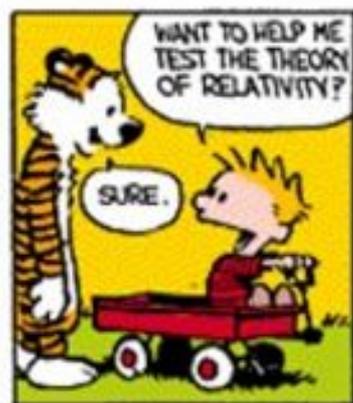

Physics Education

Laboratory

Lecture 21

PCK for Special (and General) Relativity and Modern Physics

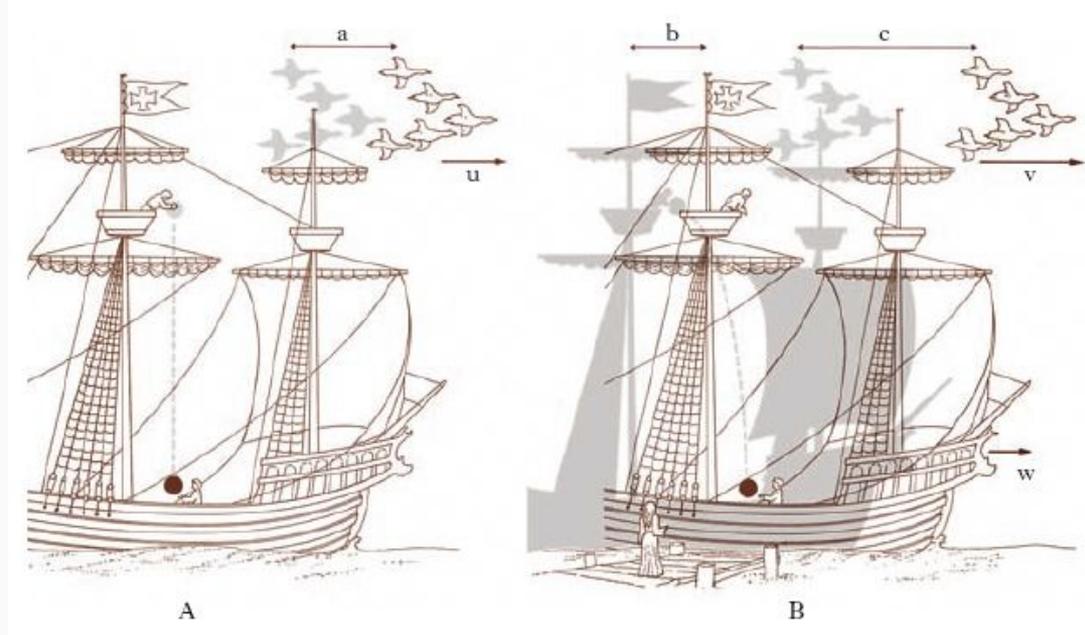
Francesco Longo • 22/12/2020



© 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

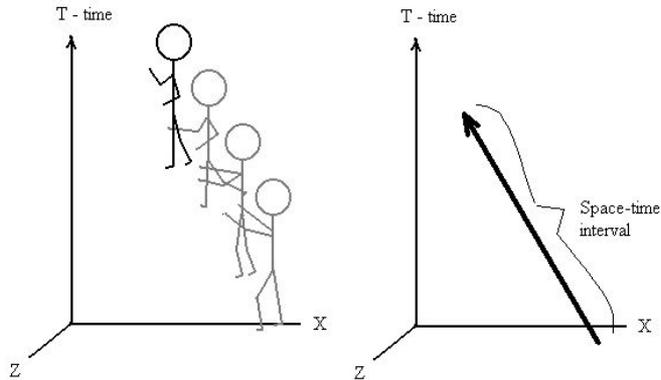
Postulates of Special Relativity

- 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.

