare anche settimane e coinvolgere gli studenti in attività al di fuori della lezione. Attingendo da una varietà di risorse (interviste ad esperti, utilizzo di nuovi strumenti e tecnologie, etc.), gli studenti interagiscono con il mondo che li circonda mentre ottengono le informazioni di cui hanno bisogno per sviluppare una risposta ben studiata alla domanda posta nella prima fase e sviluppano competenze comunicative e pensiero critico.

In questa fase, è fondamentale che il docente valuti costantemente i risultati di apprendimento e la partecipazione degli studenti.

# Project based Learning

## 3. AUTENTICITA

L'autenticità aumenta la motivazione e l'apprendimento degli studenti. Un progetto può essere autentico in diversi modi, spesso in combinazione: può avere un **contesto autentico**, come quando gli studenti risolvono problemi come quelli affrontati da persone nel mondo al di fuori della scuola; può comportare l'uso di processi, attività e strumenti del mondo reale; può avere un **impatto** reale sugli altri, come quando gli studenti affrontano un bisogno della loro scuola o comunità (ad esempio, progettare e costruire un orto scolastico, migliorare un parco comunitario, etc.) o creare qualcosa che sarà usato o sperimentato da altri. Infine, un progetto può avere **autenticità personale** quando parla delle preoccupazioni, degli interessi, delle culture, delle identità e dei problemi degli studenti nelle loro vite.

## 4. VOCE E SCELTA

Avere voce in capitolo in un progetto crea un **senso di appartenenza** negli studenti, perché fa in modo che si preoccupino di più del progetto e lavorino con maggiore impegno. Se gli studenti non sono in grado di usare il loro giudizio quando risolvono un problema e rispondono a una domanda guida, il progetto si riduce semplicemente allo svolgimento di un esercizio o all'applicazione di una serie di indicazioni date.

## 5. RIFLESSIONE

Durante un progetto, gli studenti dovrebbero riflettere su ciò che stanno imparando, su come stanno imparando e perché lo stanno facendo. La riflessione può avvenire in modo informale, ma è preferibile che sia parte stessa del progetto e della valutazione. Riflettere sul processo di apprendimento in atto aiuta gli studenti a consolidare ciò che hanno appreso e a pensare a come potrebbe applicarsi altrove, al di là del progetto.

# Project based Learning

## 6. CRITICA E REVISIONE

Il feedback è un elemento essenziale di qualsiasi attività, perché contribuiscono a migliorare i processi e prodotti. Per questo motivo, agli studenti dovrebbe essere insegnato come **fornire e ricevere feedback** costruttivi tra pari, guidati da rubriche, modelli e protocolli formali di feedback.

## 7. PRODOTTO PUBBLICO

L'elemento conclusivo del Project Based Learning è il cosiddetto "**prodotto pubblico**", cioè la fase in cui gli studenti rendono pubblico il loro project work condividendolo e spiegandolo o presentandolo a persone al di fuori della classe. Ci sono due ragioni principali per creare un prodotto pubblico: in primo luogo, un prodotto pubblico aumenta notevolmente la motivazione degli studenti e incoraggia un lavoro di alta qualità; in secondo luogo, creando un prodotto o una presentazione, gli studenti rendono tangibile ciò che hanno appreso e, allo stesso tempo, aumenta la dimensione sociale dell'apprendimento.

# Project based Learning

## Vantaggi dell'apprendimento basato sui progetti

Come abbiamo visto, l'apprendimento tradizionale difficilmente si avventura oltre il regno del puramente accademico. L'apprendimento basato su progetti, al contrario, connette gli studenti al mondo al di fuori della classe e li prepara ad affrontare le sfide del mondo reale in un modo che rispecchia ciò che i professionisti fanno ogni giorno.

Il vantaggio principale di questo approccio didattico è che aiuta gli studenti ad essere pensatori autosufficienti, creativi e critici, in grado di affrontare qualsiasi sfida.

Vediamo quindi nel dettaglio quali sono i principali vantaggi offerti dal Project Based Learning.

### 1. ENFATIZZA IL LAVORO DI SQUADRA

Quando gli studenti collaborano per risolvere un problema del mondo reale, le loro capacità interpersonali migliorano sensibilmente. Inoltre, la natura collaborativa dei progetti rafforza i programmi di apprendimento sociale ed emotivo.

### 2. SVILUPPA IL PENSIERO CRITICO

Essere impegnati nella risoluzione di un problema aiuta a perfezionare il pensiero critico e le capacità di problem solving.

### 3. FACILITA L'APPRENDIMENTO PROFONDO E A LUNGO TERMINE

L'apprendimento basato sui progetti offre agli studenti l'opportunità di impegnarsi a fondo con il contenuto target, concentrandosi sulla conservazione a lungo termine delle informazioni apprese.

# Project based Learning

## 4. INFONDE FIDUCIA IN SÉ STESSI

Durante le fasi del PBL, gli studenti si impegnano nel processo di apprendimento ed esprimono le loro opinioni, rafforzando la fiducia in sé stessi.

## 5. AUMENTA IL COINVOLGIMENTO

La struttura PBL contribuisce a costruire una motivazione intrinseca negli studenti, perché collega l'apprendimento ad una domanda o problema centrale e a un risultato significativo. In questo modo, la loro naturale curiosità per l'argomento aumenta e finiscono per voler capire la risposta o la soluzione al problema, impegnandosi attivamente.

## 6. MIGLIORA LE CAPACITÀ DECISIONALI

L'apprendimento basato su progetti migliora le capacità decisionali degli studenti perché li mette nelle condizioni di dover prendere decisioni critiche durante lo svolgimento dei progetti. Ad esempio, decisioni sul percorso di ricerca o gli strumenti che dovrebbero essere utilizzati per raggiungere un risultato efficace.

## 7. SVILUPPA COMPETENZE TECNOLOGICHE

Nella fase di indagine, gli studenti sono anche motivati ad individuare e usare gli strumenti tecnologici che li possano aiutare a raggiungere gli obiettivi di apprendimento previsti. La tecnologia ed internet, ad esempio, possono infatti aiutarli nelle loro ricerche, nelle loro analisi, e a prendere in considerazione soluzioni alternative.

## 8. FACILITA L'APPRENDIMENTO MULTIDISCIPLINARE

Usando il cosiddetto "approccio project-based", gli studenti sono spinti a raggiungere obiettivi a lungo termine che hanno molto a che fare con problemi di vita reale. Questo li mette nelle condizioni di osservare la complessità e gli aspetti interdisciplinari di qualsiasi lavoro o attività in modo più realistico, aiutandoli a prepararsi alle sfide future.

