

---

# Physics Education

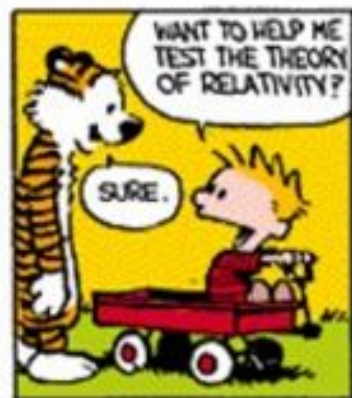
## Laboratory

### Lecture 17

#### Content Knowledge for Special (and General) Relativity

Francesco Longo • 18/12/2023

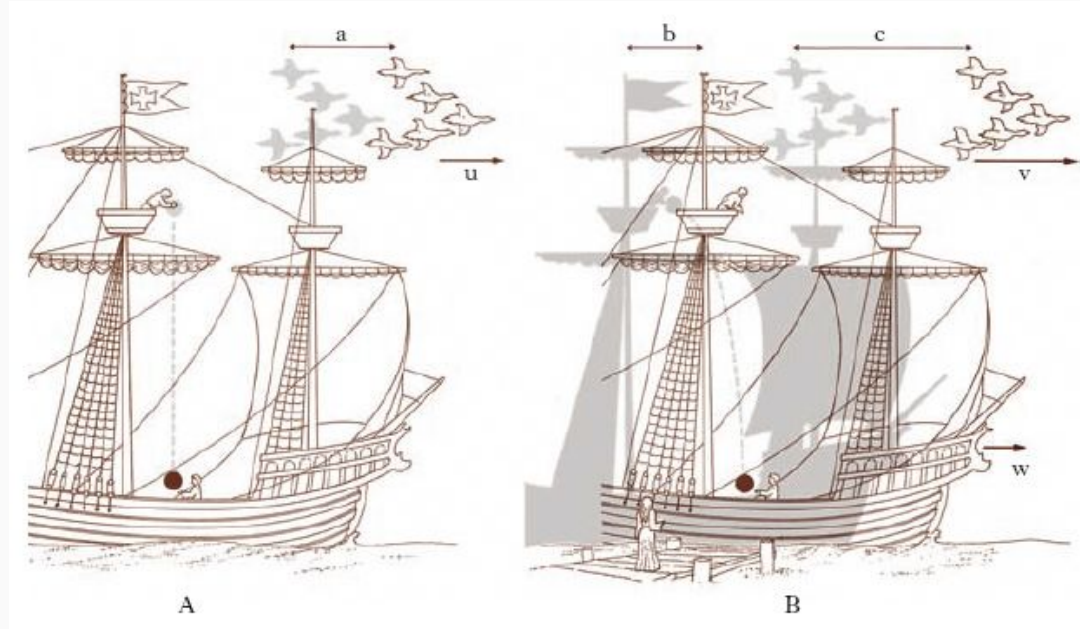
---



© 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

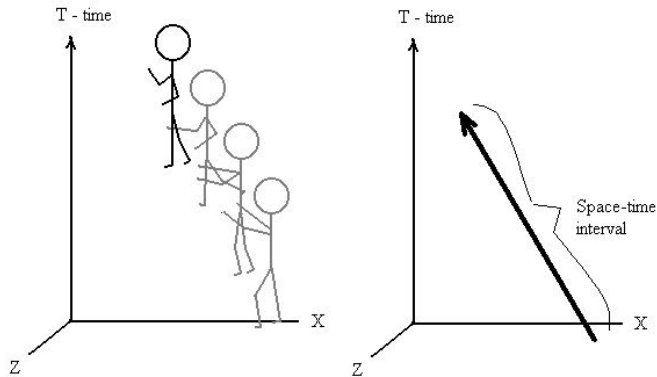
## Postulates of Special Relativity

- 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.

