



berdan
Liceo Scientifico TS



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

Sommario

La relatività nelle Indicazioni Nazionali

L'importanza di ripartire da un approccio storico

Il percorso progettato

L'analisi del percorso

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" ..

Le Indicazioni Nazionali (Liceo Scientifico)

LINEE GENERALI E COMPETENZE

Al termine del percorso liceale lo studente avrà appreso i concetti fondamentali della fisica, le leggi e le teorie che li esplicitano, acquisendo consapevolezza del valore conoscitivo della disciplina e del nesso tra lo sviluppo della conoscenza fisica ed il contesto storico e filosofico in cui essa si è sviluppata.

In particolare, lo studente avrà acquisito le seguenti competenze: osservare e identificare fenomeni; formulare ipotesi esplicative utilizzando modelli, analogie e leggi; formalizzare un problema di fisica e applicare gli strumenti matematici e disciplinari rilevanti per la sua risoluzione; fare esperienza e rendere ragione del significato dei vari aspetti del metodo sperimentale, dove l'esperimento è inteso come interrogazione ragionata dei fenomeni naturali, scelta delle variabili significative, raccolta e analisi critica dei dati e dell'affidabilità di un processo di misura, costruzione e/o validazione di modelli; comprendere e valutare le scelte scientifiche e tecnologiche che interessano la società in cui vive.

La libertà, la competenza e la sensibilità dell'insegnante – che valuterà di volta in volta il percorso didattico più adeguato alla singola classe – svolgeranno un ruolo fondamentale nel trovare un raccordo con altri insegnamenti (in particolare con quelli di matematica, scienze, storia e filosofia) e nel promuovere collaborazioni tra la sua Istituzione scolastica e Università, enti di ricerca, musei della scienza e mondo del lavoro, soprattutto a vantaggio degli studenti degli ultimi due anni.

La relatività nelle Indicazioni Nazionali (Liceo Scientifico)

SECONDO BIENNIO

Nel secondo biennio il percorso didattico darà maggior rilievo all'impianto teorico (le leggi della fisica) e alla sintesi formale (strumenti e modelli matematici), con l'obiettivo di formulare e risolvere problemi più impegnativi, tratti anche dall'esperienza quotidiana, sottolineando la natura quantitativa e predittiva delle leggi fisiche. Inoltre, l'attività sperimentale consentirà allo studente di discutere e costruire concetti, progettare e condurre osservazioni e misure, confrontare esperimenti e teorie.

Saranno riprese le leggi del moto, affiancandole alla discussione dei sistemi di riferimento inerziali e non inerziali e del principio di relatività di Galilei.

L'approfondimento del principio di conservazione dell'energia meccanica, applicato anche al moto dei fluidi e l'affronto degli altri principi di conservazione, permetteranno allo studente di rileggere i fenomeni meccanici mediante grandezze diverse e di estenderne lo studio ai sistemi di corpi. Con lo studio della gravitazione, dalle leggi di Keplero alla sintesi newtoniana, lo studente approfondirà, anche in rapporto con la storia e la filosofia, il dibattito del XVI e XVII secolo sui sistemi cosmologici.

La relatività nelle Indicazioni Nazionali (Liceo Scientifico)

QUINTO ANNO

Lo studente completerà lo studio dell'elettromagnetismo con l'induzione magnetica e le sue applicazioni, per giungere, privilegiando gli aspetti concettuali, alla sintesi costituita dalle equazioni di Maxwell. Lo studente affronterà anche lo studio delle onde elettromagnetiche, della loro produzione e propagazione, dei loro effetti e delle loro applicazioni nelle varie bande di frequenza.

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).

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

Albert Einstein: l'*Elettrodinamica dei corpi in movimento* (1905)

I postulati

di «relatività»

di invarianza della
velocità della luce



Le definizioni operative

Misure pure di tempo
e spazio

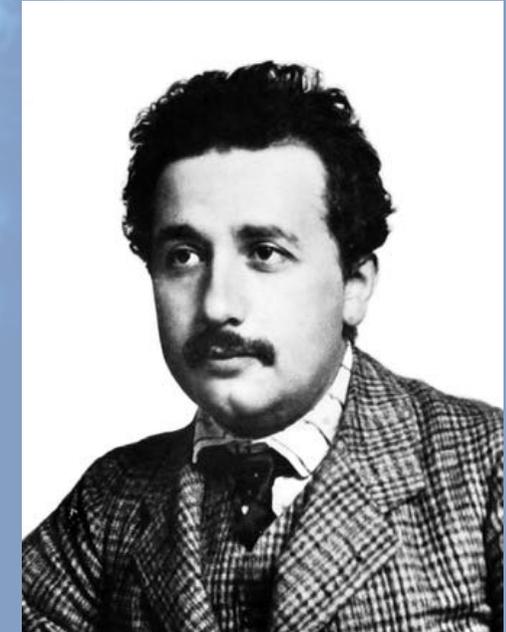
- tempo di un evento in corrispondenza dell'osservatore
- lunghezza di un'asta ferma