---

# Physics Education

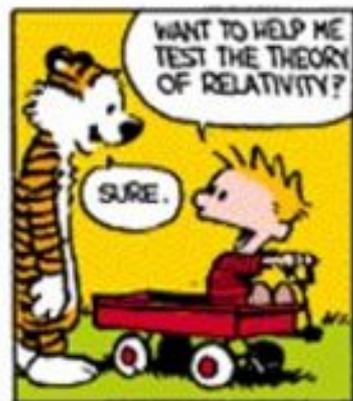
# Laboratory

# Lecture 23

# Content Knowledge for Relativity and Modern Physics

Francesco Longo • 15/12/2025

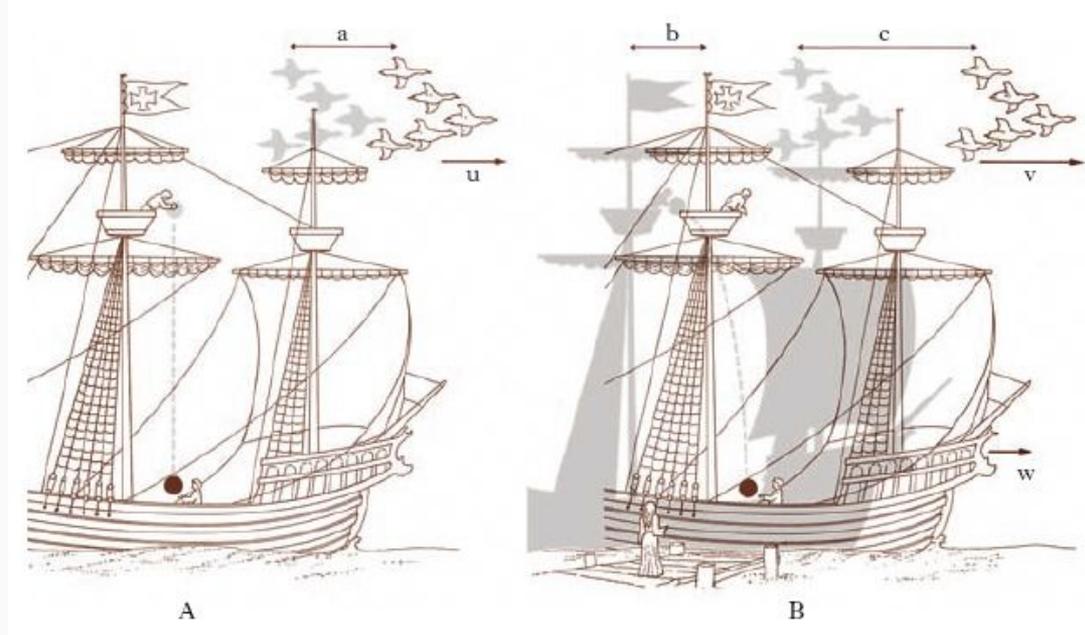
---



© 1988 Universal Press Syndicate

# Key concepts in Relativity

- System of reference
- Measure of Time and Distance
- Inertial systems
- Relativity principle
- The postulates
- The interval
- Measures of time “and” space ..



# Key concepts in Relativity

- The postulates

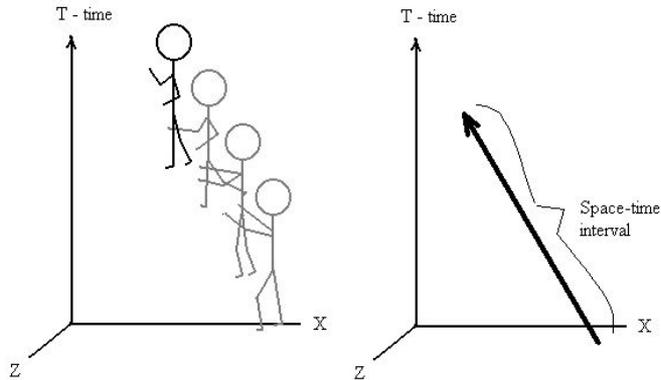
## Postulates of Special Relativity

- The Relativity Postulate
  - The laws of physics are the same in every inertial reference frame
- The Speed of Light Postulate
  - The speed of light in a vacuum, measured in any inertial reference frame, always has the same value of  $c$ , no matter how fast the source of light and the observer are moving relative to each other.

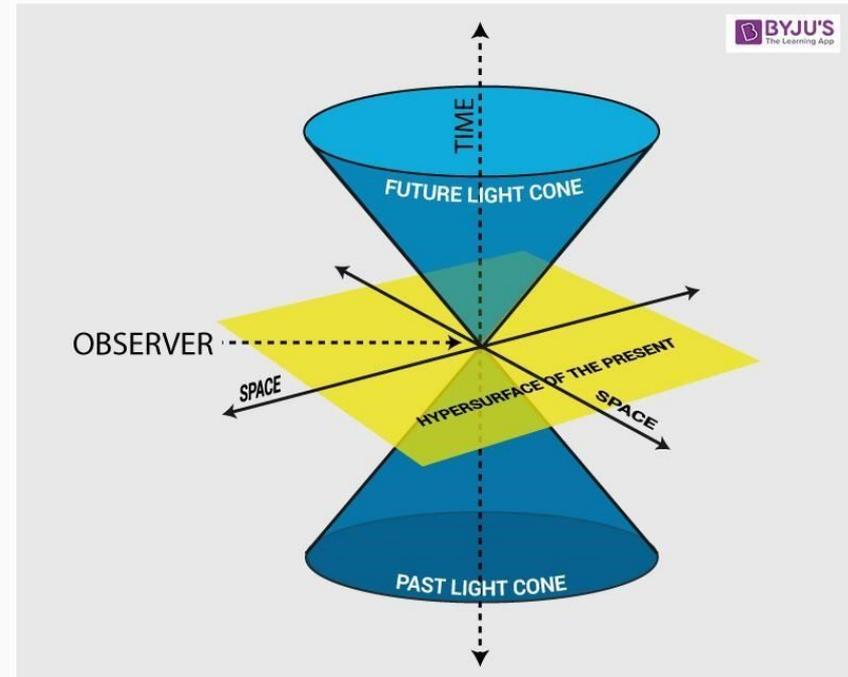
# Key concepts in Relativity

- The interval

Figure 3: The invariant space-time interval.