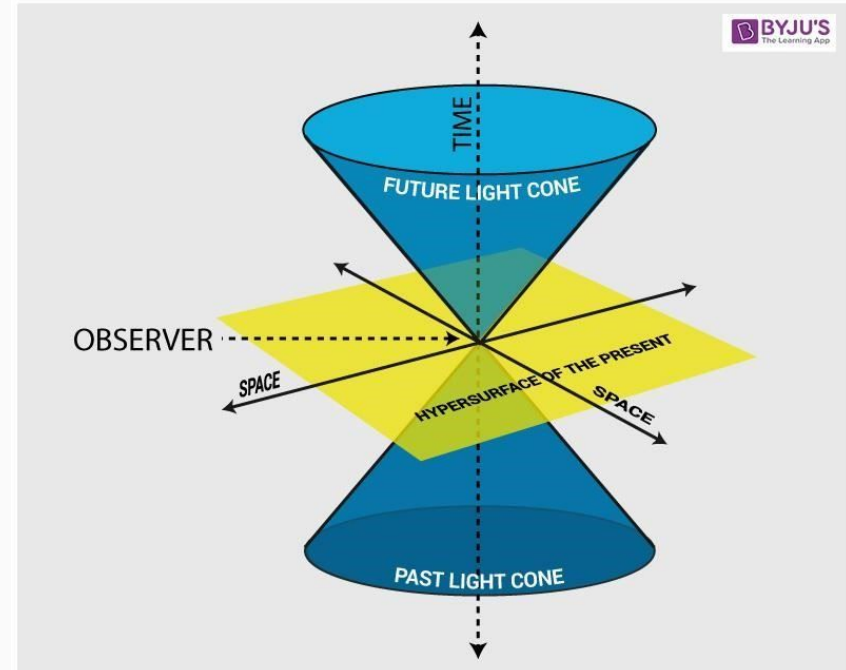
# Key concepts in Relativity

- The interval

Figure 3: The invariant space-time interval.

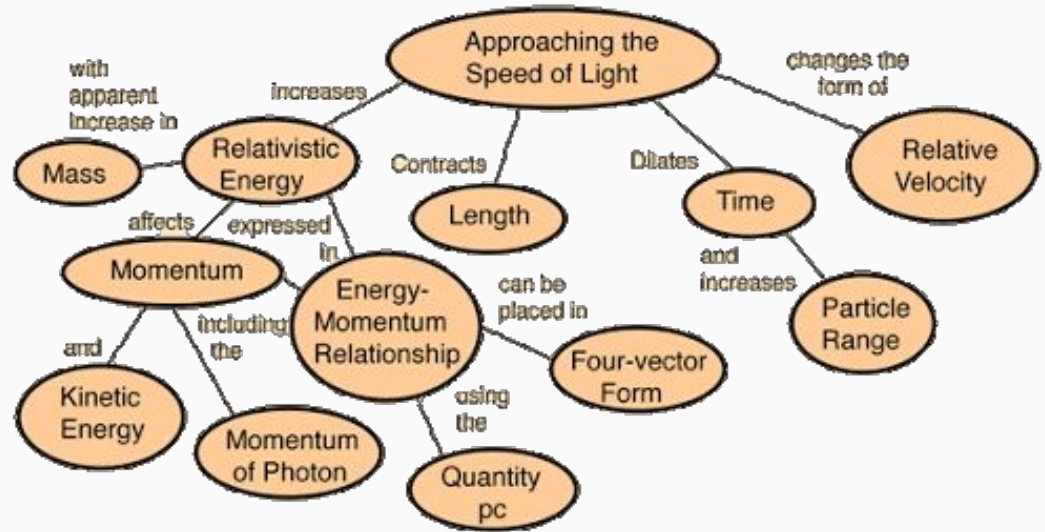
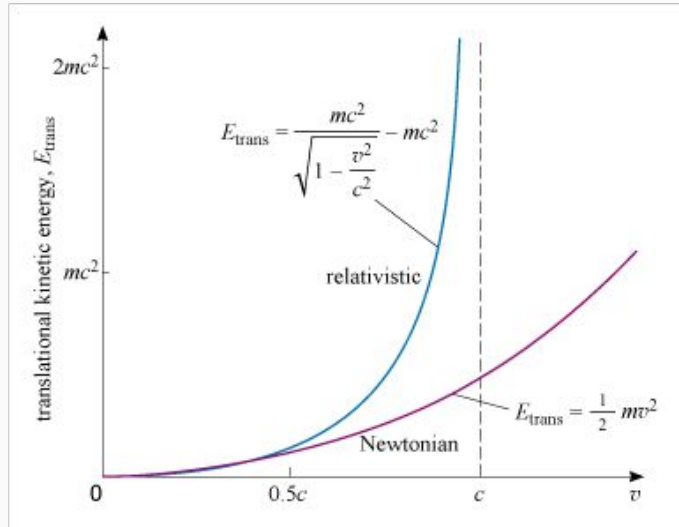


