

Pavia, 22 ottobre 2014

**Insegnamento della relatività ristretta a  
scuola: indicazioni ministeriali, libri di testo e  
risultati di ricerca in didattica della fisica a  
confronto**

*Olivia Levrini*

Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Università di Bologna

## 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).”

## 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

(\*) *La scaletta ricalca la struttura dell'articolo di Einstein del 1905 (salvo alcuni importanti cambiamenti, come il ruolo dell'esperimento di M&M)!!!*

## Punto centrale della mia presentazione

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).

## **La strategia di presentazione e di argomentazione**

Passare attraverso la memoria originale di Einstein del 1905, sottolineando i “dettagli critici” e mostrando come, oggi, possono essere ripresi e trattati in classe

## **PARENTESI**

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

## I prossimi incontri

29-10-2014

Prof. Anna De Ambrosis

**Approccio geometrico alla relatività speciale: la proposta di Taylor e Wheeler**

ore 15-17 Dipartimento di Fisica, Università di Pavia

5-11-2014

Prof. Anna De Ambrosis

**Spazio-tempo e dinamica relativistica**

ore 15-17 Dipartimento di Fisica, Università di Pavia

19-11-2014

Prof. Olivia Levrini

**Il dietro le quinte di un processo di ricostruzione disciplinare: riflessioni sulla proposta di Taylor e Wheeler a confronto con quella di Resnick**

ore 15-17 I.I.S. "Volta" di Pavia



## Approccio di Resnick (1968)

## Approccio di Taylor & Wheeler (1965)

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

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 Einstein (1905)

Riferimento principale: l’approccio di Minkowski (1908)

Linguaggio algebrico  
(basato sulle trasformazioni di Lorentz)

Linguaggio geometrico  
(basato sulla geometria spaziotemporale di Minkowski)

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

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)

## Punto centrale della mia presentazione

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).

**“Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento”  
(1905)**



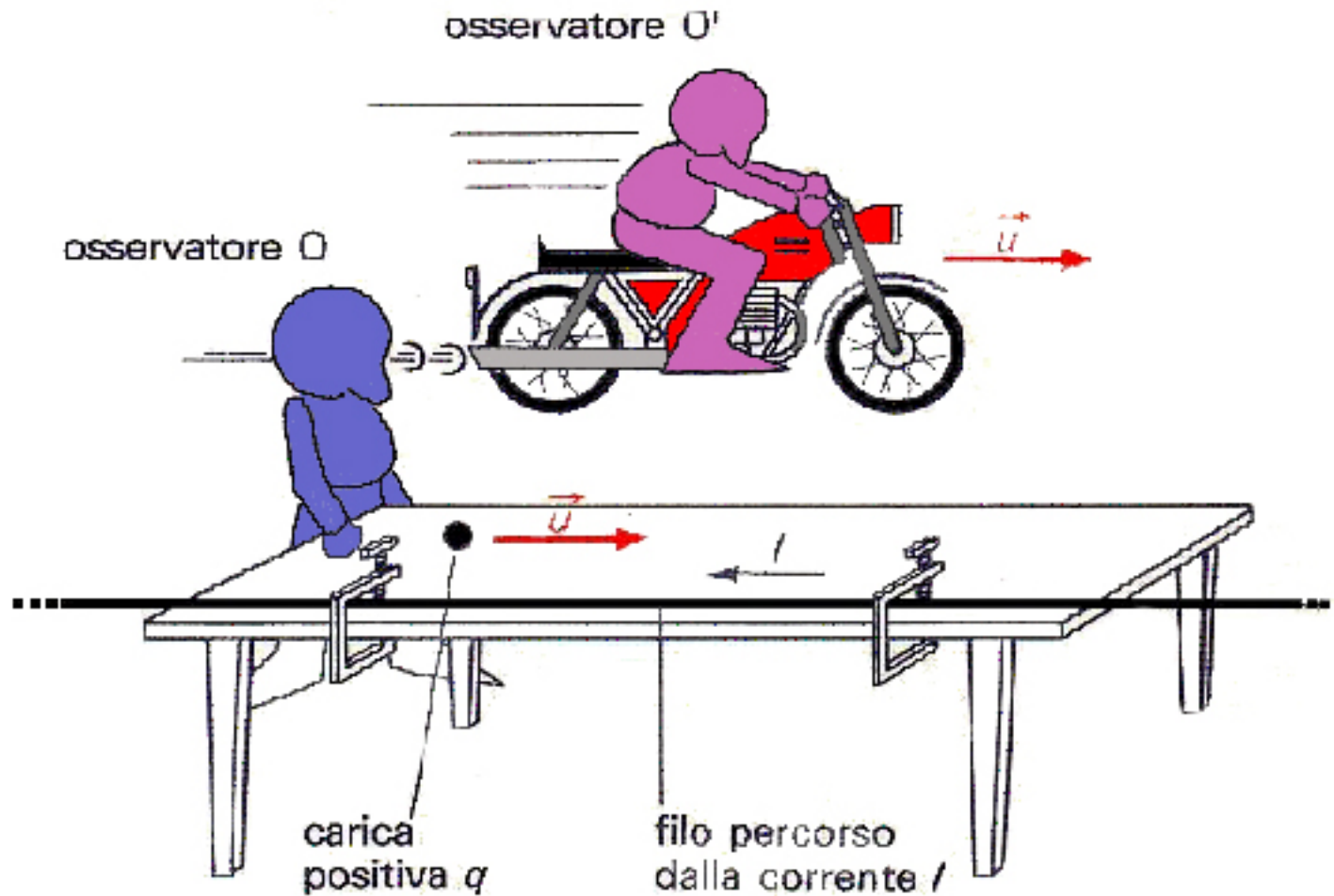
«E' noto che l'elettrodinamica di Maxwell – così come viene oggi generalmente intesa – conduce, quando la si applica a corpi in movimento, **ad asimmetrie che non sembrano inerenti ai fenomeni.** [...].

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. [...]

Questi due postulati sono sufficienti per giungere ad una teoria elettrodinamica dei corpi in movimento **semplice e coerente**, basata sulla teoria di Maxwell per i corpi in quiete. L'introduzione di un **“etere luminifero”** **si rivelerà superflua**, giacché la concezione che qui svilupperemo non prescriverà uno **“spazio assolutamente stazionario”** provvisto di speciali proprietà [...].» (Einstein, 1905)

# Asimmetrie nell'elettromagnetismo

(da G.Manuzzio e G.Passatore – *Verso la Fisica, vol. 3* –  
Principato, 1981 )



«E' noto che l'elettrodinamica di Maxwell – così come viene oggi generalmente intesa – conduce, quando la si applica a corpi in movimento, **ad asimmetrie che non sembrano inerenti ai fenomeni.** [...].

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. [...]