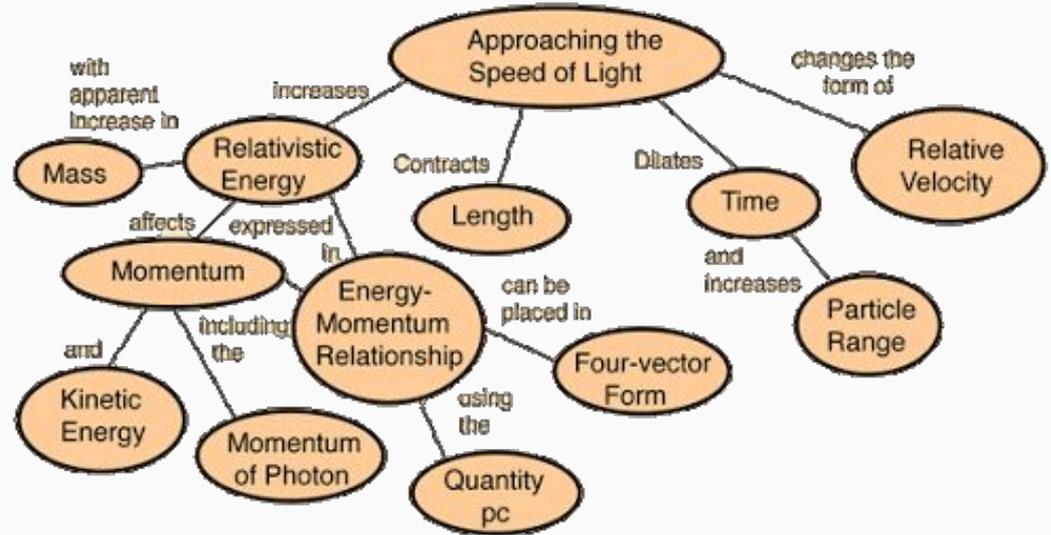
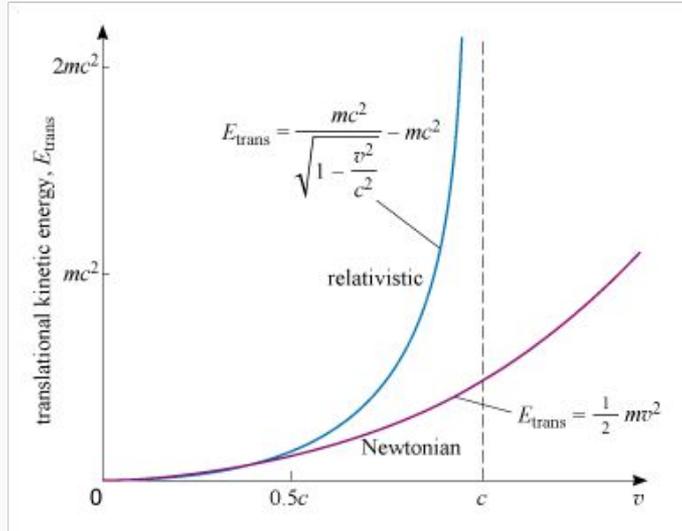


Motions can be represented as lengths spanning both space and time in a coordinate system. These lengths are called **SPACE-TIME INTERVALS**. Time can be considered to be yet another direction for arranging things. This suggests that the universe could be four dimensional. If the universe is truly four dimensional then space-time intervals would be invariant when things move.



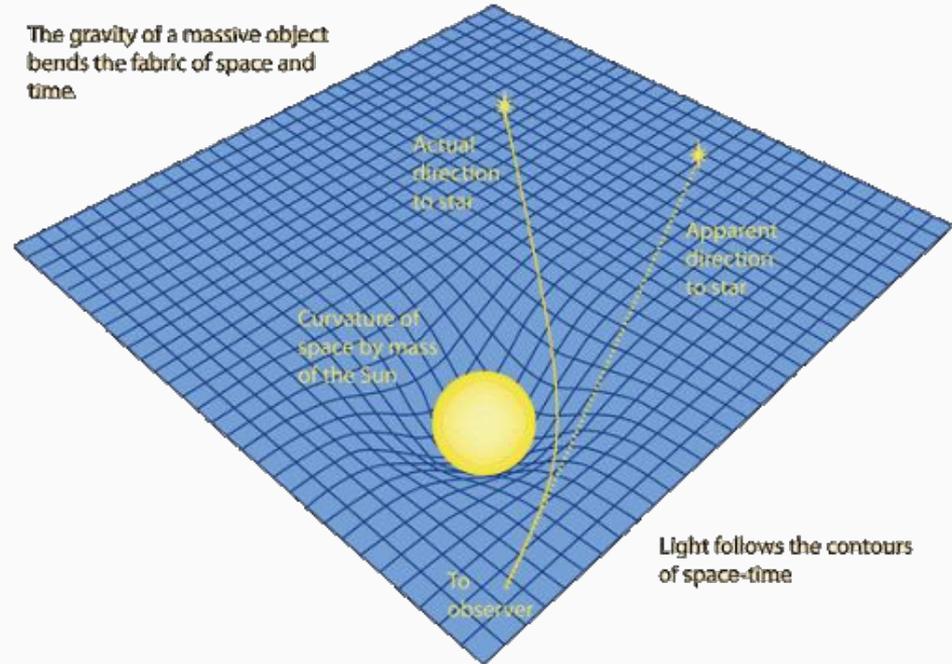
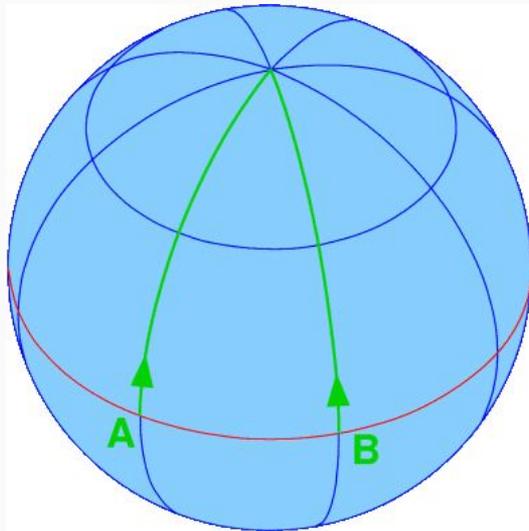
# Key concepts in Relativity

- Energy and mass



# Key concepts in General Relativity

- The space time
- The Fermat principle ...