Misure ibride
spaziotemporali

- tempo di eventi distanti («reticolo di orologi sincroni»)
- lunghezza di un'asta in movimento

Effetti «relativistici»

- Trasformazioni di coordinate spaziali e temporali
- Relatività della simultaneità
- Dilatazione del tempo
- Contrazione delle lunghezze



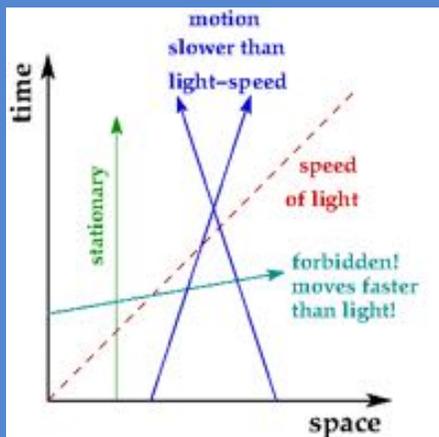
Hermann Minkowski: *Spazio e Tempo* (1908)

Spazio-tempo quadridimensionale

Evento come *punto di mondo* di coordinate spazio-temporali (x, y, z, t)



Evoluzione nello spazio e nel tempo come *linea di mondo* in diagrammi spazio-tempo



Gruppi di simmetria

Gruppo delle *trasformazioni di Lorentz* preserva le leggi fisiche

$$x' = \gamma(x - \beta ct) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \gamma\left(t - \frac{\beta}{c}x\right)$$



Effetti «relativistici»

Le interpretazioni della teoria

L'operazionismo di Einstein

- Spazio e tempo come pure misure (*empirismo*)
- Spazio e tempo indipendenti tra loro ma correlati nelle operazioni di misura
- Effetti relativistici come conseguenza di procedimenti di misura differenti da parte di osservatori diversi: spazio e tempo dipendono dall'osservatore

O.Levrini (1999)

Il sostanzialismo di Minkowski

- Spazio e tempo come concetti collegati e dipendenti tra loro
- Spazio e tempo come proiezioni di un'unica realtà spazio-temporale reale e indipendente da ogni osservatore
- Effetti relativistici come conseguenza di separare gli eventi nelle loro componenti spaziali e temporali: le leggi della fisica sono le stesse per tutti gli osservatori (*postulato del mondo assoluto*)

La relatività ristretta nella tradizione didattica

*La prospettiva OPERAZIONISTA
(R. Resnick, Introduction to Special Relativity,
1968)*

- Interpretazione einsteiniana
- Approccio storico e empirista
- Argomentazioni mediante esperimenti
- Linguaggio algebrico delle definizioni operative
- Trattazione focalizzata sul ruolo dell'osservatore e sugli effetti relativistici

*La prospettiva GEOMETRICA
(E.F. Taylor, J.A. Wheeler, Spacetime Physics,
1965)*

- Interpretazione minkowskiana
- Approccio a-storico e matematico
- Argomentazioni mediante coerenza logica
- Linguaggio geometrico dei diagrammi spazio-tempo
- Trattazione focalizzata sulle proprietà di invarianza delle leggi della fisica (*Same laws for all*)

O.Levrini (1999)

La relatività ristretta nella scuola italiana

Favoriti interpretazione einsteiniana e approccio operazionista



Scaletta «alla Resnick» (es. U. Amaldi, Dalla mela di Newton al Bosone di Higgs, 2016)

- Background storico
- Postulati di Einstein
- Effetti relativistici (relatività della simultaneità, dilatazione del tempo e contrazione delle lunghezze)