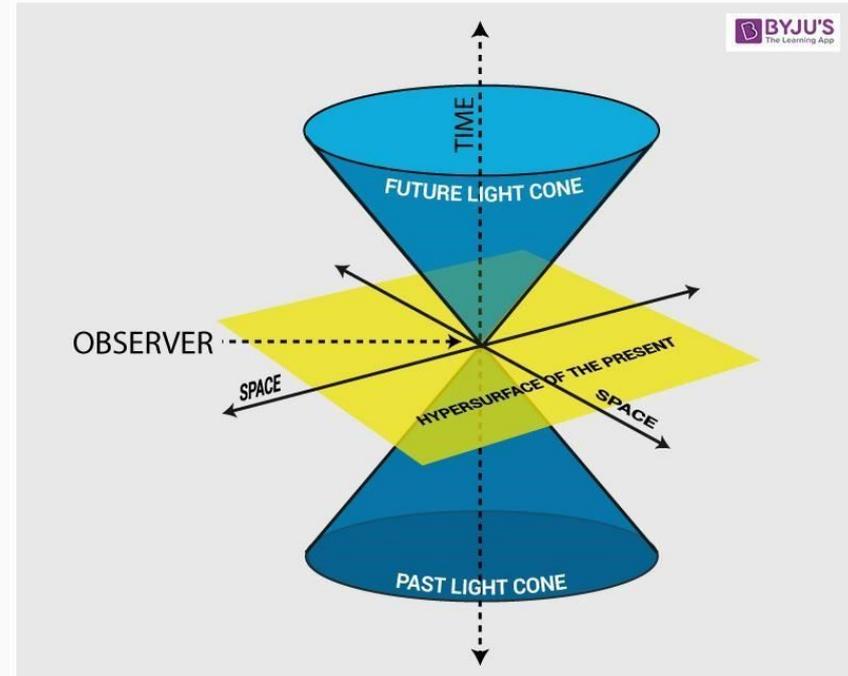
Key concepts in Relativity

- The interval

Figure 3: The invariant space-time interval.

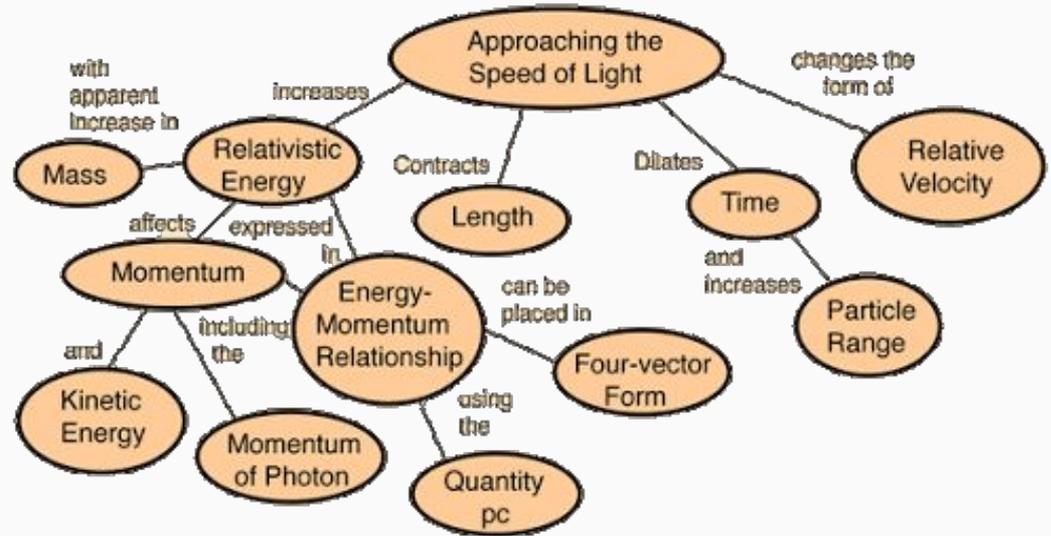
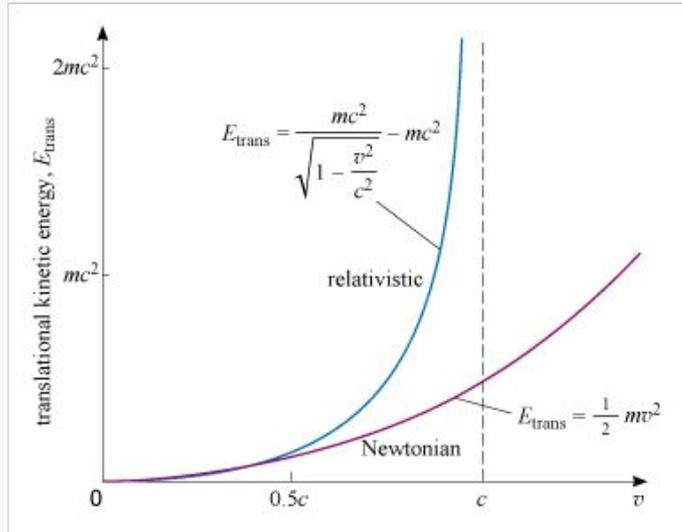