# Example

<https://arxiv.org/pdf/1704.02058.pdf>

## Teaching Einsteinian Physics at Schools: Part 1, Models and Analogies for Relativity

Tejinder Kaur<sup>1</sup>, David Blair<sup>1</sup>, John Moschilla<sup>1</sup>, Warren Stannard<sup>1</sup> and Marjan Zadnik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*The University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley, WA 6009, Australia.*

E-mail: [tkaur868@gmail.com](mailto:tkaur868@gmail.com)

### Abstract

The Einstein-First project aims to change the paradigm of school science teaching through the introduction of modern Einsteinian concepts of space and time, gravity and quanta at an early age. These concepts are rarely taught to school students despite their central importance to modern science and technology. The key to implementing the Einstein-First curriculum is the development of appropriate models and analogies. This paper is the first part of a three-paper series. It presents the conceptual foundation of our approach, based on simple physical models and analogies, followed by a detailed description of the models and analogies used to teach concepts of general and special relativity. Two accompanying papers address the teaching of quantum physics (Part 2) and research outcomes (Part 3).

Keywords: Einsteinian physics, models, analogies, relativity, curriculum, Einstein-First.

## da LE INDICAZIONI NAZIONALI....

“Il percorso didattico comprenderà le conoscenze sviluppate nel XX secolo relative al microcosmo e al macrocosmo, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa ed energia. L'insegnante dovrà prestare attenzione a utilizzare un formalismo matematico accessibile agli studenti, ponendo sempre in evidenza i concetti fondanti.

**Lo studio della teoria della relatività ristretta di Einstein porterà lo studente a confrontarsi con la simultaneità degli eventi, la dilatazione dei tempi e la contrazione delle lunghezze; l'aver affrontato l'equivalenza massa-energia gli permetterà di sviluppare un'interpretazione energetica dei fenomeni nucleari (radioattività, fissione, fusione).”**

## LA RELATIVITÀ RISTRETTA NEI LIBRI DI TESTO

La *scaletta* della tradizione didattica *a la Resnick*

- Situazione di fine '800 (esperimento di Michelson-Morley)
- La relatività come la teoria che ha permesso di risolvere i problemi aperti di fine '800
- I postulati e le sue conseguenze (effetti relativistici)
- Prove sperimentali e applicazioni tecnologiche

**L'approccio di Resnick non è l'unico possibile  
ed è il risultato di precise scelte di tipo  
epistemologico e didattico**

### **Approccio di Resnick (1968)**

Approccio di tipo “storico” e di stampo empirista (l’esperimento come argomento principe per dare credibilità alla teoria)

Riferimento principale: l’approccio di Einstein (1905)

Linguaggio algebrico  
(basato sulle trasformazioni di Lorentz)

Enfasi sugli aspetti di continuità tra la dinamica relativistica e quella classica (SdR inerziali; massa-energia-quantità di moto)

### **Approccio di Taylor & Wheeler (1965)**

Approccio di tipo “a-storico” e di stampo razionalista (la coerenza logica come argomento principe per dare credibilità alla teoria)

Riferimento principale: l’approccio di Minkowski (1908)

Linguaggio geometrico  
(basato sulla geometria spaziotemporale di Minkowski)

Enfasi sugli aspetti di rottura della dinamica relativistica rispetto a quella classica e enfasi sulla continuità tra relatività ristretta e relatività generale. (SdR inerziali; massa-energia-quantità di moto)

**DAI POSTULATI  
AGLI  
EFFETTI RELATIVISTICI**

**La relatività della simultaneità  
La dilatazione del tempo  
La contrazione delle lunghezze**

**Possibili strade rispettose dell'approccio di Einstein ma diverse sul piano didattico:**

1. Algebrica: “introduzione” delle trasformazioni di Lorentz e deduzione formale degli effetti relativistici (Einstein, Resnick)
2. “Concettuale-immaginativa”: gli effetti relativistici come risultati di esperimenti mentali (il ruolo della luce nelle misure di spazio e tempo e il vincolo in natura dell'esistenza di una velocità limite e invariante)

## I due postulati

“Esempi di questo tipo, uniti ai tentativi falliti di rilevare un qualche movimento della Terra rispetto al “mezzo luminifero”, portano a ipotizzare che anche i fenomeni elettrodinamici, come quelli meccanici, non possiedano proprietà corrispondenti al concetto di quiete assoluta. Anzi, come già stato mostrato per quantità del prim'ordine, le stesse leggi dell'elettrodinamica e dell'ottica saranno valide per tutti i sistemi di coordinate nei quali valgono le equazioni della meccanica. **Eleveremo questa congettura (il cui contenuto, d'ora in poi, sarà chiamato “principio di relatività”) al rango di postulato;** introdurremo, inoltre, un altro postulato, solo all'apparenze incompatibile col precedente, cioè **che la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata  $V$ ,** indipendente dallo stato di moto del corpo che la emette.” (Einstein, 1905)

“Questo concetto [di “simultaneo”] non esiste per il fisico, finché non gli sia possibile scoprire se esso sia o non sia soddisfatto in un caso reale. Ci è necessaria, quindi, una definizione di simultaneità capace di fornirci i mezzi con i quali, nel caso concreto, si possa decidere mediante l’esperienza se entrambi i segnali luminosi avvengono simultaneamente. Finché questa condizione non è soddisfatta, io mi lascio ingannare, come fisico (e lo stesso vale anche se non sono un fisico), se ritengo di poter attribuire un significato alla nozione di simultaneità.”

Einstein, 1916, *Relatività: esposizione divulgativa e scritti classici su Spazio Geometria Fisica*, Bollati Boringhieri, Torino (ed. 1994).