Questi due postulati sono sufficienti per giungere ad una teoria elettrodinamica dei corpi in movimento **semplice e coerente**, basata sulla teoria di Maxwell per i corpi in quiete. L'introduzione di un **“etere luminifero” si rivelerà superflua**, giacché la concezione che qui svilupperemo non prescriverà uno **“spazio assolutamente stazionario”** provvisto di speciali proprietà [...].» (Einstein, 1905)

## Alcune scelte argomentative cruciali

1. Enfasi su asimmetrie teoriche più che su anomalie sperimentali

[“simmetrie fenomenologiche” devono essere descritte da “teorie simmetriche” (*l'argomento dell'identità degli indiscernibili di Leibnitz*)]

2. L'esigenza di semplicità

[la conoscenza fisica deve reggersi sul minor numero di ipotesi possibili (*il principio di economia di Mach e il postulato meta-fisico dell'unità della natura*)]

## **La problematica influenza su EINSTEIN dell' ESPERIMENTO DI MICHELSON-MORLEY...**

**...i tentativi falliti di rilevare un qualche  
movimento della Terra rispetto al “mezzo  
luminifero” ... (Einstein, 1905)**



“L’ influenza del cruciale esperimento di Michelson-Morley sulle mie ricerche è stata piuttosto indiretta. Appresi di questo esperimento attraverso lo studio decisivo di H. A. Lorentz sull’ elettrodinamica dei corpi in movimento (1895) di cui venni a conoscenza prima di sviluppare la teoria della relatività ristretta... Ciò che mi condusse più o meno indirettamente alla teoria della relatività ristretta fu la convinzione che la forza elettromotrice agente su un corpo in moto in un campo magnetico non è altro che un campo elettrico” (Einstein, 1952, *Dichiarazione inviata ad un congresso in onore del centenario nella nascita di Michelson*, in Resnick, *Introduzione alla Relatività Ristretta*, Casa Editrice Ambrosiana, 1968)

## Citazione più estesa

“Penso sempre a Michelson come all’ artista della scienza. La sua più grande gioia sembrava provenire dalla bellezza dell’ esperimento stesso, e dall’ eleganza del metodo impiegato. Ma egli ha anche mostrato una straordinaria comprensione delle sconcertanti questioni fondamentali della fisica. Ciò è evidente dall’ acuto interesse che ha manifestato fin dall’ inizio per il problema della dipendenza della luce dal moto. L’ influenza del famoso esperimento di Michelson-Morley sulle mie riflessioni è stato piuttosto indiretto. Ne venni a conoscenza attraverso la fondamentale ricerca di H.A. Lorentz sull’ elettrodinamica dei corpi in movimento (1905) di cui ero al corrente prima di esporre la teoria speciale della relatività. L’ assunto fondamentale di Lorentz di un etere in quiete non mi sembrò convincente in se stesso precisamente perché conduceva a un’ interpretazione dell’ esperimento di Michelson-Morley che mi apparve artificioso. Ciò che mi condusse direttamente alla teoria speciale della relatività fu la convinzione che la forza elettromotrice indotta in un corpo in moto in un campo magnetico non era nient’ altro che un campo elettrico. Ma ero anche guidato dal risultato dell’ esperimento di Fizeau e dal fenomeno dell’ aberrazione. Non esiste, naturalmente, nessuna via logica che conduce alla creazione di una teoria ma soltanto incerti tentativi di costruzione con un controllo attento della conoscenza fattuale”. (19 dicembre 1952, lettera inviata per un incontro speciale della società di fisica a Cleveland, in occasione del centenario della nascita di Michelson)

*Da Holton, “Einstein, Michelson e l’ esperimento cruciale”, in  
L’immaginazione scientifica - I temi del pensiero scientifico,  
Giulio Einaudi Editore, 1983*

**Tesi sostenuta (Ruhan):**

“[...] Einstein considerava l’ esperimento di Michelson e Morley come necessario per convincere la maggioranza dei fisici della validità della teoria della relatività. Ciò è cosa affatto diversa dal considerarlo come il fondamento della sua personale scoperta della chiave della relatività” (Ruhan in Holton, p. 194)

### Commento di Holton:

“La nascita di una nuova teoria come risposta a una scoperta empirica imbarazzante! Cose del genere sono accadute, ma può anche essere che in questo modo si costruiscano favole.” (p.182)

“Quasi ogni manuale scientifico attribuisce necessariamente grande valore al ragionamento induttivo chiaro e distinto. Il corretto comportamento della classe sembrerebbe minacciato se il manuale avallasse il fatto che generalizzazioni corrette sono a volte state compiute senza fondarsi su una testimonianza sperimentale priva di ambiguità.

[...] Ci si può aspettare che uno studente accetti più facilmente una teoria così lontana dal senso comune come quella di Einstein se gli si può mostrare che Einstein, o almeno i suoi lettori, furono convinti in base a qualche esperimento definitivo.

Per queste ragioni nei manuali si parla poco dei drammatici conflitti che a volte sono richiesti per la graduale accettazione di una nuova teoria. Questa mancanza si adatta bene con un'altra funzione moralizzatrice dei manuali – minimizzare il coinvolgimento e lo sforzo dello scienziato nel compimento del suo lavoro scientifico in modo da abituare lo studente a ciò che l'autore del manuale solitamente, e forse in modo inconsapevole, ritiene essere le norme pubblicamente accettate del comportamento professionale. I manuali non vogliono avere a che fare con gli aspetti “privati” della scienza [...]. E' più semplice considerare l' “aspetto pubblico” della scienza, sul quale esiste (anche se forse falsamente) consenso”. (p. 190-191)

## Da “PARTE CINEMATICA” (Einstein, 1905)

*“Definizione di simultaneità*

[...]

Se un punto materiale è in quiete rispetto a questo sistema di coordinate, la sua posizione relativamente a esso può venire determinata mediante un regolo misuratore rigido, usando le regole della geometria euclidea, ad essere espressa in coordinate cartesiane.

Se vogliamo descrivere il moto di un punto materiale, dobbiamo dare i valori delle sue coordinate in funzione del tempo. Tuttavia, si tenga presente che una descrizione matematica di questo tipo ha significato fisico solo se è già chiaro che cosa si intende per “tempo”. Non dobbiamo dimenticare che tutti i nostri giudizi in cui interviene il tempo sono sempre giudizi su eventi simultanei. Se per esempio, dico che “il treno arriva qui alle 7 in in punto”, ciò significa, in pratica, che “il posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio sul 7 e l’ arrivo del treno sono eventi simultanei”.

Sembrerebbe che per superare tutte le difficoltà connesse alla definizione di “tempo” basti sostituire, alla parola “tempo”, “posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio”. Una tale definizione è in sufficiente quando si tratta di definire un tempo solamente per il luogo ove l’ orologio si trova; ma la definizione non è più soddisfacente quando si devono correlare nel tempo serie di eventi che avvengono in luoghi differenti, oppure – il che è lo stesso – determinare i tempi di eventi che si verificano in luoghi distanti dall’orologio.”

## LA DEFINIZIONE OPERATIVA DEL CONCETTO DI TEMPO e I SUOI PASSAGGI CRUCIALI

- La necessità di scomporre un fenomeno fisico (es. il moto) in termini di sequenza di eventi
- La scelta di definire “operativamente”:
  - l’evento
  - il tempo di un evento e il tempo di un “evento lontano”
  - un procedimento di sincronizzazione di orologi distanti nello spazio per poter *correlare nel tempo serie di eventi che avvengono in luoghi differenti, in un modo che non dipenda da dove è collocato l’osservatore*

### **Definizione “operativa” di evento:**

*Un evento è definito operativamente* quando sono definite le operazioni di misura necessarie per determinare *posizione* e *istante di tempo* in cui l'evento stesso accade. La definizione operativa prevede sia l'utilizzo di un “regolo misuratore” sia di un orologio.

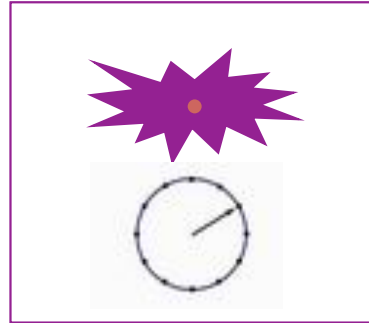
### **Definizione di tempo di un evento:**

Il tempo di un evento è ciò che “è misurato dall'orologio” collocato nella stessa posizione dell'evento, dove per “essere misurato dall'orologio” si intende “avvenire simultaneamente con l'evento preso a riferimento”: «Se per esempio, dico che “il treno arriva qui alle 7 in un punto”, ciò significa, in pratica, che “il posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio sul 7 e l'arrivo del treno sono eventi simultanei”».