Motions can be represented as lengths spanning both space and time in a coordinate system. These lengths are called **SPACE-TIME INTERVALS**. Time can be considered to be yet another direction for arranging things. This suggests that the universe could be four dimensional. If the universe is truly four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



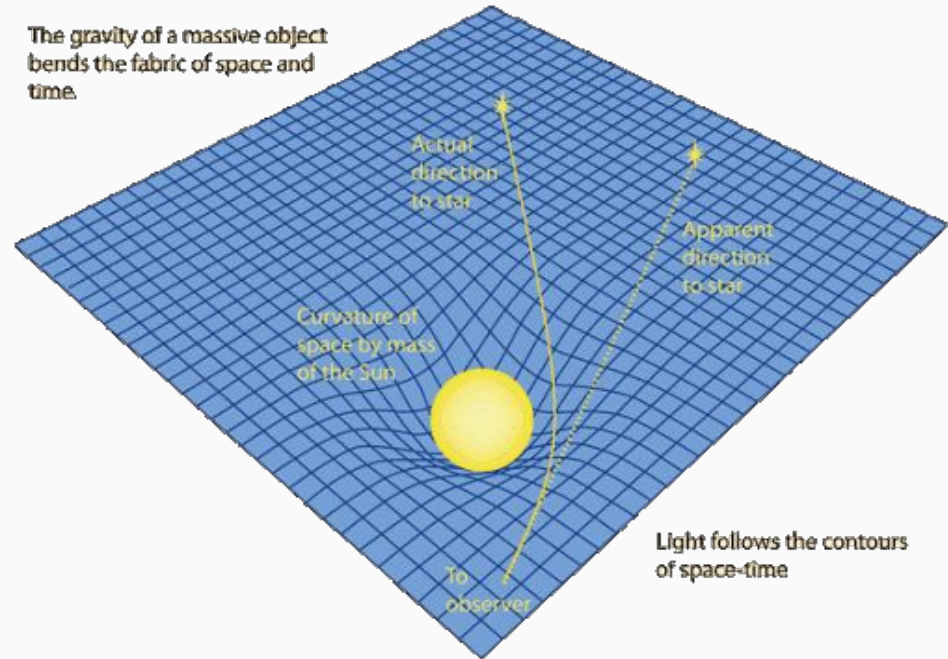
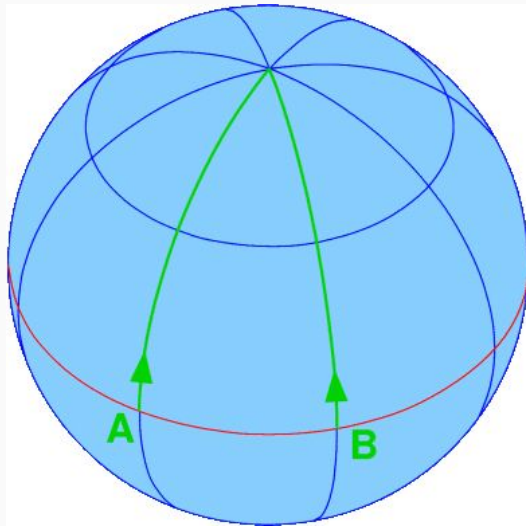
# Key concepts in Relativity