## LA PROSPETTIVA “OPERAZIONISTA”

In generale, per concetto noi non intendiamo altro che un gruppo di operazioni [...]: Se il concetto è fisico, come nel caso della lunghezza, le operazioni sono effettivamente operazioni fisiche, cioè quelle mediante cui si misura la lunghezza”

Bridgman P.W., *La Logica della Fisica Moderna*, Boringhieri,  
1927

## Il dibattito su Spazio e tempo: sostanzialismo e relazionismo



Spazio e tempo intesi come oggetti  
fisici dotati di sostanzialità

*(contenitori)*

**'SPAZIO E TEMPO  
SOSTANZIALI'**

*Epicuro, Lucrezio*

**Newton**

*Minkowski*

*Wheeler*

Spazio e tempo intesi come costruzione della  
mente umana per "capire" il mondo naturale

*(insieme di relazioni formali)*

**'SPAZIO E TEMPO  
RELAZIONALI'**

*Aristotele*

*Cartesio, Leibniz, Mach*

**Einstein**, Poincaré

*Weinberg, Sciama*

## La prospettiva sostanzialista

*“[...] gli elementi di base o primitivi delle nostre teorie sono di due tipi: spazio-tempo e sua struttura geometrica; e campi materiali – distribuzioni di materia, carica, ecc. – che rappresentano i processi fisici e gli eventi che avvengono nello spazio-tempo. Le nostre teorie cercano di spiegare e prevedere le proprietà dei processi e degli eventi materiali mettendoli in relazione alla struttura geometrica entro cui sono ‘contenuti’. In questa trattazione noi prenderemo esplicitamente gli enti geometrici come primitivi e definiamo gli enti osservativi in termini di quelli.”*

(Friedman, 1983)

## L'operazionismo come scelta didattica

da Resnick: "Introduzione alla relatività ristretta"

La relatività dice semplicemente che il moto relativo degli eventi e dell'osservatore influenza il procedimento di misura degli intervalli di lunghezza e di tempo:

*"La relatività è una teoria della misura e il moto influenza le misure"*

### Aspetti caratterizzanti e pregi:

- la "concretezza" del dare **definizioni operative**;
- la semplicità del **linguaggio algebrico**;
- il fascino e il "potere persuasivo" degli **esperimenti mentali**;
- il piacere intellettuale di sovvertire il senso comune: il ruolo centrale degli **effetti relativistici**;
- Il fascino per la figura di **Einstein**.

## **Capire l'interpretazione operazionista: aspetti delicati**

- Frammentare l'esperienza in "eventi" misurabili;
- Rinunciare all'idea di spazio e tempo come contenitori "sciolti da tutto il resto e tra di loro";
- Abbandonare una visione "newtoniana" della realtà.



***Difficoltà cognitive (Posner et al., 1982)***

- Risuonare "epistemologicamente" con l'operazionismo.



***Perplexità epistemologiche  
Limiti disciplinari: la sottovalutazione del ruolo e del  
significato della geometria quadridimensionale***

## L'approccio "geometrico" come scelta didattica

Taylor e Wheeler: "La fisica dello spaziotempo"

Fabri: "Per un insegnamento moderno della Relatività"

### Aspetti caratterizzanti e pregi

- Eleganza del linguaggio **geometrico quadridimensionale**;
- Efficacia del potere di sintesi della geometria, evidenziando gli aspetti di **invarianza** (effetti relativistici come particolari proiezioni della realtà nel tempo e nello spazio);
- Potenzialità nel creare una forte **continuità tra la relatività ristretta e generale**

## **Capire l'interpretazione geometrica: aspetti delicati**

- rischio di astrattezza e di far prevalere gli aspetti formali rispetto a quelli fenomenologici;
- ipoteche nella comprensione dei testi che seguono un approccio "operazionista";
- rischio di "cortocircuiti" che impediscono di sottolineare gli aspetti di rottura della RR



***Difficoltà cognitive***

- Risuonare epistemologicamente con l'approccio geometrico



***Perplessità epistemologiche verso visioni "assolute"***

## Dalle interpretazioni alle proposte didattiche

*Tradizioni  
didattiche*

“operazionista”

“geometrica”



*Radici storiche*

Einstein, 1905  
“Sull’ elettrodinamica  
dei corpi in  
movimento”

Minkowski, 1908  
“Spazio e tempo”

*Concezioni di  
spazio (e tempo)  
presupposte*

“spazio e tempo come  
relazioni tra eventi o  
oggetti”

“spazio-tempo  
come contenitore”

## Implicazioni per l'insegnamento

### *La molteplicità degli approcci per "comprendere"*

*"L'uso di una molteplicità di approcci può rappresentare uno strumento potente per affrontare concezioni sbagliate, preconcetti e stereotipi degli studenti. Finché un concetto o un problema verrà affrontato da un'unica prospettiva o da un solo punto di vista, quasi certamente gli studenti se ne faranno un'idea quanto mai rigida e limitata. Al contrario, adottare nei confronti di un fenomeno tutta una gamma di atteggiamenti diversi vorrà dire incoraggiare lo studente a conoscere quel fenomeno da diversi punti di vista, a mettere a punto una molteplicità di rappresentazioni e a cercare di metterle in rapporto tra loro"*

(Gardner H. (1991), *Educare al comprendere*, Feltrinelli, Milano.)

Dipartimento di Fisica

# La relatività ristretta ai tempi del COVID-19

V. BOLOGNA, A. FRONTINO CRISAFULLI, F. LONGO\*, G. TURRI

\* [francesco.longo@ts.infn.it](mailto:francesco.longo@ts.infn.it)

<https://www.sif.it/attivita/congresso/106/inviti/sezione7>

# La motivazione della ricerca

## *L'insegnamento della Fisica*

- Molti argomenti compressi in poco tempo
- Utilizzo dei libri di testo
- Carenza di esercizi 'a step'
- Come realizzare il laboratorio?

## *La necessità di una integrazione disciplinare*

- La pregnanza del linguaggio matematico
- Non solo formule ...
- Il legame con la realtà fisica
- Saper passare da un linguaggio ad un altro ..  
Non solo "vocabolario" ...
- Esempi non "fantascientifici" ..

# I testi storici

QUANDO LA FISICA PARLAVA TEDESCO

(ALCUNE MEMORIE DI UN'EPOCA)

**S.Antoci, 2003**

Relatività ed elettromagnetismo

1

A. Einstein, L'elettrodinamica dei corpi in movimento, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Ann. d. Phys. **17**, 891-921 (1905).