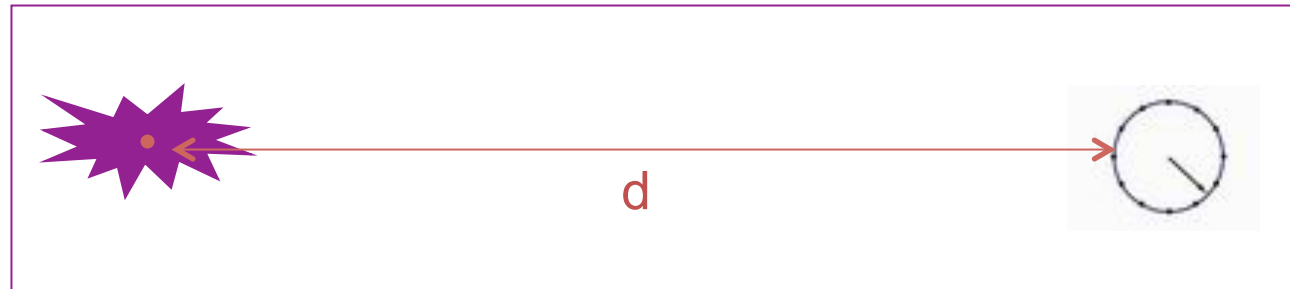
“Sembrerebbe che per superare tutte le difficoltà connesse alla definizione di “tempo” basti sostituire, alla parola “tempo”, “posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio”. Una tale definizione è insufficiente quando si tratta di definire un tempo solamente per il luogo ove l’orologio si trova; ma la definizione non è più soddisfacente quando si devono correlare nel tempo serie di eventi che avvengono in luoghi differenti, oppure – il che è lo stesso – determinare i tempi di eventi che si verificano in luoghi distanti dall’orologio.” (Einstein, 1905)



Il tempo di un evento



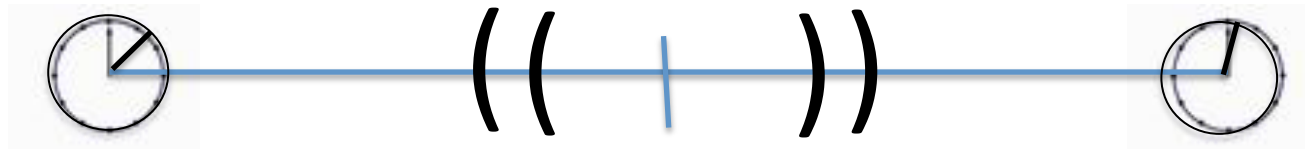
Il tempo di un evento distante nello spazio



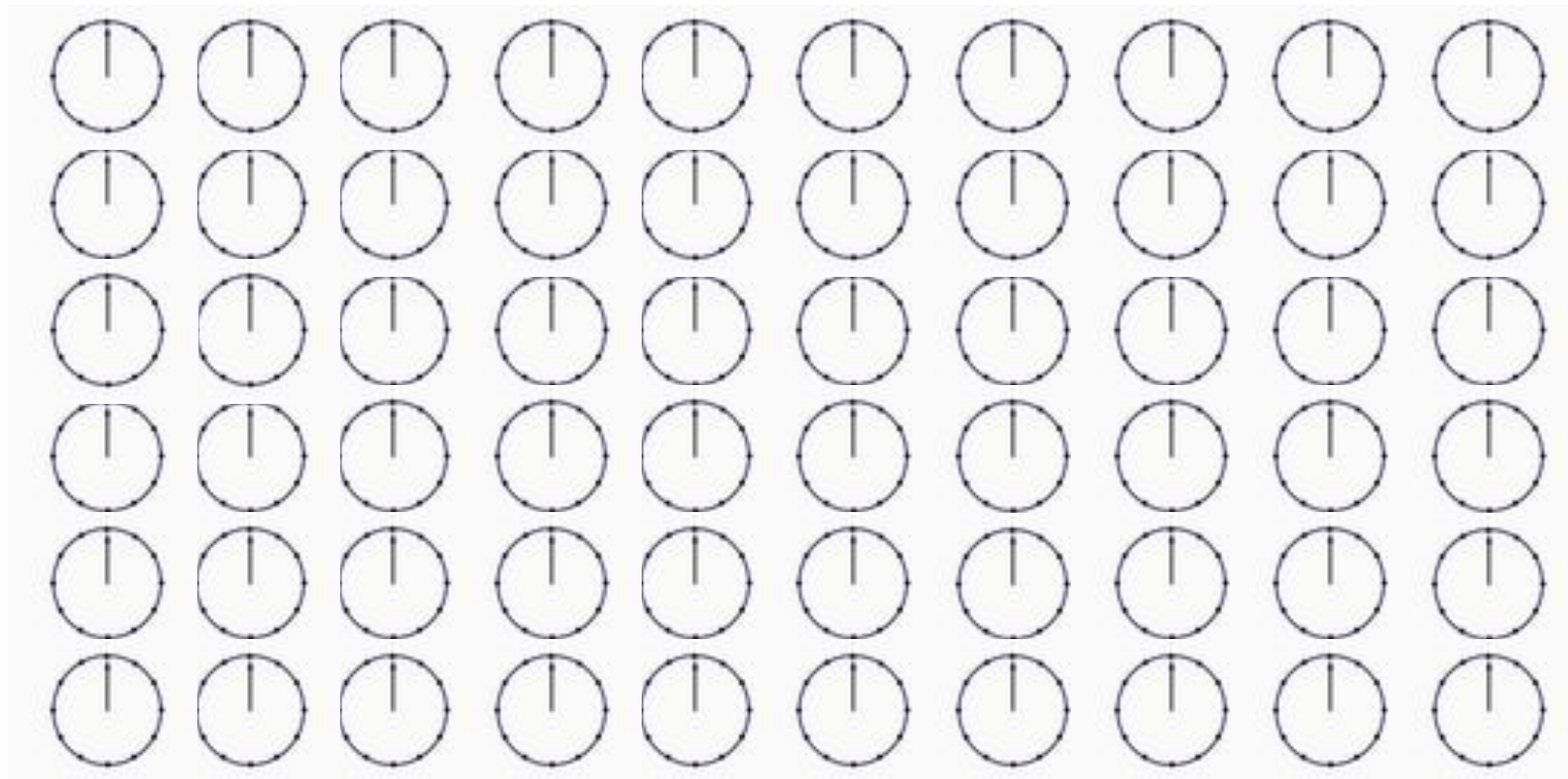
$$\Delta t \geq d/c$$

“ Potremmo certo accontentarci di stabilire i tempi di eventi collocando un osservatore munito di orologio nell’origine delle coordinate, il quale associ a ogni evento da valutare la corrispondente posizione delle lancette dell’orologio quando un segnale luminoso proveniente da quell’evento lo raggiunge attraverso lo spazio vuoto. Sappiamo, tuttavia, dall’esperienza che una simile coordinazione ha l’inconveniente di non essere indipendente dalla posizione dell’osservatore provvisto di orologio. Con il seguente ragionamento arriviamo a una determinazione molto più pratica.” (Einstein, 1905)