Motions can be represented as lengths spanning both space and time in a coordinate system. These lengths are called **SPACE-TIME INTERVALS**. Time can be considered to be yet another direction for arranging things. This suggests that the universe could be four dimensional. If the universe is truly four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



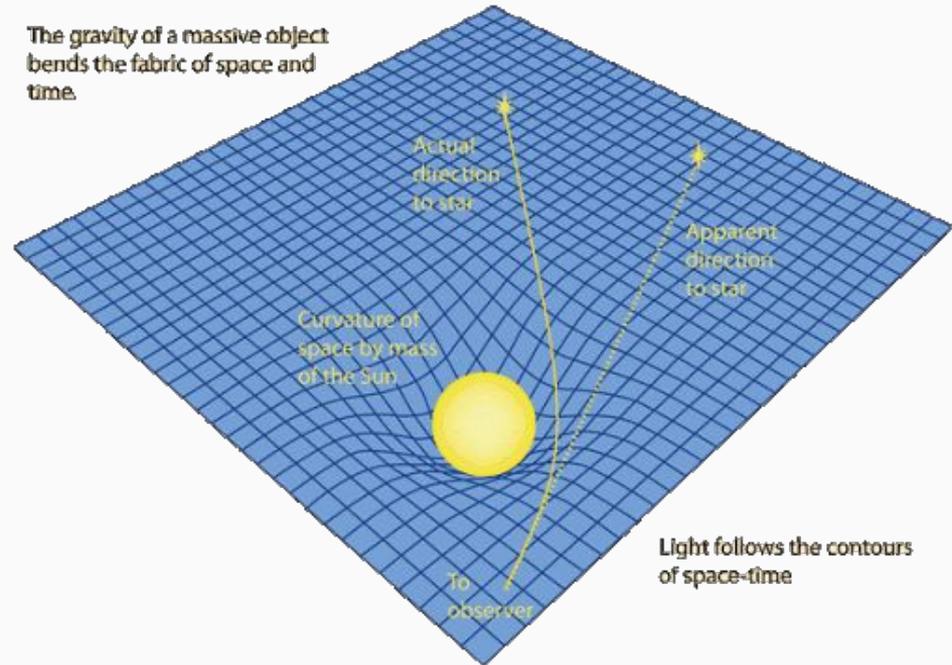
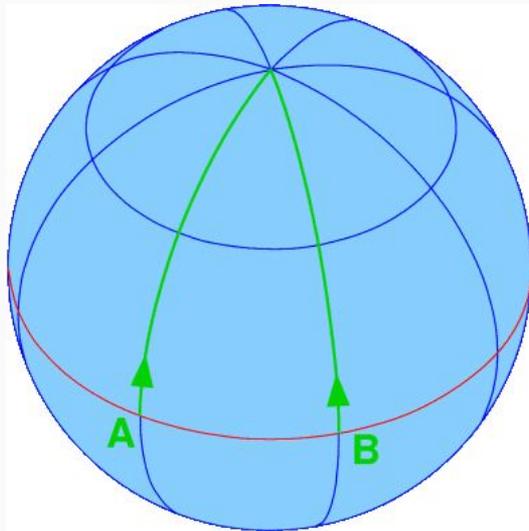
Key concepts in Relativity

- Energy and mass



Key concepts in General Relativity

- The space time
- The Fermat principle ...