3

tradotte da Salvatore Antoci  
ricercatore del C.N.R. presso l'Unità I.N.F.M. di Pavia

Hermann Minkowski

## Space and Time

Minkowski's Papers on Relativity

Translated by Fritz Lewertoff and Vesselin Petkov

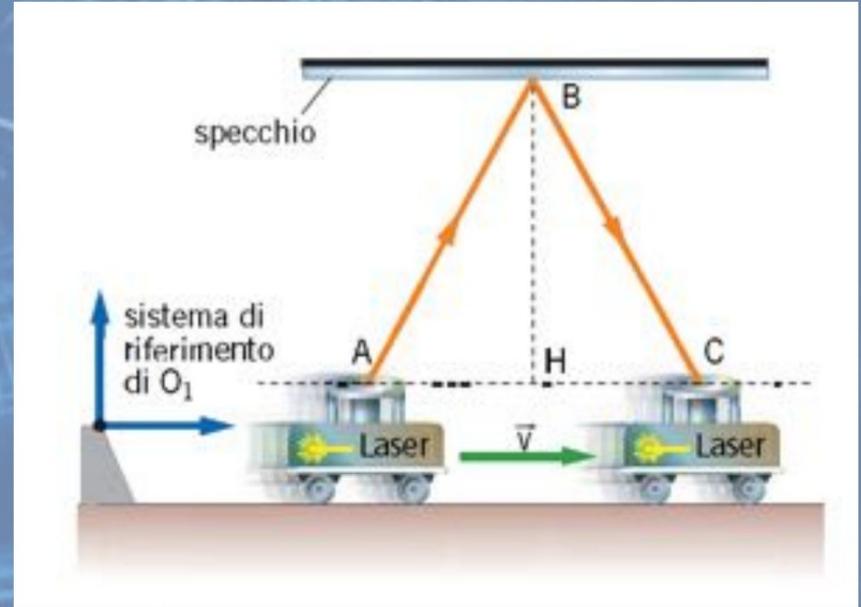
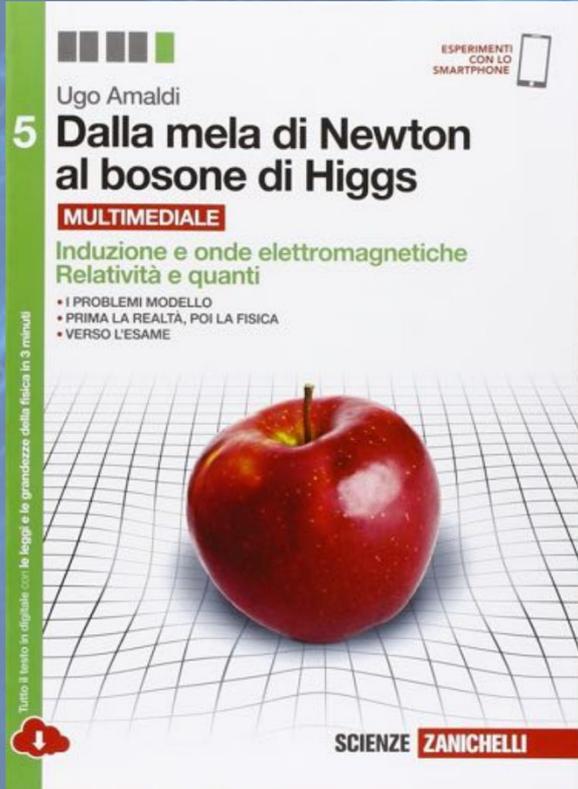
Edited by Vesselin Petkov

Free version

**2012**

<https://www.sif.it/attivita/congresso/106/inviti/sezione7>

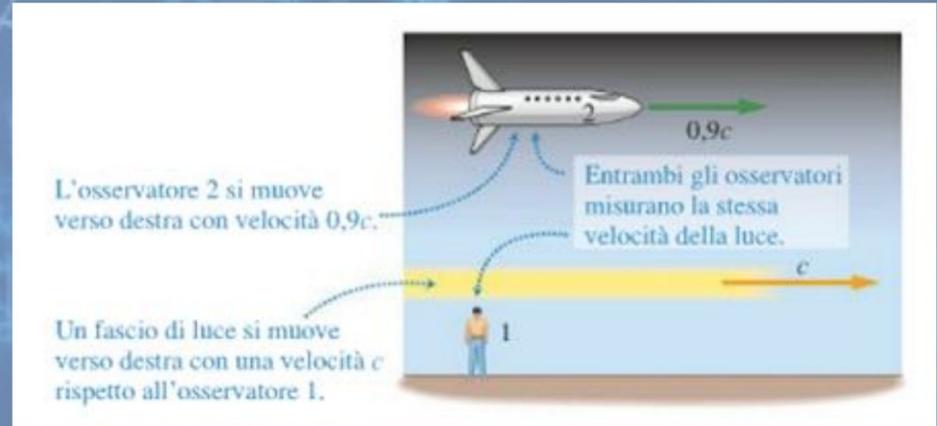
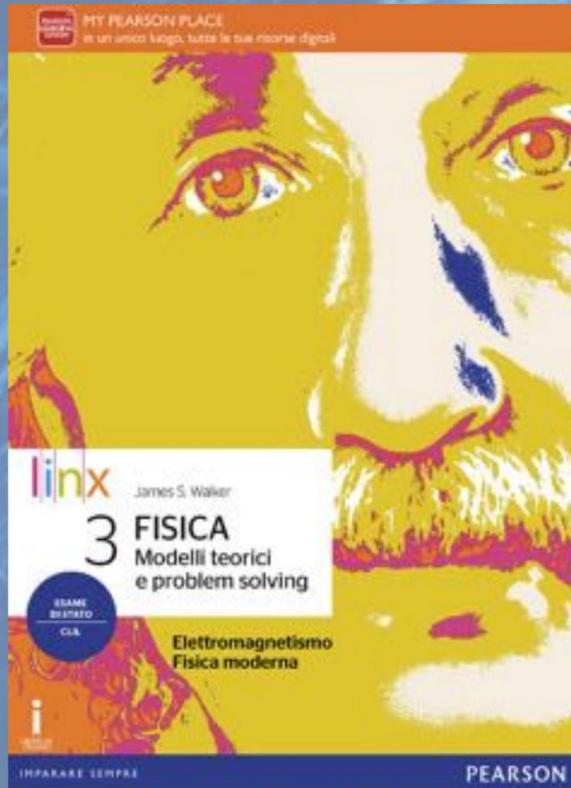
# La relatività nei libri di testo



<https://www.sif.it/attivita/congresso/106/inviti/sezione7>

*U. Amaldi, Dalla mela di Newton al Bosone di Higgs, 2016*

# La relatività nei libri di testo



<https://www.sif.it/attivita/congresso/106/inviti/sezione7>

*J.S.Walker, Fisica. Modelli teorici e problem solving, 2018*

# Il problema delle *grandezze proprie*

## *Tempo proprio*

Intervallo di tempo tra due eventi misurati da un osservatore che li vede accadere nello stesso luogo

## *Lunghezza propria*

Distanza tra due punti misurata da un osservatore che li vede fermi

Conferiscono validità alle leggi di dilatazione del tempo e di contrazione delle lunghezze:

- La misura di un intervallo di tempo è dilatata di un fattore  $\gamma$  solo rispetto al tempo proprio
- La misura di una lunghezza è contratta di un fattore  $\gamma$  solo rispetto alla lunghezza propria