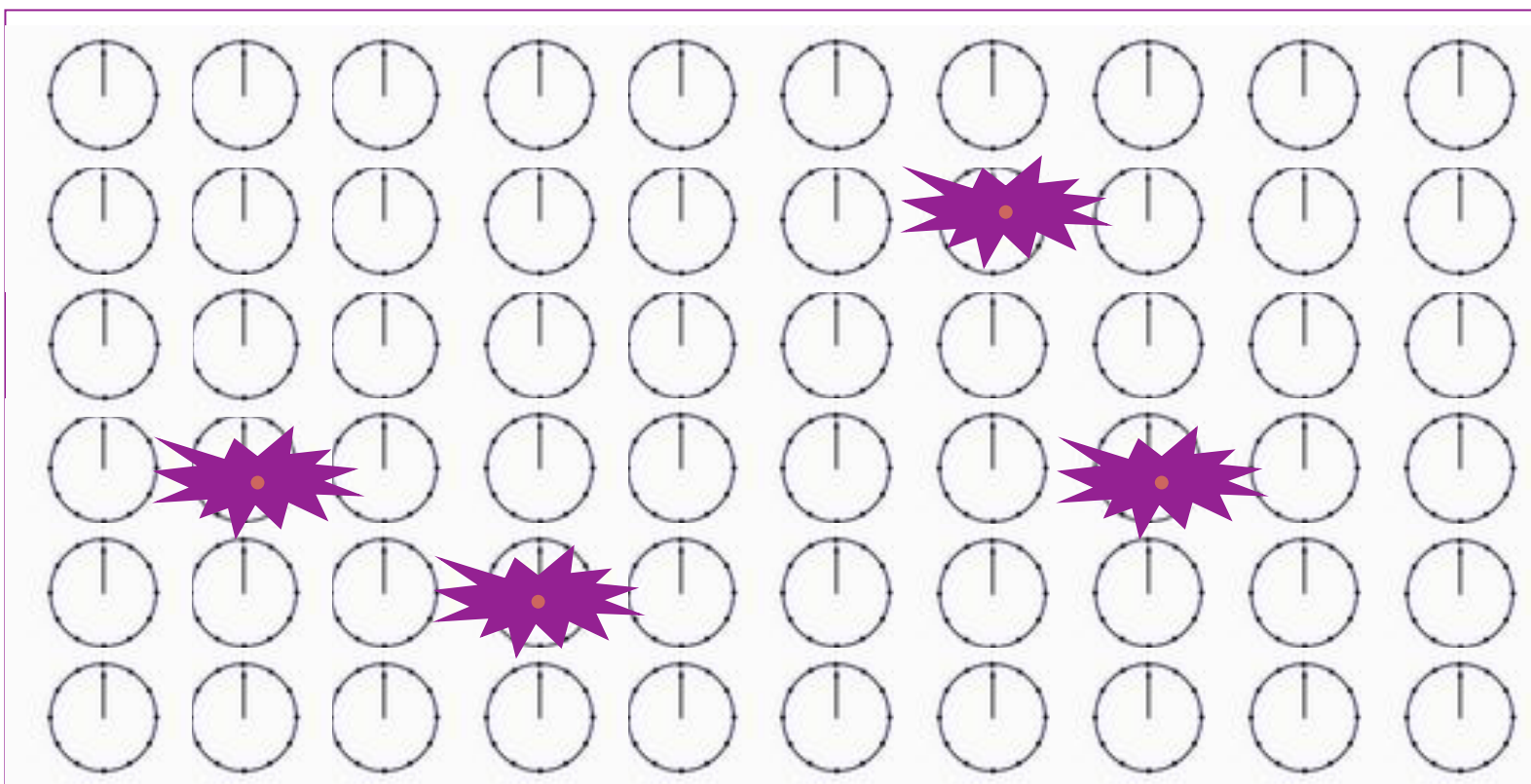
# Il procedimento di sincronizzazione degli orologi e la costruzione del reticolo di orologi sincronizzato



## Il procedimento di sincronizzazione degli orologi e la costruzione del reticolo di orologi sincronizzato



Il procedimento di sincronizzazione degli orologi e la costruzione del reticolo di orologi sincronizzato come modo pratico per valutare il tempo di eventi lontani nello spazio



**L' esistenza in natura di una velocità LIMITE fa sì che per determinare la distanza temporale tra due eventi distanti spazialmente sia necessaria anche una misura della loro distanza spaziale.**

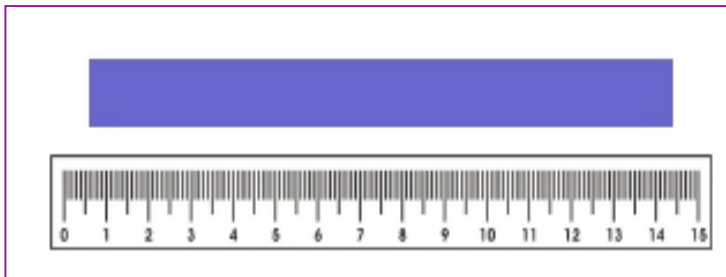


**Primo argomento a sostegno della necessità di avere un  
RETICOLO DI OROLOGI SINCRONIZZATI**

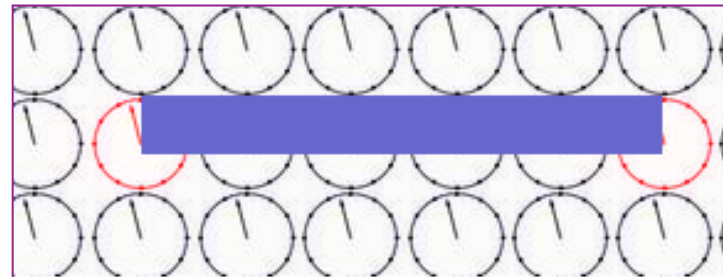
## DEFINIZIONI OPERATIVE DI LUNGHEZZA

“Immaginiamo che la sua lunghezza possa essere ricavata dalle seguenti due operazioni...” (1905)

In quiete



In moto



**Per definire (misurare) la distanza temporale tra due eventi distanzi nello spazio,  
così come per definire (misurare) la lunghezza di un oggetto in movimento è  
necessario utilizzare sia un regolo sia orologi!!!**

**L' INTRECCIO SPAZIO-TEMPORALE COME  
INTRECCIO OPERATIVO**



**La necessità di dotare ogni osservatore di un  
RETICOLO DI OROLOGI SINCRONIZZATI**



## **Spazio e tempo come relazioni tra eventi:**

coordinate da definire mediante regoli e orologi  
nel rispetto del nuovo vincolo dell'esistenza in  
natura  
di una velocità limite