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

Tejinder Kaur¹, David Blair¹, John Moschilla¹, Warren Stannard¹ and Marjan Zadnik¹

¹*The University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley, WA 6009, Australia.*

E-mail: 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.

Example

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

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

Scaletta

Pluralità di analisi di un tipico libro di testo con diversi criteri:

- "occhio piccolo –occhio grande" (analisi di comprensione interna del testo)
- Lenti della ricerca in Didattica della fisica (e quelle della storia – la memoria di Einstein; analisi da fuori)
- Lenti delle grandi domande di senso (quale contributo ha dato la relatività ristretta al dibattito sui concetti di spazio e tempo in fisica? - analisi da fuori)

Un aspetto critico/curioso

Nel corso degli anni la tradizione didattica ha progressivamente “asciugato e semplificato” la trattazione originale di Einstein.

La ricerca in Didattica della Fisica ha mostrato quanto tali “semplificazioni” abbiano snaturato l’approccio, non solo impoverendone il significato e la portata culturale, ma anche rendendolo “intrinsecamente incomprensibile” (la perdita di *dettagli critici* - Viennot).

**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)

I DUE POSTULATI
E
IL PROBLEMA DI CONFRONTARE
LE MISURE EFFETTUATE DA OSSERVATORI SITUATI IN DIVERSI
SISTEMI DI RIFERIMENTO INERZIALI

Problema

E' possibile confrontare misure di intervalli temporali e
lunghezze effettuate in diversi Sistemi di Riferimento
Inerziali?

accettando le definizioni operative date di tempo e di lunghezza
e
applicando i due principi della RR
è possibile
ma
“le misure non coincidono”

**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)

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)

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

Minkowski, 1908

“Sull’ elettrodinamica
dei corpi in
movimento”