Nei libri di testo:

- Le leggi vengono espresse prescindendo dalle grandezze proprie e ricavate in contesti particolari
- Notazione di tipo circostanziale e riferita agli osservatori
- Le grandezze proprie vengono trattate in maniera qualitativa
- Non vengono riformulate le leggi mediante notazione adeguata per caratterizzare le grandezze proprie

# Il percorso didattico

- Valutare la risposta degli studenti davanti ai cambiamenti concettuali che la teoria della relatività ristretta impone;
- Sondare l'efficacia didattica dell'approccio tradizionale alla Resnick e quindi valutarne vantaggi e limiti;
- Individuare le difficoltà degli studenti davanti ai concetti di sistema di riferimento e osservatore;
- Migliorare gli approcci didattici alle nozioni di tempo proprio e lunghezza propria;
- Analizzare le strategie di problem solving adottate da studenti che si confrontano con esercizi riguardanti la dilatazione del tempo, la contrazione delle lunghezze e la composizione relativistica delle velocità;
- Indagare sulla possibilità di svolgere un percorso interdisciplinare tra matematica e fisica nell'ambito della relatività ristretta;
- Sperimentare l'efficacia di strumenti online per la didattica a distanza nell'ambito dell'insegnamento della fisica.

«Nessun altro problema scientifico ci affascina più di quello della natura dello spazio e del tempo. È normale che sia così, perché questi due concetti formano il palcoscenico su cui si dipana la trama del cosmo. L'intera nostra esistenza, tutto ciò che facciamo, pensiamo e proviamo, si verifica in una determinata regione dello spazio in un determinato intervallo di tempo; eppure la scienza non è ancora riuscita a svelare che cosa siano con esattezza spazio e tempo: **sono due entità fisiche reali o semplicemente utili semplificazioni concettuali?**».

(B. Greene, La trama del cosmo, 2004)

# **Student understanding of time in special relativity: simultaneity and reference frames**

Rachel E. Scherr, Peter S. Shaffer, and Stamatis Vokos  
Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA

This article reports on an investigation of student understanding of the concept of time in special relativity. A series of research tasks are discussed that illustrate, step-by-step, how student reasoning of fundamental concepts of relativity was probed. The results indicate that after standard instruction students at all academic levels have serious difficulties with the relativity of simultaneity and with the role of observers in inertial reference frames. Evidence is presented that suggests many students construct a conceptual framework in which the ideas of absolute simultaneity and the relativity of simultaneity harmoniously co-exist.



[Home](#) > [American Journal of Physics](#) > [Volume 84, Issue 5](#) > [10.1119/1.4938057](#)



Open . Published Online: 20 April 2016 Accepted: November 2015

## Visualizing relativity: The OpenRelativity project

American Journal of Physics **84**, 369 (2016); <https://doi.org/10.1119/1.4938057>

Zachary W. Sherin, Ryan Cheu<sup>a)</sup>, and Philip Tan

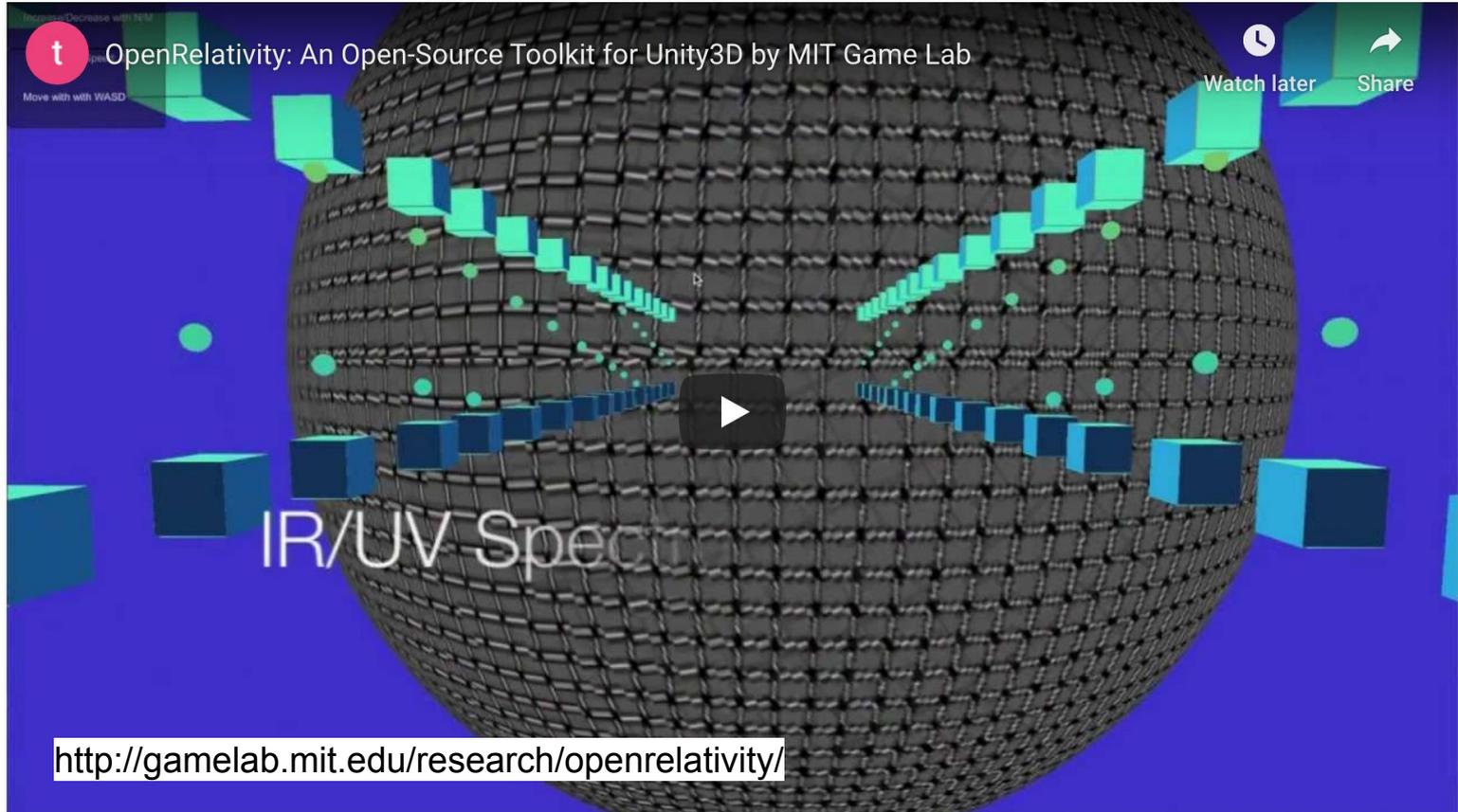
• Game Lab, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

Gerd Kortemeyer<sup>b)</sup>

more...