## Il reticolo di orologi sincronizzati



## Il mondo visto dall' Ufficio brevetti di Berna ad inizio '900

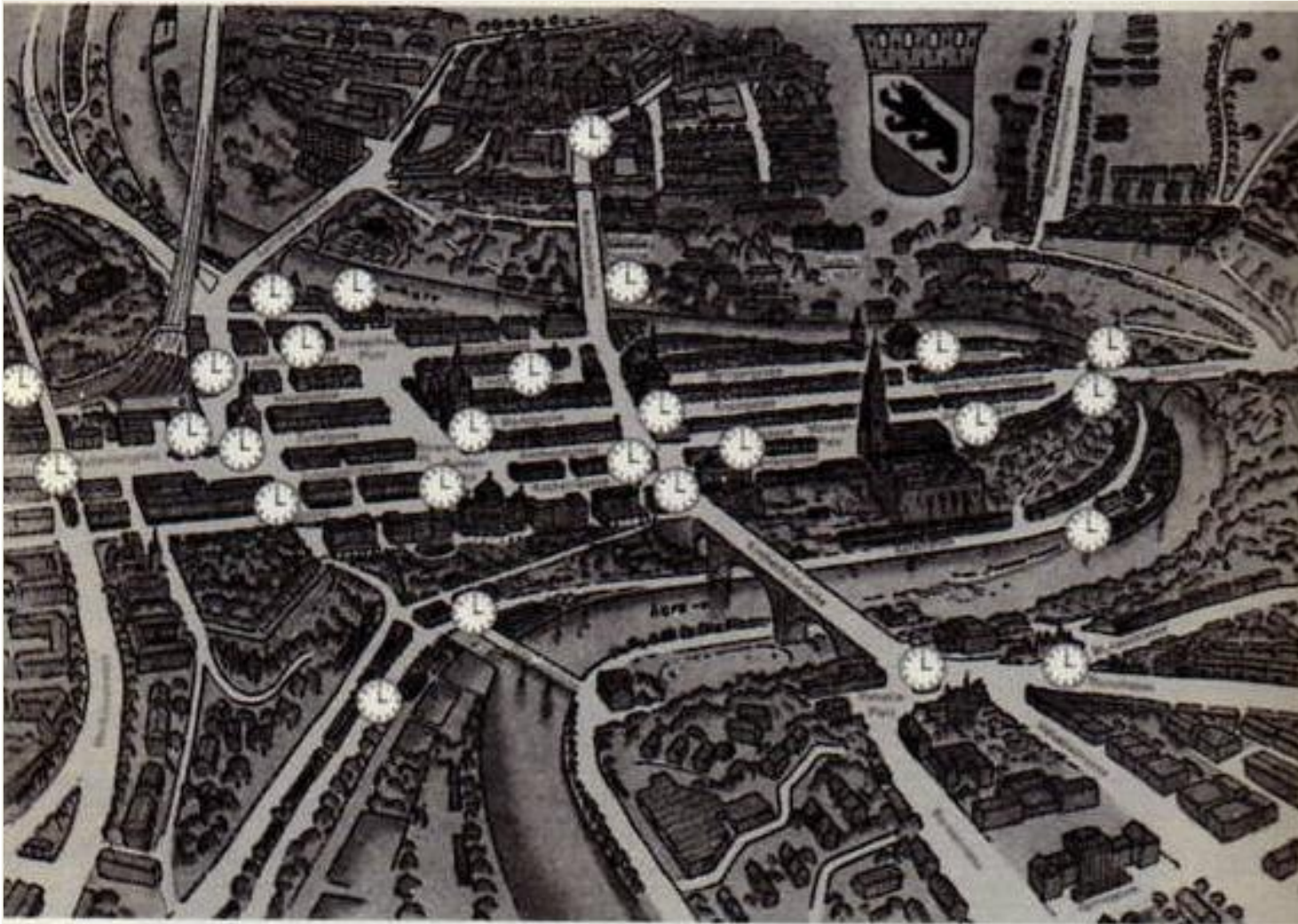


## Favarger, 1900, all'Esposizione Universale di Parigi:

“Non dovete vagare a lungo per Parigi per notare numerosi orologi, sia pubblici sia privati, in disaccordo tra loro - qual è quello che mente di più? Di fatto, anche se a mentire è uno solo di essi, sospettiamo della sincerità di tutti. La gente acquisterà sicurezza solo quando tutti i singoli orologi segneranno, all'unanimità, la stessa ora, nello stesso istante [...].

I sistemi non automatici, i più primitivi e tuttavia i più diffusi, sono la causa diretta dell'**anarchia del tempo** cui dobbiamo sottrarci.”

## Berna: una città orgogliosa della sua rete di orologi elettro-coordinati



“Il problema della coordinazione degli orologi era discusso nelle riviste filosofiche e persino, occasionalmente, in alcune pubblicazioni di fisica. La coordinazione elettromagnetica degli orologi costituiva un argomento così affascinante per il pubblico della fine del XIX secolo da essere trattato in dettaglio in uno dei libri di divulgazione scientifica per ragazzi preferiti da Einstein. Nel 1904-1905 una miriade di cavi per la coordinazione degli orologi correva sul suolo terrestre e sul fondo del mare, e gli orologi sincronizzati erano ovunque.” (Galison, “Gli orologi di Einstein, le mappe di Poincaré”, 2003)

## La materializzazione del tempo

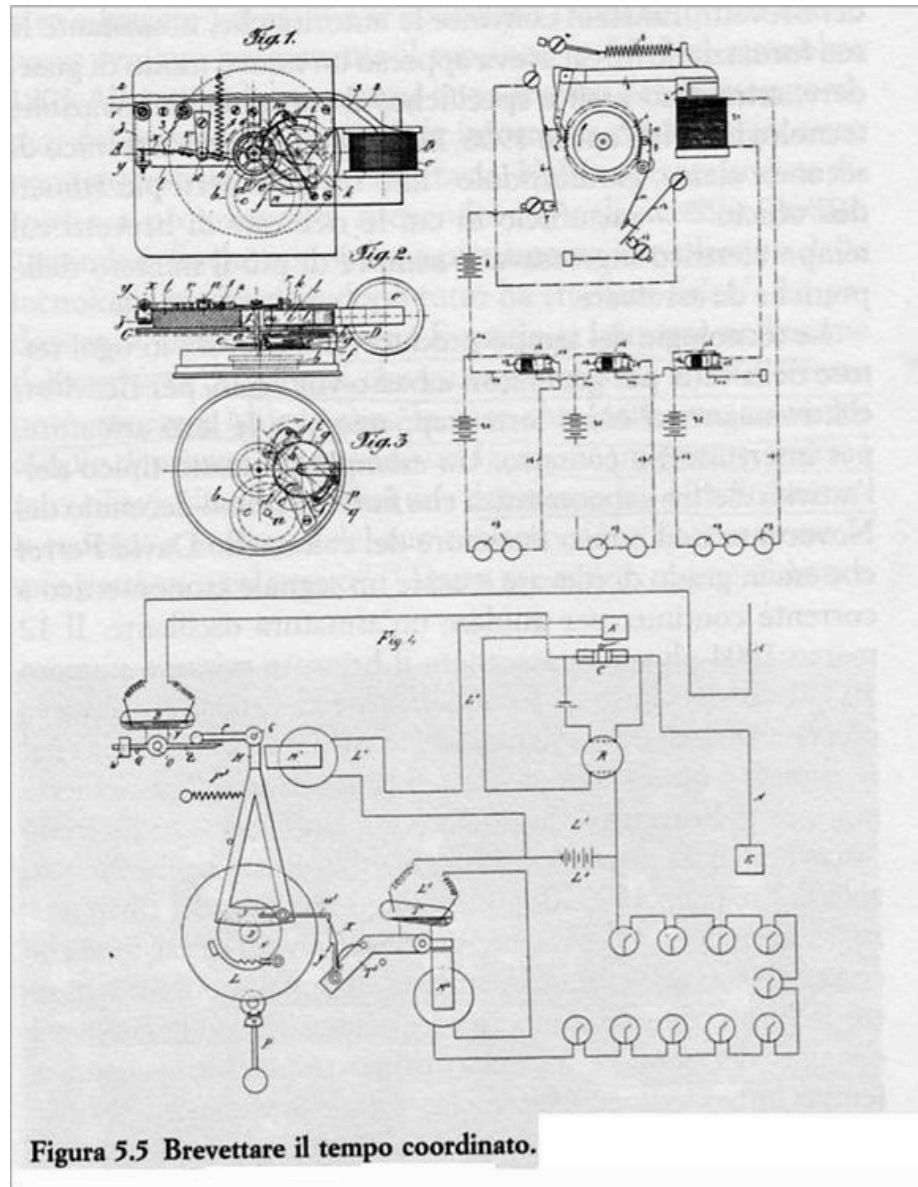
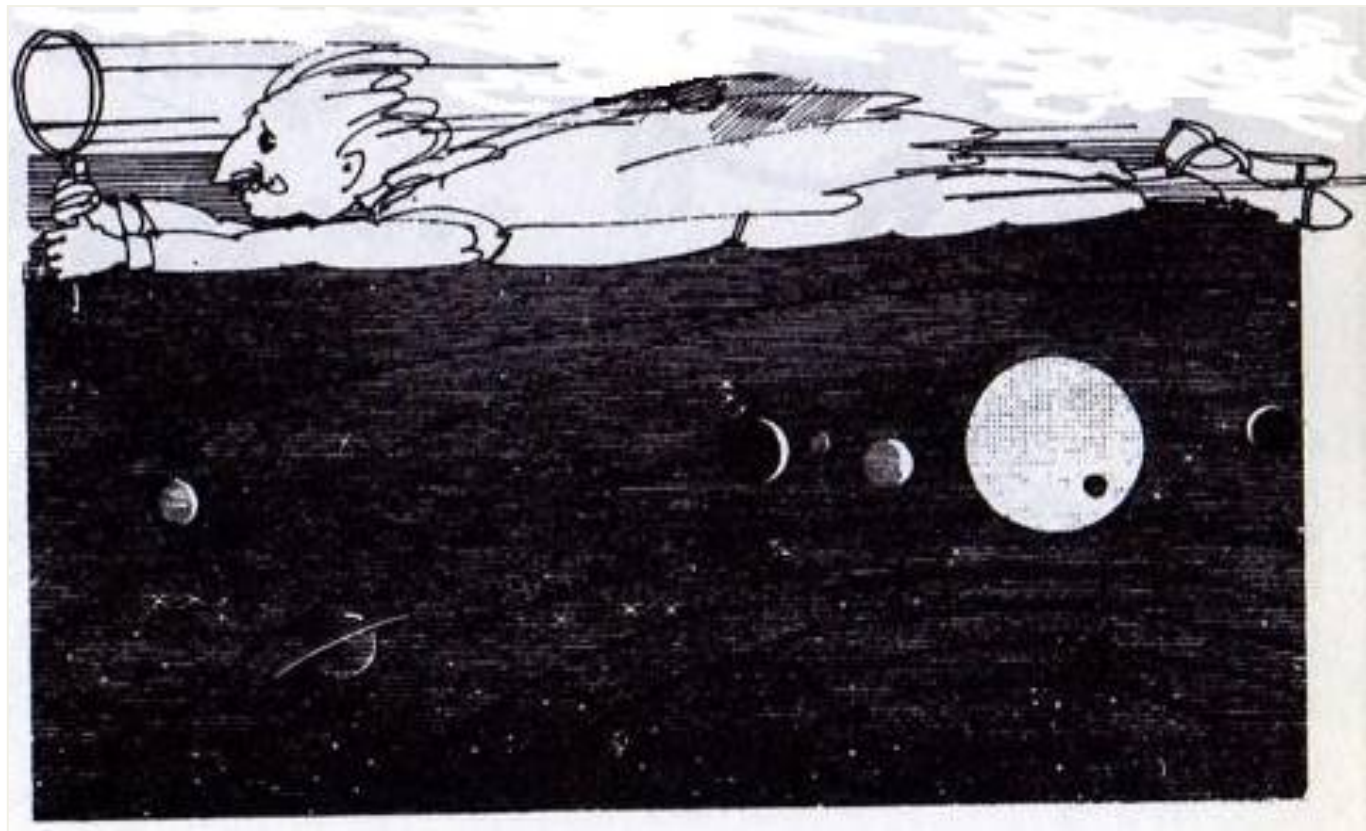