- 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

## 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)

## 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

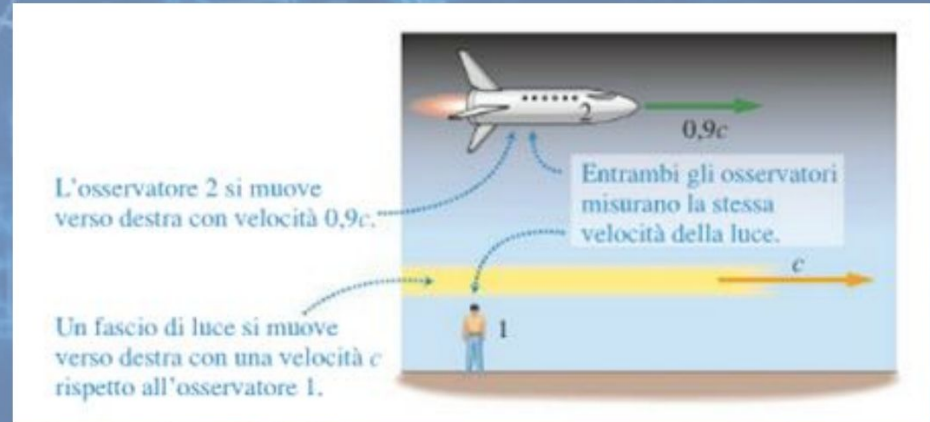
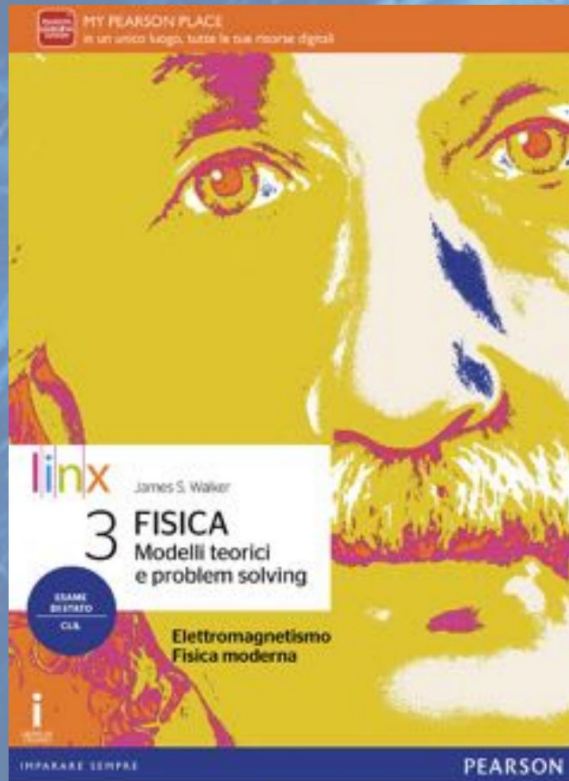
Free version

**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>

*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.

PRIMA PARTE (introduzione alla relatività)

<https://student.desmos.com/join/2g9bey>

SECONDA PARTE (la dilatazione dei tempi)

<https://student.desmos.com/join/4jmuee>

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

<https://student.desmos.com/join/u3ygem>

# New developments ...

- 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.