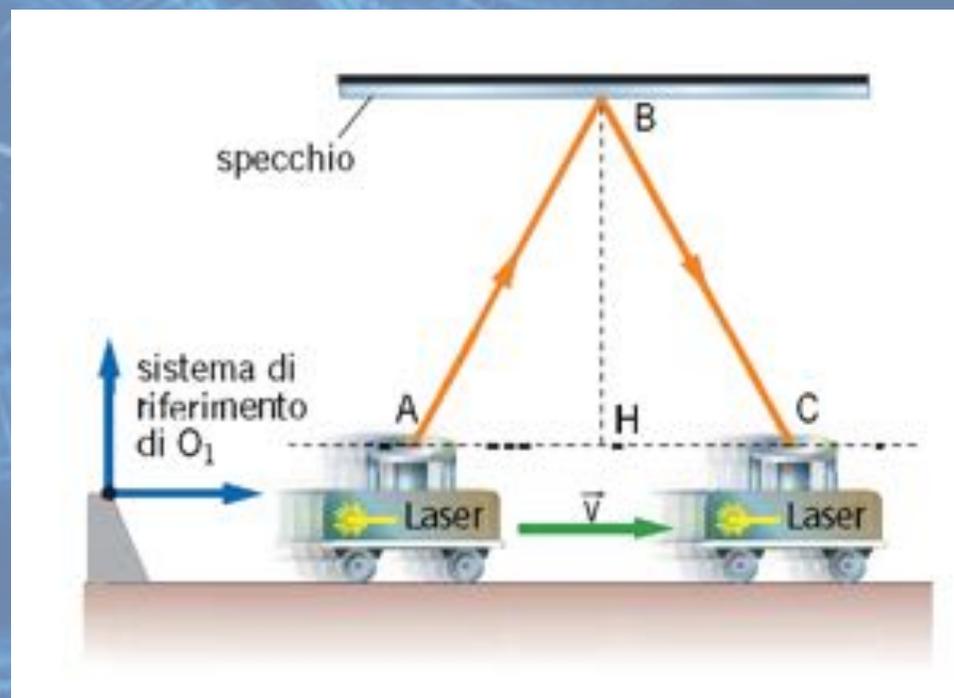
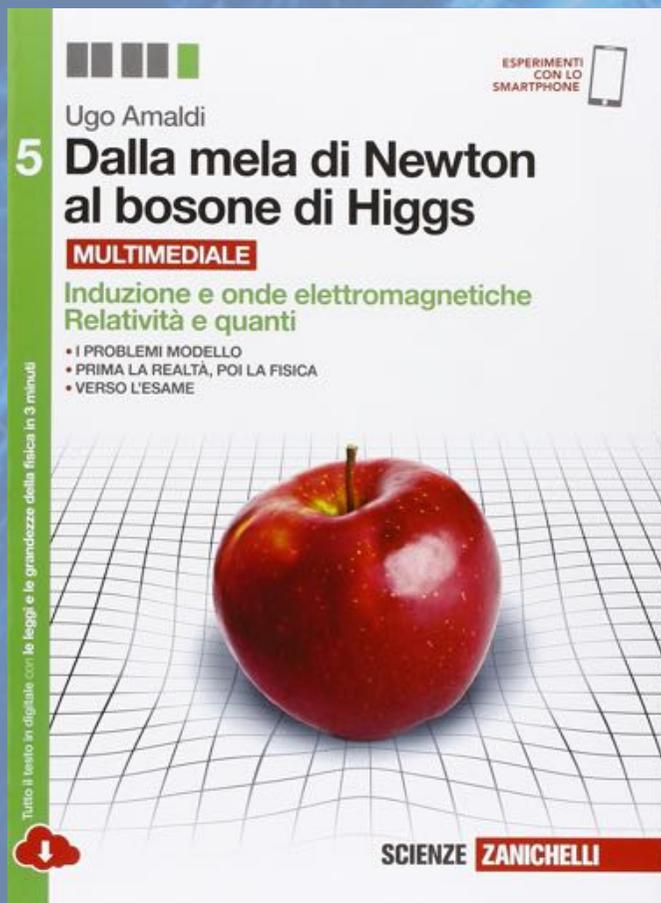


Processo di de-personalizzazione

- Mancanza di adeguate definizioni operative
- Largo spazio dedicato all'*etere* e a esperimenti correlati
- Focalizzazione sugli effetti relativistici nell'ambito di esperimenti mentali e situazioni irrealistiche
- Poco riguardo alla natura dello spazio-tempo (trasformazioni di Lorentz, coordinate spazio-temporali, diagrammi di Minkowski)