Figura 5.5 Brevettare il tempo coordinato.

“Era un mondo in cui non vi era più spazio per il tempo assoluto, teologico, di Newton; il suo posto era ora occupato da una *procedura*.”

(Galison P., “Gli orologi di Einstein, le mappe di Poincaré”, 2003)

**Com'è il mondo visto alla velocità della luce?**





## “La fuga dalla meraviglia”

“Lo sviluppo del [nostro] mondo intellettuale è in un certo senso una continua **fuga dalla «meraviglia»**. Provai una meraviglia di questo genere all’età di quattro o cinque anni, quando mio padre mi mostrò una bussola. **Il fatto che quell’ago si comportasse in quel certo modo non si accordava assolutamente con la natura dei fenomeni che potevano trovar posto nel mio mondo concettuale di allora, tutto basato sull’esperienza del «toccare»**. Ricordo ancora - o almeno mi sembra di ricordare - che questa esperienza mi fece una impressione durevole e profonda.

**Dietro alle cose doveva esserci un che di profondamente nascosto.”**

(Einstein A., “Autobiografia scientifica”, 1949)

“Riflessioni di questo tipo [sul valore limitato della teoria di Maxwell per la descrizione delle oscillazioni di pressione su uno specchio che riflette luce] mi fecero capire chiaramente già poco dopo il **1900, cioè dopo il lavoro precorritore di Planck**, che né la meccanica, né l’ elettrodinamica (ad eccezione di casi limite) potevano pretendere esatta validità. A poco a poco disperai della possibilità di scoprire le vere leggi per mezzo di sforzi costruttivi basati su fatti conosciuti. Quanto più a lungo e accanitamente mi sforzavo, tanto più mi convincevo che solo la scoperta di un principio formale universale poteva portarci a risultati sicuri. **Avevo davanti agli occhi l’ esempio della termodinamica.** In essa il principio universale era contenuto nel teorema: le leggi della natura sono fatte in modo tale che è impossibile costruire un *perpetuum mobile* (di primo e di secondo tipo). Ma come trovare un tale principio universale? Un tale principio risultò, dopo dieci anni di riflessione, dal **paradosso in cui mi ero imbattuto già all’ età di sedici** anni: se inseguissi un raggio di luce con la velocità  $c$  (velocità della luce nel vuoto), osserverei un tale raggio di luce come un campo elettromagnetico spazialmente **oscillante in quiete**. Tuttavia una cosa simile pare non verificarsi né in base all’ esperienza né secondo le equazioni di Maxwell. Fin dal principio mi sembrò intuitivamente chiaro che, giudicato un tale punto di osservazione, **tutto doveva accadere secondo le stesse leggi valide per un osservatore che fosse in quiete relativamente alla Terra.** Come farebbe altrimenti il primo osservatore a sapere, o a poter constatare, che si trova in uno stato di rapido e uniforme movimento? E’ chiaro che in questo paradosso è già contenuto il germe della teoria speciale della relatività.

(Einstein A., “Autobiografia scientifica”, 1949)

“...**paradosso in cui mi ero imbattuto già all’età di sedici** anni: se inseguissi un raggio di luce con la velocità  $c$  (velocità della luce nel vuoto), osserverei un tale raggio di luce come un campo elettromagnetico spazialmente **oscillante in quiete**. Tuttavia una cosa simile pare non verificarsi né in base all’esperienza né secondo le equazioni di Maxwell. Fin dal principio mi sembrò intuitivamente chiaro che, giudicato un tale punto di osservazione, **tutto doveva accadere secondo le stesse leggi valide per un osservatore che fosse in quiete relativamente alla Terra**. Come farebbe altrimenti il primo osservatore a sapere, o a poter constatare, che si trova in uno stato di rapido e uniforme movimento?  
E’ chiaro che in questo paradosso è già contenuto il germe della teoria speciale della relatività.”

(Einstein A., “Autobiografia scientifica”, 1949)

**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”***

## **Principio di relatività: “Eleveremo questa congettura al rango di postulato”**

“[...] le 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”.