[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

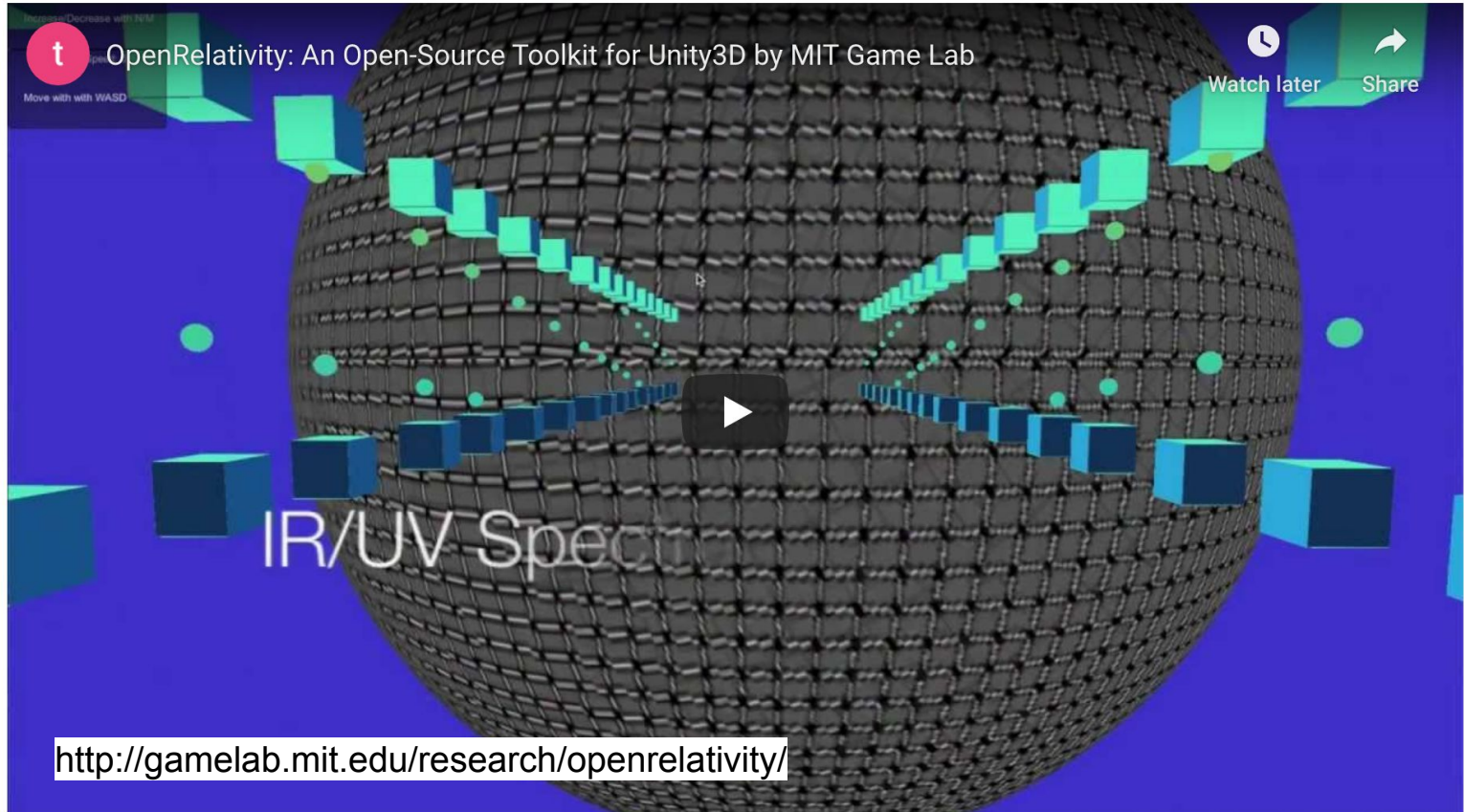
• Game Lab, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

Gerd Kortemeyer<sup>b)</sup>

more...

# OpenRelativity

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



<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/>

# 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>

TABLE IV. Design hypotheses for design of learning resources.

Design hypotheses	
DH1	Students can grasp central ideas in GR qualitatively without advanced mathematics by relying on geometric ideas.
DH2	Thought experiments, analogies and visualizations of relativistic phenomena foster understanding in GR.
DH3	Emphasizing the break of relativistic with classical physics helps students to overcome their classical preconceptions.
DH4	Recalling background knowledge in special relativity allows students to align relativistic ideas from special relativity with general relativity.
DH5	Linking abstract topics to students' everyday life motivates and fosters understanding in GR.
DH6	Students are generally motivated by topics in relativistic physics, such as black holes and spacetime.
DH7	Use of language and talking physics facilitates understanding of abstract concepts in GR.
DH8	Students are interested in the historical development of GR and its philosophical implications.



TABLE V. Empirically based design principles for learning resources in GR.