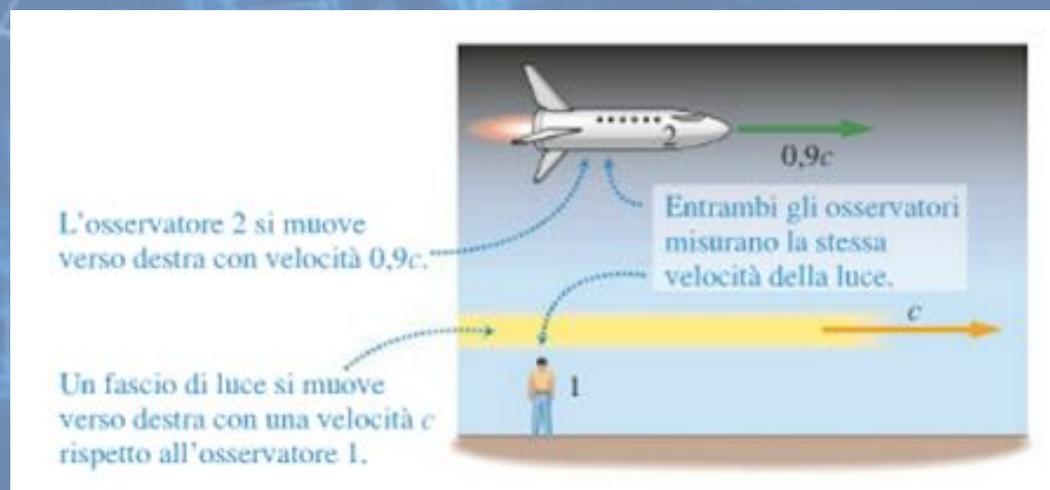
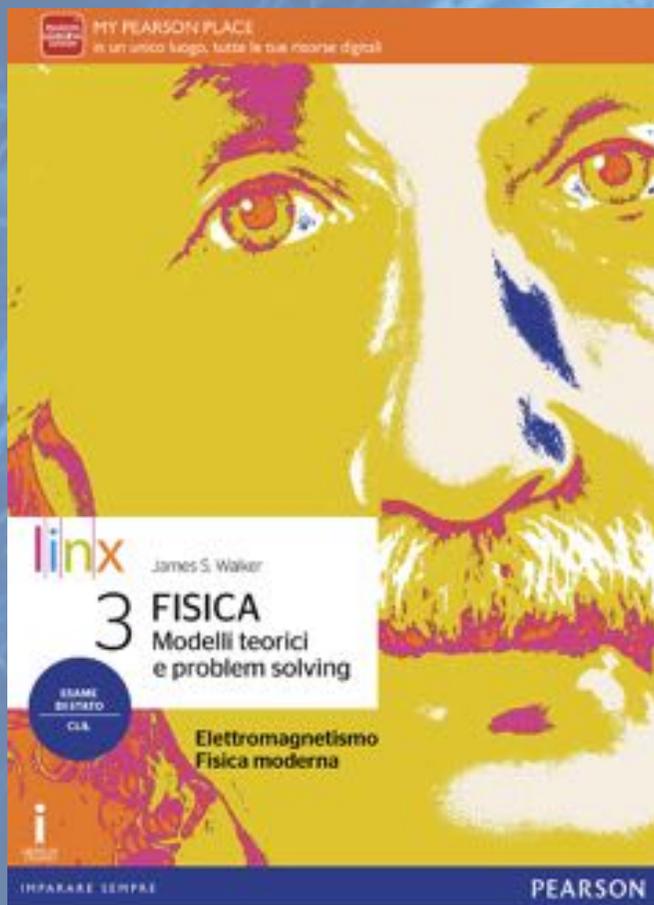
O.Levrini (1999)

La relatività nei libri di testo



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

La relatività nei libri di testo



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.