**DAI POSTULATI  
AGLI  
EFFETTI RELATIVISTICI**

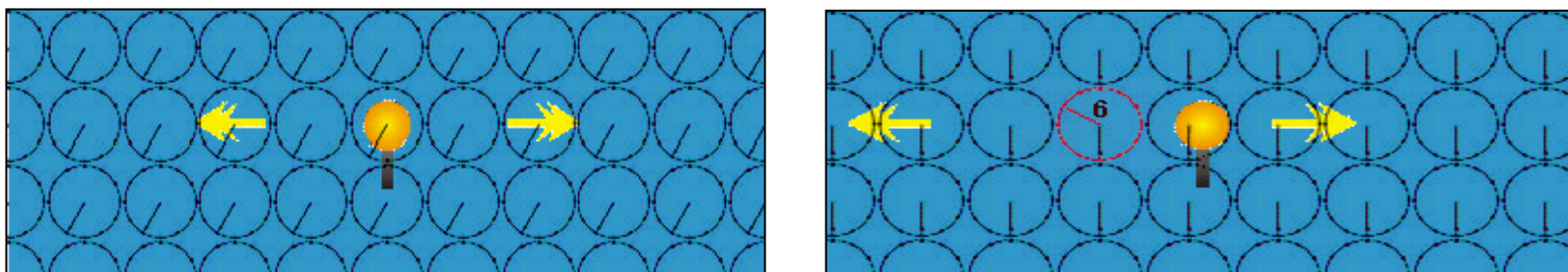
**La relatività della simultaneità  
La dilatazione del tempo  
La contrazione delle lunghezze**

**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)

# La relatività della simultaneità

*Il nuovo vincolo:  $c$  costante*



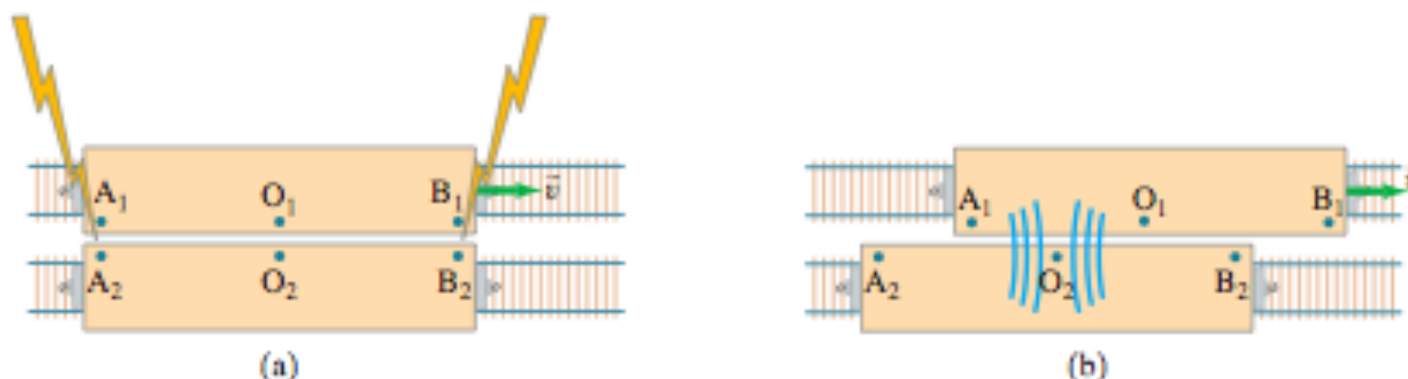
(animazioni di M. Recchi, Prin FFC, Dip. Fisica, Bologna)

# La relatività della simultaneità nei libri di testo

ISBN 88-9-1336-5

26-3 Simultaneità

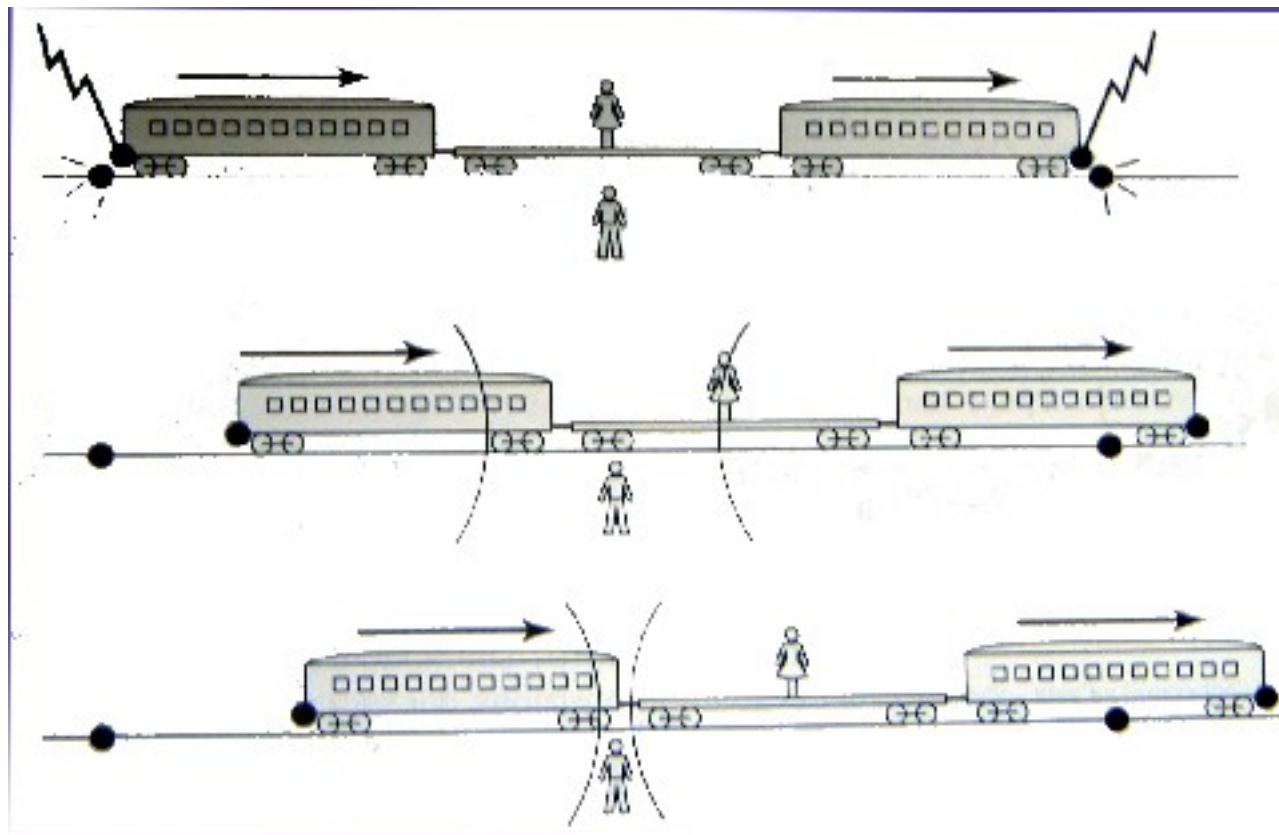
787



**FIGURA 26-5** Esperimento mentale sulla simultaneità. Per l'osservatore  $O_2$  il sistema di riferimento  $O_1$  si muove verso destra. In (a) un fulmine colpisce i due sistemi di riferimento in  $A_1$  e  $A_2$ , e un secondo fulmine si abbatte su  $B_1$  e  $B_2$ . (b) Un istante dopo la luce proveniente dai due eventi raggiunge contemporaneamente  $O_2$ , di modo che questi ritiene che i due fulmini siano caduti simultaneamente. Nel sistema di riferimento  $O_1$  invece la luce proveniente da  $B_1$  è già arrivata all'osservatore  $O_1$  mentre quella in arrivo da  $A_1$  deve ancora raggiungerlo. Sicché nel sistema di riferimento di  $O_1$  l'evento in  $B_1$  deve essere avvenuto prima dell'evento in  $A_1$ . La simultaneità non è un concetto assoluto.



## Il “treno”



Dalla relatività della simultaneità alla contrazione delle lunghezze

## L'eruzione dei vulcani

(tratto da "Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames", Scherr R.E., Shaffer P.S., Vokos S., Am. J. Phys., 69 (S1), S24-S35, July 2001)

### ***Prima versione***

In questo problema, eventi e moti avvengono lungo la stessa direzione, parallela al terreno. Effetti di non-inerzialità sulla superficie della Terra possono essere trascurati.

Il monte Rainer e il monte Hood, che distano 300km in un sistema di riferimento fermo rispetto a loro, improvvisamente eruttano emettendo un bagliore.

Un sismologo, che si trova fermo in un laboratorio esattamente a metà strada tra i due vulcani, riceve i segnali luminosi dell'eruzione dei due vulcani nello stesso istante.