“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

<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

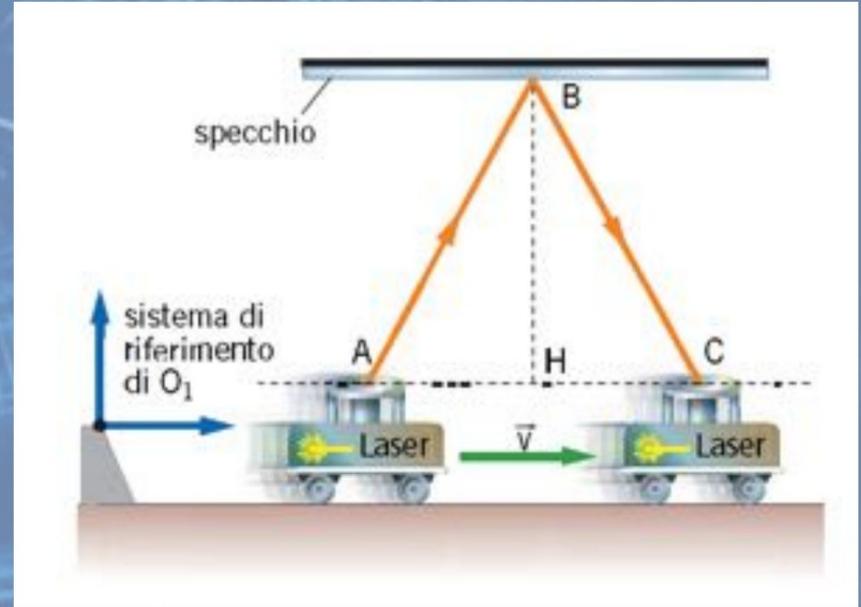
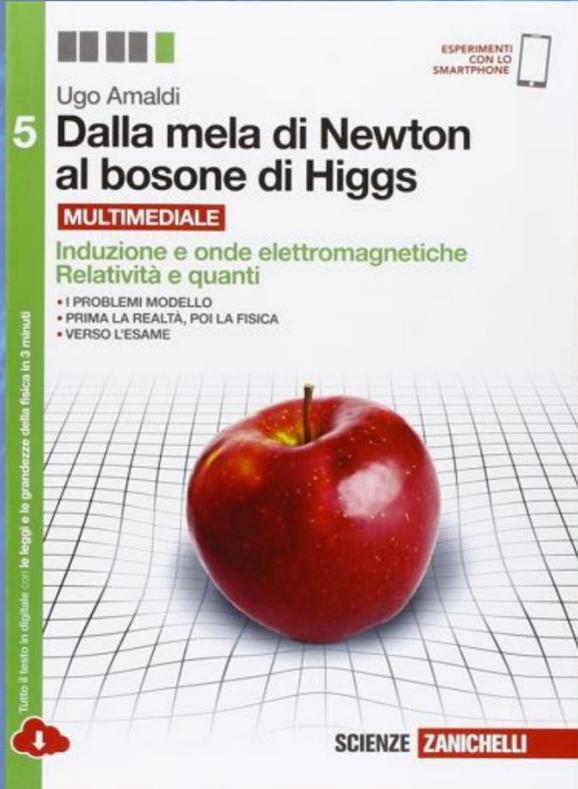
Edited by Vesselin Petkov

Free version

2012

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

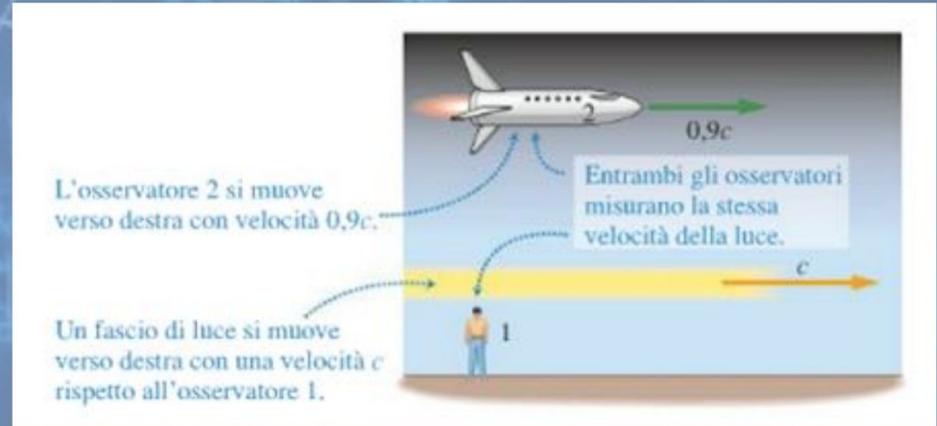
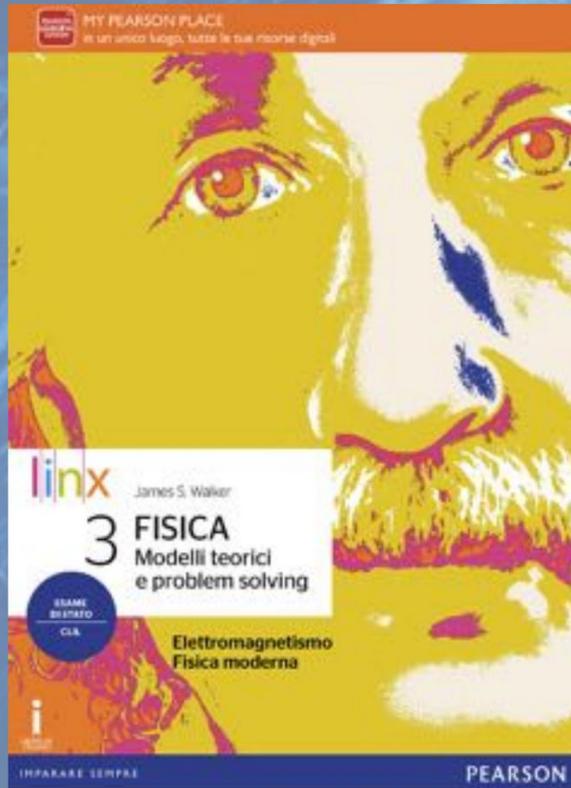
La relatività nei libri di testo