Il Software utilizzato



<https://teacher.desmos.com/>

1 The cover of the book "Spazio della relatività ristretta" by J. J. Thomson, showing a clock and a star.	2 Teoria della relatività ristretta La teoria della relatività ristretta studia come sono misurate A diagram showing a train moving to the right on a set of tracks. J.J.	3 La relatività galileiana Si può rispondere ricorrendo alla legge di A diagram showing a train moving to the right on a set of tracks. J.J.	4 Il comportamento della luce Applicando lo stesso ragionamento, a chi relatività si A diagram showing a train moving to the right on a set of tracks. J.J.	5 Contraddizioni tra le teorie Per la meccanica classica non esistono velocità assolute: la loro misura, come visto, dipende dal moto dell'osservatore. La teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell afferma però che la velocità della luce, essendo essa un'onda A small portrait of Albert Einstein.
6 Esperimento di Michelson... Michelson e Morley tentarono di verificare la costanza A small portrait of Albert Einstein. J.J.	7 Esperimento di Michelson... In pratica, Michelson e Morley si A diagram of the Michelson-Morley experiment setup. J.J.	8 Esperimento di Michelson... Tuttavia, i due scienziati non osservarono nessuna deviazione A diagram of the Michelson-Morley experiment setup. J.J.	9 I profeti di Einstein A small portrait of Albert Einstein. J.J.	10 I profeti di Einstein A small portrait of Albert Einstein. J.J.
11 Simultanità fra due eventi Per descrivere un evento, in fisica, è necessario precisare dove avviene (cioè) indicare le sue A diagram showing two events occurring in a hallway. J.J.	12 Simultanità fra due eventi Il secondo postulato di Einstein impone A diagram showing two events occurring in space. J.J.	13 Simultanità fra due eventi Il brillamento solare avviene nello spazio molto più vicino a noi di quanto non sia la stella che esplose. Se A diagram showing two events occurring in space. J.J.	14 Sincronizzazione degli or... Dunque, per stabilire se due eventi lontani nello spazio sono effettivamente simultanei, bisogna disporre A diagram showing two events occurring in space. J.J.	15 Simultanità per due oss... Esaminiamo adesso uno dei A diagram showing two events occurring in space. J.J.
16 Simultanità per due oss... I due eventi, saranno invece simultanei per un A diagram showing two events occurring in space. J.J.	17 Simultanità per due oss... Chiarimento, per l'osservatore a terra, la testa del A diagram showing two events occurring in space. J.J.	18 Simultanità fra due eventi per osservatori in moto relativo A diagram showing two events occurring in space. J.J.	19 Consideriamo una situazione analoga. C'è un A diagram showing two events occurring in space. J.J.	20

Il Software utilizzato

	1	2 La relativ...	3 Lunghez...	4	5	6	7	8	9	10 Contraz...	11
Gertrude Blanch	---	---	---	•	---	•	•	---	---	---	---
Joan Birman	---	---	---	•	---	•	•	---	---	---	---
Kurt Gödel	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Charlotte Scott	---	---	---	•	---	•	•	---	---	---	---
Galileo Galilei	---	---	---	---	---	•	---	---	---	---	---
Pierre-Simon Lap...	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Bernhard Riemann	---	---	---	•	---	•	---	---	---	---	---
Mary Cartwright	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Girolamo Cardano	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Moon Duchin	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Hipparchus	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Johann Bernoulli	---	---	---	---	---	•	---	---	---	---	---
Leonardo Fibonacci	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Maria Agnesi	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

<https://teacher.desmos.com/>

Il Software utilizzato

1	2 La relativ...	3 Lunghez...	4	5	6	7	8	9	10 Contraz...	11	12 Un ese...
---	-----------------	--------------	---	---	---	---	---	---	---------------	----	--------------



Per rispondere, bisogna considerare che, per l'osservatore sull'astronave, la durata del viaggio non è uguale al Δt misurato dall'osservatore sulla Terra; piuttosto, l'osservatore sull'astronave misurerà il tempo proprio $\Delta t'$ (in quanto gli eventi A = "partenza" e B = "arrivo" avvengono, per lui, nello stesso punto dello spazio, cioè nel medesimo punto, fermo, rispetto all'astronave).

Esprimi $\Delta t'$, misurato dall'osservatore sull'astronave, in funzione di Δt misurato dall'osservatore a Terra, usando la formula di dilatazione dei tempi.