# OpenRelativity

2012-2013: Gerd Kortemeyer, Philip Tan, Zach Sherin, Ryan Cheu, Steven Schirra & Sonny Sidhu



OpenRelativity: An Open-Source Toolkit for Unity3D by MIT Game Lab



Watch later



Share



IR/UV Spec

<http://gamelab.mit.edu/research/openrelativity/>

Relativity visualized

# Space Time Travel

[Next](#) [Prev](#) [Home](#)

## Visualization of the theory of relativity.

Online papers, images, movies and paper models by [Ute Kraus](#) and [Corvin Zahn](#) (Institut für Physik, Universität Hildesheim, Germany).

This is an English version of the German site

[www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de](http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de)

## Relativity visualized

The theory of relativity holds a certain fascination for many people. At the same time it is often regarded as very abstract and difficult to understand.

Part of the difficulties in understanding relativity are due to the fact that relativistic effects contradict everyday experience. Motion, for example, is a familiar process and everybody "knows from experience" that it entails neither time dilation nor length contraction. A flight with half the speed of light could correct this misjudgement but is not on offer.

A possible alternative are simulations. Images, films and virtual reality let us in a sense experience relativistic flights, gravitational collapse, compact objects and other extreme conditions.

<https://www.spacetime travel.org/>

# General relativity in upper secondary school: Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction

Magdalena Kersting,<sup>\*</sup> Ellen Karoline Henriksen, Maria Vetleseter Bøe, and Carl Angell

*Department of Physics, University of Oslo, P.O. Box 1048 Blindern, 0316 Oslo, Norway*



(Received 27 September 2017; revised manuscript received 3 April 2018; published 25 May 2018)

Because of its abstract nature, Albert Einstein's theory of general relativity is rarely present in school physics curricula. Although the educational community has started to investigate ways of bringing general relativity to classrooms, field-tested educational material is rare. Employing the model of educational reconstruction, we present a collaborative online learning environment that was introduced to final year students (18–19 years old) in six Norwegian upper secondary physics classrooms. Design-based research methods guided the development of the learning resources, which were based on a sociocultural view of learning and a historical-philosophical approach to teaching general relativity. To characterize students' learning from and interaction with the learning environment we analyzed focus group interviews and students' oral and written responses to assigned problems and discussion tasks. Our findings show how design choices on different levels can support or hinder understanding of general relativity, leading to the formulation of design principles that help to foster qualitative understanding and encourage collaborative learning. The results indicate that upper secondary students can obtain a qualitative understanding of general relativity when provided with appropriately designed learning resources and sufficient scaffolding of learning through interaction with teacher and peers.

TABLE I. Science content structure: Key features of general relativity.

---

---

Conceptual foundation	<p>The principle of equivalence:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- In small enough regions of spacetime, the laws of physics reduce to those of special relativity. In particular, this implies that locally there is no way to distinguish between the effect of a gravitational field and of being in a uniformly accelerated reference frame.</li></ul> <p>Reference frames and the principle of relativity:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- One can only define inertial frames locally.</li><li>- An inertial system is defined as a system in free fall.</li><li>- All reference frames are equivalent to formulate the laws of physics.</li></ul> <p>Spacetime and curvature:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Gravity is not a force, but a manifestation of the curvature of spacetime.</li><li>- Energy and momentum influence spacetime to create curvature.</li><li>- Free particles move in straight paths in curved spacetime.</li></ul>
Relativistic phenomena	<p>Gravitational bending of light:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Massive objects deflect light.</li></ul> <p>Gravitational red shift:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- The frequency of light is influenced by gravity.</li><li>- Light that moves away from a massive body is redshifted.</li></ul> <p>Gravitational time dilation:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- A gravitational field influences the rate at which time passes.</li><li>- The farther a clock is away from a source of gravitation, the faster the time passes.</li></ul>

---

---

TABLE II. Students' learning challenges in GR according to the literature.

General challenges	Specific challenges
GR builds on an advanced level of mathematics.	Students struggle with the definition of reference and inertial frames.
GR requires a lot of background knowledge, in particular special relativity.	Students struggle with the role of observers in different reference frames.
Students have no direct experience of relativistic phenomena.	Students struggle to apply the principle of equivalence.
The nature of relativistic phenomena seems to be counterintuitive to learners.	Students cannot connect the equality of inertial and gravitational mass to the principle of equivalence and generally fail to see the difference between inertial and gravitational mass.
Preexisting ideas stemming from classical physics hinder understanding of GR.	Students take the Euclidean nature of our universe for granted.
Students struggle to accept the implications of GR even when they have understood the basic principles of the theory.	

TABLE III. GR content structure for instruction specified by learning goals.

Content	Learning goals
Introduction	<p>Describe general relativity as a new theory of gravity.</p> <p>Explain how the fact that Newton's force of gravity acts instantaneously contradicts Einstein's claim that nothing can move faster than the speed of light.</p>
The principle of equivalence	<p>Use the fact that locally it is impossible to distinguish between a gravitational field and a uniform acceleration and/or between free fall and the absence of a gravitational field to explain how acceleration and gravity are equivalent phenomena.</p>
Reference frames and principle of relativity	<p>Describe an inertial reference frame as a reference frame in free fall.</p> <p>Explain that the laws of physics take the same form in all reference frames.</p>
Relativistic phenomena (bending of light, gravitational redshift, time dilation)	<p>Give examples of phenomena that are predicted by GR but not by Newton's theory of gravity.</p> <p>Describe how light travelling through the gravitational field of the sun is deflected and use the principle of equivalence to explain why this is predicted by GR.</p> <p>Describe how time goes slower close to massive objects and use the principle of equivalence to explain why this is predicted by GR.</p> <p>Explain how light that moves away from a gravitational source is redshifted and light that moves towards a gravitational source is blueshifted.</p>
Spacetime and curvature	<p>Explain how general relativity is a theory describing the relationship between space, time, and gravity.</p> <p>Describe our universe as having three spatial and one temporal dimension.</p> <p>Explain that gravity is not a force, but a geometric phenomenon.</p> <p>Describe how mass curves spacetime and how curvature influences the movement of mass.</p>