---

---

Basic principles and specific features

---

1. Emphasize how GR relates to and sometimes breaks with classical physics.
    - (a) Present the need for a new theory of gravity by showing that special relativity and classical mechanics are irreconcilable.
    - (b) Present relativistic phenomena such as gravitational bending of light and time dilation to show that GR extends the scope of classical physics.
    - (c) Point out how the definition of inertial frames in GR differs from similar notions in special relativity and classical mechanics. Ask students to apply the abstract definition of an inertial frame to specific problems.
    - (d) Show that there exist concepts in GR that are NOT relative, such as the notion of inertial reference frames, to help students connect relativistic ideas to their classical understanding of physics.
  2. Link key concepts of GR to students' life worlds to counteract the lack of experience with relativistic phenomena.
    - (a) Use everyday examples to illustrate relativistic ideas and to enable students to connect GR to their everyday life. GPS technology can exemplify gravitational time dilation and the geometry of world maps can illustrate motion in curved spaces.
    - (b) Use thought experiments as educational tools to help students understand abstract concepts in GR. Thought experiments that illustrate free fall and weightlessness are particularly successful when explaining the principle of equivalence.
    - (c) Use analogies with caution. State shortcomings of analogies explicitly to prevent the formation of misconceptions. In particular, explain how the rubber sheet analogy oversimplifies the notion of curved spacetime.
    - (d) Use visualizations in the form of digital simulations and animations to introduce students to relativistic concepts and to prevent the formation of misconceptions.
  3. Draw on students' prevailing motivation and interest to introduce key concepts in GR.
    - (a) Use astronomical phenomena to engage students. Gravitational lensing around black holes can illustrate gravitational bending of light and curvature of spacetime. Thought experiments involving spaceships can illustrate the principle of equivalence.
    - (b) Present GR in light of its historical development. The solar eclipse in 1919 can serve as historical example for an experimental verification of GR. Relate Einstein's quest to find a new theory of gravity to abstract descriptions of GR.
    - (c) Emphasize epistemological aspects of GR and explain how Einstein's new interpretation of space, time, and gravity has shaped our worldview.
    - (d) Present GR as an active field of research by referring to the recent observation of gravitational waves.
  4. Invite students to use written and oral language to facilitate understanding of abstract concepts in GR.
    - (a) Give students the opportunity to "talk physic" with their peers by using discussion tasks that probe conceptual understanding of key concepts in GR.
    - (b) Ask students to summarize their understanding of key concepts in written exercises to let them practice the use of new physics vocabulary.
    - (c) Use plenary discussions guided by the teacher to consolidate understanding of GR and resolve misconceptions.
    - (d) Explain that our qualitative understanding of GR can be made rigorous by employing advanced mathematics.
- 
-

# Modeling instruction

## Modeling Instruction and 21st Century Learning Skills

AMERICAN MODELING TEACHERS ASSOCIATION



### Critical Thinking

- Information & Discovery
- Interpretation & Analysis
- Reasoning
- Problem Solving

### Creativity

- Idea Generation
- Idea Design & Refinement
- Openness & Courage to Explore
- Work Creatively with Others



### Collaboration

- Cooperation
- Responsibility & Productivity
- Construct Feedback
- Leadership & Initiative

### Communication

- Effective Listening
- Deliver Oral Presentations
- Engage in Conversations & Discussions
- Support an Argument with Claims



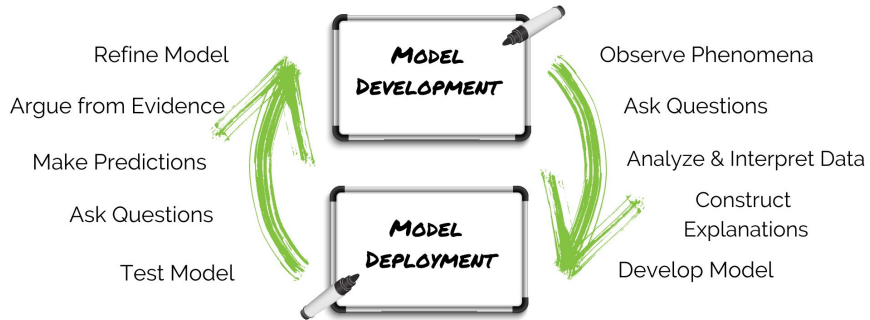
# Modeling Instruction



<https://youtu.be/nVnoGKLmApU>

# Modeling instruction

## Modeling Cycle



American Modeling Teachers Association  
[www.modelinginstruction.org](http://www.modelinginstruction.org)