Gertrude Blanch

$T = \text{fattore di lorentz} \times t' = \gamma \cdot t'$ Di lorentz

Joan Birman

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$$

$$\frac{L'}{v} = \gamma \cdot \Delta t'$$

$$\Delta t' = \frac{L'}{v \cdot \gamma}$$

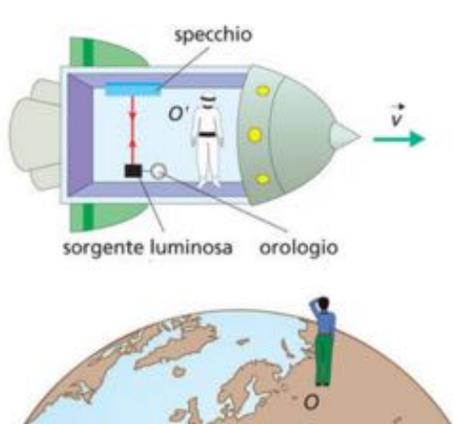
Sviluppo del percorso didattico

Finalità del percorso didattico

- Approccio *alla Resnick* per valutarne l'efficacia e i limiti
- Valutare le difficoltà del cambiamento concettuale da fisica classica a relativistica
- Realizzare una trattazione adeguata delle *grandezze proprie* e delle leggi di dilatazione del tempo e contrazione delle lunghezze

Modalità e strumenti utilizzati

- Contesto di *didattica a distanza*
- Realizzazione di schermate interattive tramite piattaforma *Teacher Desmos* (<https://teacher.desmos.com/>)



Un osservatore O , fermo rispetto alla Terra, vede viaggiare l'astronave con una velocità \vec{v} . Anche O decide di misurare l'intervallo di tempo che intercorre tra gli eventi A e B . Secondo voi, la misura di O sarà diversa da quella di O' ?

- O misurerà un intervallo di tempo maggiore di quello misurato da O'
- O misurerà un intervallo di tempo minore di quello misurato da O'
- O e O' misureranno lo stesso intervallo di tempo

Struttura del percorso didattico

Verifica conclusiva

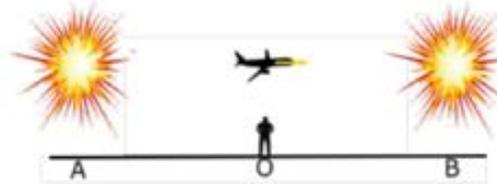
1. Un'astronave si sta allontanando dalla Terra alla velocità $v = 0,20c$ in direzione di α -Centauri. A causa di un guasto all'antenna, che gli astronauti impiegano 4,0 ore a riparare, le trasmissioni verso la Terra vengono interrotte.
 - a) Calcola quanto dura l'interruzione misurata dalla Terra.
 - b) Calcola dopo quanto tempo terrestre gli orologi dell'astronave hanno un ritardo di 5,0 s rispetto agli orologi sulla Terra.
 - c) La distanza, misurata dalla Terra, dalla quale l'astronave ricomincia a trasmettere è 12 milioni di km. Calcola quanto tempo impiega il segnale emesso dall'astronave per raggiungere la Terra.
 - d) Al momento del guasto l'astronave invia due sonde alla velocità di $0,10c$, una verso la Terra e una verso α -Centauri. Calcola la velocità delle due sonde rispetto alla Terra. Le sonde si stanno avvicinando o allontanando dalla Terra? Giustifica la tua risposta.
 - e) Quando è stata assemblata nella base terrestre, l'astronave era lunga 85 m. Calcola la lunghezza dell'astronave misurata da una base su Marte, sopra la quale l'astronave transita con velocità $0,40c$.
 - f) Durante il transito sopra la base marziana, l'equipaggio dell'astronave misura la lunghezza della pista di atterraggio e ottiene il valore 2,5 km. Quanto è lunga la pista nel riferimento marziano?

Struttura del percorso didattico

Verifica conclusiva

2. In un acceleratore, un elettrone e^- e un positrone e^+ si muovono alla velocità di $0,60c$ ma in versi opposti, rispetto al sistema di riferimento dell'acceleratore.
 - a) Determina la velocità del positrone nel sistema di riferimento dell'elettrone. Quanto varrebbe tale velocità secondo la relatività classica?
 - b) Nell'acceleratore è fissata una lastra metallica quadrata di lato $4,0$ cm. A quale velocità dovrebbe muoversi l'elettrone e^- (nella direzione parallela ad un lato) per osservare un rettangolo di area $8,0$ cm²? Esprimi tale velocità come frazione di c .

3. Nelle città A e B scoppiano simultaneamente due fuochi d'artificio in un sistema di riferimento a riposo con esse. Nell'istante in cui scoppiano, un artificiere si trova fermo sulla Terra nel punto O esattamente a metà strada tra le due città. Sempre nello stesso istante, un ipotetico aereo che sta viaggiando a metà della velocità della luce dalla città A alla città B parallelamente al terreno si trova esattamente sopra l'artificiere.