<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 γ solo rispetto al tempo proprio
- La misura di una lunghezza è contratta di un fattore γ 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.

PRIMA PARTE (introduzione alla relatività)
<https://teacher.desmos.com/activitybuilder/custom/5e6fb26adf6ec40af800f6c7>

SECONDA PARTE (la dilatazione dei tempi)
<https://teacher.desmos.com/activitybuilder/custom/5e7b671044315b0bbee44414>

TERZA PARTE (la contrazione delle lunghezze e la composizione delle velocità)

<https://teacher.desmos.com/activitybuilder/custom/5e84b3057a7a9f0c3d1b6d0c>

<https://forms.gle/WgJ9xoMcYncHThrx7>

Esercizio 1. Un'astronave che si allontana dalla Terra alla velocità di $0,75c$ lancia una sonda nella direzione opposta al suo moto, cioè verso la Terra.

- a. Per un osservatore sull'astronave il lancio della sonda dura 10 s. La durata del lancio della sonda misurata da un osservatore sulla Terra sarà minore, maggiore o uguale? Calcola il suo valore.
- b. La velocità della sonda rispetto all'astronave è di $0,40c$. Qual è la velocità della sonda rispetto alla Terra?
- c. La lunghezza propria della sonda lungo la direzione del suo moto è 13 m. La lunghezza della sonda misurata da un osservatore sulla Terra sarà minore, maggiore o uguale? Calcola il suo valore.

Esercizio 2. (*Esame di stato sessione ordinaria 2019*)

In laboratorio si sta osservando il moto di una particella che si muove nel verso positivo dell'asse x di un sistema di riferimento ad esso solidale. All'istante iniziale, la particella si trova nell'origine e in un intervallo di tempo di 2,0 ns percorre una distanza di 25 cm. Una navicella passa con velocità $v = 0,80c$ lungo la direzione x del laboratorio, nel verso positivo, e da essa si osserva il moto della stessa particella.

- Determinare le velocità medie della particella nei due sistemi di riferimento.
- Quale intervallo di tempo e quale distanza misurerebbe un osservatore posto sulla navicella?

Esercizio 3. (Esame di stato sessione suppletiva 2019)

Consideriamo un'astronave in moto che viaggia rispetto alla terra a velocità $v = 0,90c$. A bordo dell'astronave c'è una scatola di dimensioni $a = 40$ cm, $b = 50$ cm e $h = 20$ cm, con il lato b disposto parallelamente alla direzione del moto dell'astronave.

- Per un osservatore posto sulla terra, che volume avrà la scatola?
- Se l'astronauta lancia la scatola con una velocità $v_x = 0,50 c$ nella direzione del moto dell'astronave, quale velocità misura l'osservatore sulla terra?

<https://docs.google.com/document/d/1cFcAlZpMmssc0GDL8zBTRiZW8MPfrSWqyItWXRtdBzs/edit?usp=sharing>

LET'S TRY !!!

- Elaborate a series of Lectures on Special relativity following the “Wheeler” approach
- Find the needed math knowledge to introduce the subject
- Discuss the possible misconceptions arising from such lectures and how to avoid them ...
- Discuss the conceptual change required to appreciate the topics
- Discuss the relations with other topics ...
- Propose an assessment ...

«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.