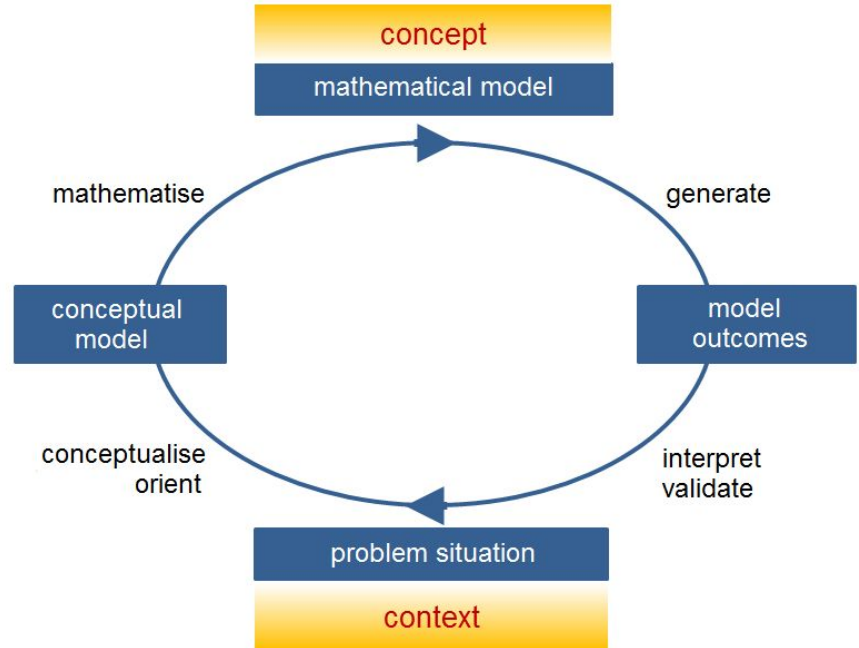


Table I. Comparison of content in Modeling Instruction and a more standard course.

Modeling Instruction	Standard course
Models are constructs that are built in accordance with physical laws and constraints.	Laws are given in equation form and applied to solve problems.
Models are built by the application of representational tools which can then be used to solve problems.	Problem solving is primarily quantitative manipulation of equations.
Models are temporal and must be validated, refined and applied.	Content is permanent; validation has already taken place.
General models are applied to specific physical situations.	Laws apply to specific situations.
Modeling is a process that is learned through accumulating experience.	Problem solving is a game that requires tricks and is learned by solving large numbers of problems.
Models are distinct from the phenomena they represent and can include causal, descriptive, and predictive elements.	Content is indistinguishable from the phenomena.

Table II. Standard Modeling Instructional cycle applied to the development of a general constant acceleration model.

Step	Instructional goal	Example student activity
Introduction and Representation	Phenomenology—initiates the need for a new model (accelerated motion is not explained by general constant velocity model.) Introduction of kinematic graphs as useful representation.	Experimentation involving students moving with constant acceleration in front of motion detectors.
Coordination of Representations	Relate kinematic graphs to other common representations (motion maps).	Experimentation and conceptual activities.
Application	Begin to apply knowledge and tools. Develop experience, heuristics, and ability to draw conclusions based on representations.	Develop kinematic equations from kinematic graphs by analyzing velocity versus time graphs. Problem solving emphasizing use of modeling tools.
Abstraction and Generalization	Identify characteristics of representations in situations involving constant acceleration.	Review of constant acceleration and guided discussion.
Continued Incremental Development	Relate constant acceleration model to dynamical models and apply to new situations.	Continually revisit constant acceleration model, coordinate with energy and forces, apply to electricity and magnetism.

Un concetto scientifico può essere utilizzato per caratterizzare un dato fenomeno fisico, nonché per sviluppare nuovi costrutti.

L'espressione include la sua identificazione, simboli, etichette, raffigurazioni matematiche e l'insieme della semantica corrispondente per interpretare le varie forme.