- a) Qual è la velocità della luce emessa dai due fuochi d'artificio per l'artificiere? E per un osservatore sull'aereo? Perché?
- b) Calcola dopo quanto tempo dallo scoppio dei fuochi d'artificio l'artificiere riceve i due segnali luminosi, se la distanza tra le due città è 1000 km.
- c) Considera adesso l'evento 1: "bagliore emesso da A" e l'evento 2: "bagliore emesso da B". Gli eventi 1 e 2 sono simultanei per un osservatore sull'aereo? Perché?
- d) Cosa si potrebbe dire sulla simultaneità degli eventi 1 e 2 per l'osservatore sull'aereo se quest'ultimo viaggiasse a velocità ordinarie (ad esempio 500 km/h)?

Il percorso

Il percorso è disponibile online in tre parti

PRIMA PARTE (introduzione alla relatività)

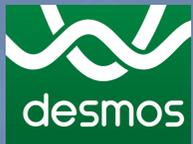
<https://teacher.desmos.com/activitybuilder/custom/5e6fb26adf6ec40af800f6c7>

SECONDA PARTE (la dilatazione dei tempi)

<https://teacher.desmos.com/activitybuilder/custom/5e7b671044315b0bbec44414>

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

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



<https://teacher.desmos.com/>

Struttura del percorso didattico

Grandezze proprie

- Definizione delle grandezze proprie *precedente* alla presentazione delle leggi
- Notazione *specific*a e indipendente dall'osservatore per tempo proprio (Δt) e lunghezza propria (L)
- Presentazione delle leggi mediante l'uso delle grandezze proprie:

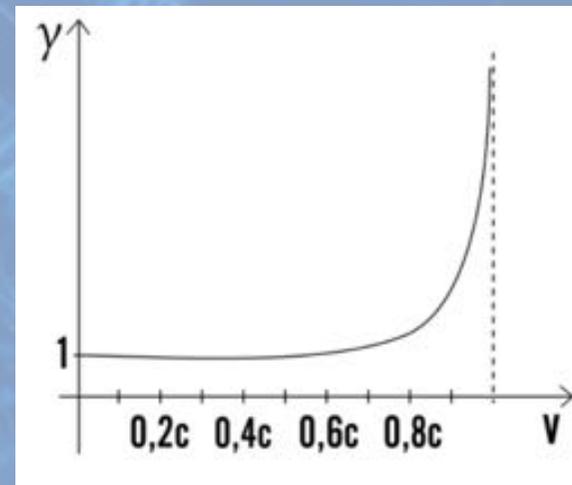
$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

$$L = \frac{L'}{\gamma}$$

Approccio interdisciplinare tra matematica e fisica

- Studio della funzione
- Studio matematico dei casi limite a basse ed alte velocità

$$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Somministrazione del percorso

Classi coinvolte

Tre classi quinte del liceo scientifico «G.Oberdan», Trieste

Classe 1

- 20 studenti
- indirizzo tradizionale
- percorso somministrato dagli autori in orario scolastico

Classe 2

- 24 studenti
- indirizzo scienze applicate
- percorso svolto in autonomia dagli studenti fuori orario scolastico

Classe 3

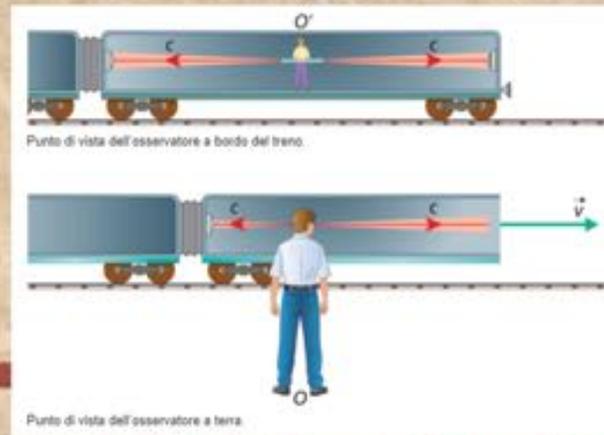
- 27 studenti
- indirizzo sportivo
- percorso somministrato dal docente in orario scolastico

Risultati della sperimentazione indipendenti dalle modalità, dai docenti delle classi e dagli indirizzi

Feedback degli studenti ...

1) Discrepanza temporale

Esempio del treno:



Se O' è sul un treno che si muove alla velocità v , e nelle sue mani tiene una fonte luminosa azionata da un certo F . (che non ci interessa).

O' si trova al centro esatto del treno. O , invece, si trova fuori dal treno ed osserva la situazione.

La teoria della relatività ristretta dice che il fascio di luce colpirà: gli apici del treno nello stesso istante (e su questo siamo d'accordo).

Feedback degli studenti ...

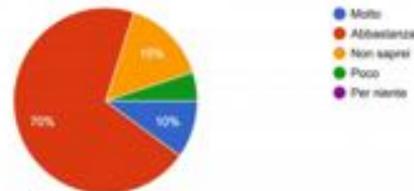
Ti ha interessato l'argomento trattato nel percorso?
20 responses



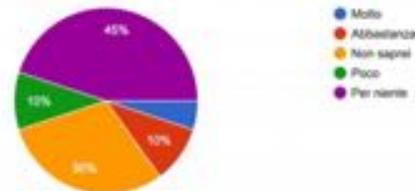
Hai trovato difficoltà riguardo sull'argomento trattato nel percorso?
20 responses



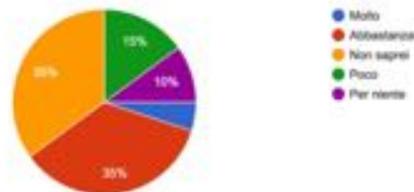
Con la metodologia utilizzata, è stato facile seguire la spiegazione?
20 responses



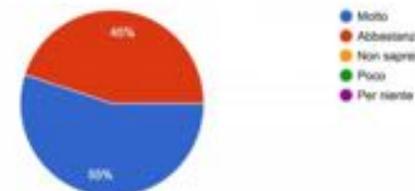
Avresti preferito una trattazione più "matematica" degli argomenti trattati?
20 responses



Ti è piaciuto intervenire nella spiegazione fornendo le risposte ai quesiti proposti, prima di andare avanti?
20 responses



Ti hanno aiutato gli esempi forniti a comprendere l'argomento trattato?
20 responses



Risultati della sperimentazione

Concetto di sistema di riferimento

Fondamentale per comprendere gli effetti relativistici

Difficoltà degli studenti:

- Poca familiarità col concetto di *sistema di riferimento inerziale*
- Incapacità di descrivere fenomeni fisici dal punto di vista di altri sistemi di riferimento che non siano la Terra



Possibili soluzioni:

- Relatività del moto anche in meccanica classica
- Trattazione più adeguata del principio di relatività galileiano

Risultati della sperimentazione

Grandezze proprie

- Concetti ben compresi dagli studenti
- Leggi di dilatazione del tempo e di contrazione delle lunghezze applicate correttamente
- Comprensione della validità delle leggi

Difficoltà degli studenti:

- Ragionamento in termini di «osservatore fermo» e «osservatore in moto»
- Notazione proposta non adeguata

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

$$L = \frac{L'}{\gamma}$$



Possibili soluzioni:

- Derivazione più adeguata delle leggi
- Notazione più adeguata:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 \quad L = \frac{L_0}{\gamma}$$

$$\Delta t = \gamma \Delta \tau \quad L = \frac{\lambda}{\gamma}$$

Risultati della sperimentazione

Cambiamento concettuale da mondo classico a mondo relativistico

Difficoltà degli studenti:

- Rifiuto di considerare spazio e tempo come concetti non assoluti
- Situazioni descritte irrealistiche e non intuitive
- Fatica nel capire gli esperimenti mentali



Possibili soluzioni:

- Trattazione più adeguata delle definizioni operative
- Introduzione alle coordinate spazio-temporali e alle trasformazioni di Lorentz
- Diagrammi spazio-tempo
- Trattazione degli aspetti applicativi della teoria (es. particelle elementari)

Conclusioni

Difficoltà intrinseche amplificate dalla non completa familiarità con il concetto di sistema di riferimento inerziale

Scelta di dare più spazio alle grandezze proprie ha facilitato gli studenti, ma permane la necessità di una notazione appropriata

Cambiamento concettuale ostacolato dagli esperimenti mentali: trattazione più matematica e basata su applicazioni pratiche potrebbe essere più semplice

Approcci didattici efficaci devono includere entrambe le interpretazioni della teoria