Un'astronave molto veloce sta volando dal Mt. Rainer al Mt. Hood ad una velocità costante pari a  $0,8c$  relativamente al terreno ( $\gamma=5/3$ ).

Chiamiamo "Evento 1" l'eruzione di Mt. Rainer ed "Evento 2" l'eruzione di Mt. Hood.

Dire se per il pilota dell'astronave l'Evento 1 avviene *prima, dopo o contemporaneamente* all'Evento 2.

Argomenta la tua risposta prima qualitativamente e poi quantitativamente, utilizzando sia le trasformazioni di Lorentz sia i diagrammi di Minkowski.

## Seconda versione

In questo problema, eventi e moti avvengono lungo la stessa direzione, parallela al terreno. Effetti di non inerzialità sulla superficie della terra possono essere trascurati. Il vulcano Rainer e il vulcano Hood, che distano 300 km in un sistema di riferimento fermo rispetto a loro, improvvisamente emettono un bagliore.

Un sismologo, che si trova fermo in un laboratorio esattamente a metà strada tra i due vulcani, riceve i segnali luminosi dell'eruzione dei due vulcani nello stesso istante.

Un assistente del sismologo si trova fermo in un laboratorio collocato alla base del Mt. Rainer, nello stesso istante della sua eruzione.

Un'astronave molto veloce sta volando dal Mt. Rainer al Mt. Hood ad una velocità costante pari a  $0,8c$  relativamente al terreno ( $\gamma=5/3$ ). Nell'istante in cui il Mt. Rainer emette luce, l'astronave si trova sopra questo vulcano e dunque il pilota percepisce immediatamente il bagliore.

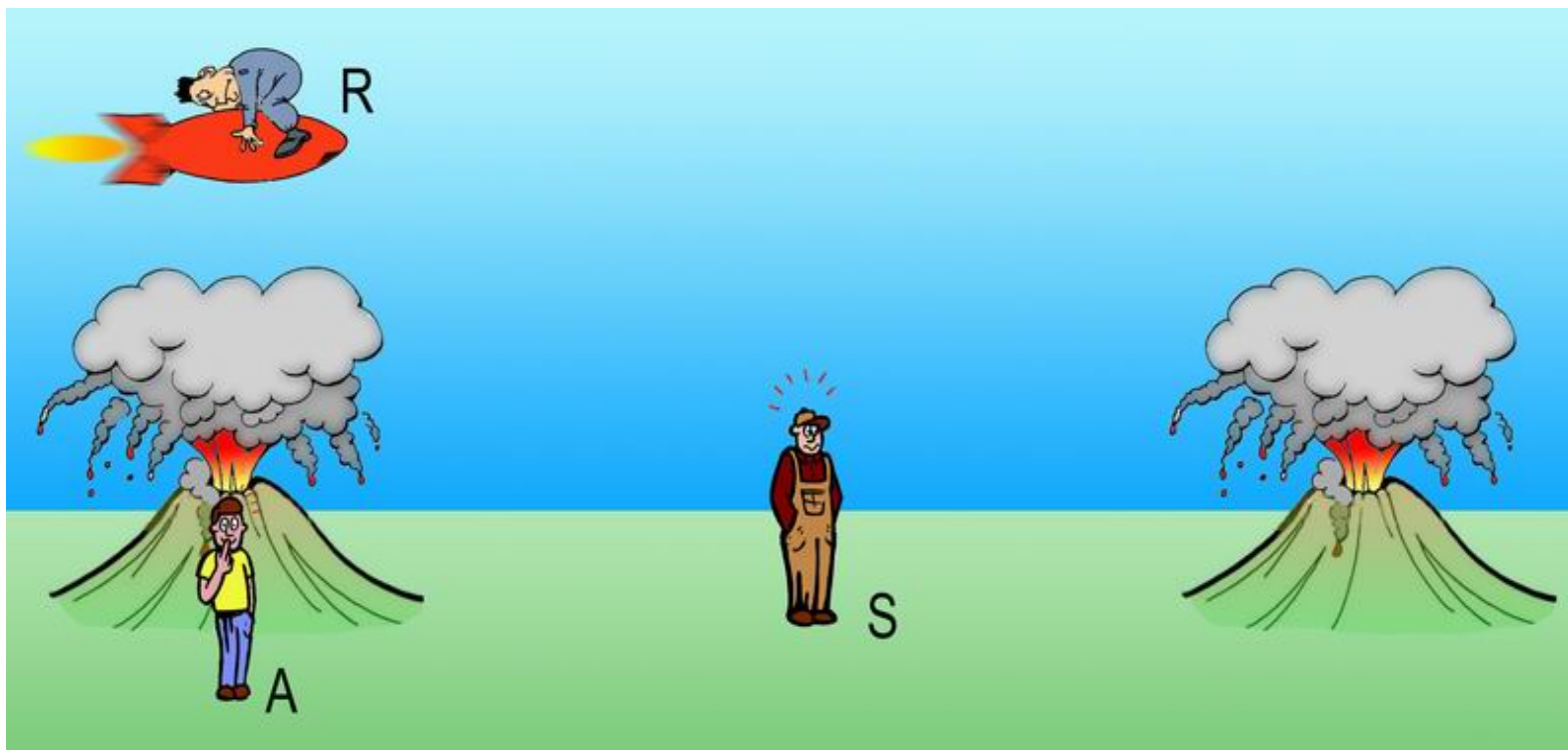
Chiamiamo “Evento 1” l'emissione istantanea del bagliore dal Mt. Rainer ed “Evento 2” l'emissione istantanea del bagliore dal Mt. Hood.

Tutti gli osservatori sono in grado di osservare la situazione in modo **scientificamente rigoroso** e cioè sono in grado di **valutare il tempo di tutti gli eventi** che avvengono nel loro sistema di riferimento.

Dire se per ogni osservatore menzionato (sismologo, assistente del sismologo, pilota dell'astronave) l'Evento 1 avviene *prima, dopo o contemporaneamente* all'Evento 2.

## La sfida per la classe IV H (as. 2003-2004):

Il “problema dei vulcani”



## Il problema dei vulcani

In questo problema, eventi e moti avvengono lungo la stessa direzione, parallela al terreno. Effetti di non inerzialità sulla superficie della terra possono essere trascurati.

Il vulcano Rainer e il vulcano Hood, che distano 300 km in un sistema di riferimento fermo rispetto a loro, improvvisamente emettono un bagliore.

Un sismologo, che si trova fermo in un laboratorio esattamente a metà strada tra i due vulcani, riceve i segnali luminosi dell'eruzione dei due vulcani nello stesso istante.

Un assistente del sismologo si trova fermo in un laboratorio collocato alla base del Mt. Rainer, nello stesso istante della sua eruzione.

Un'astronave molto veloce sta volando dal Mt. Reiner al Mt. Hood ad una velocità costante pari a  $0,8c$  relativamente al terreno ( $\gamma=5/3$ ). Nell'istante in cui il Mt. Reiner erutta, l'astronave si trova sopra questo vulcano e dunque il pilota percepisce immediatamente il bagliore dell'eruzione.

Chiamiamo “Evento 1” l'eruzione del Mt. Reiner ed “Evento 2” l'eruzione del Mt.Hood.

Tutti gli osservatori sono in grado di osservare i fenomeni in modo scientificamente rigoroso e cioè sono in grado di valutare il tempo di tutti gli eventi che avvengono nel loro sistema di riferimento.

Dire se per ogni osservatore menzionato (sismologo, assistente del sismologo, pilota dell'astronave) l'Evento 1 avviene *prima, dopo o contemporaneamente* all'Evento 2.

***Risposta a)***

Per il sismologo e l'assistente i due eventi avvengono simultaneamente. Per il pilota dell'astronave l'evento 2 avviene prima dell'evento 1. (risposta corretta)

***Risposta b)***

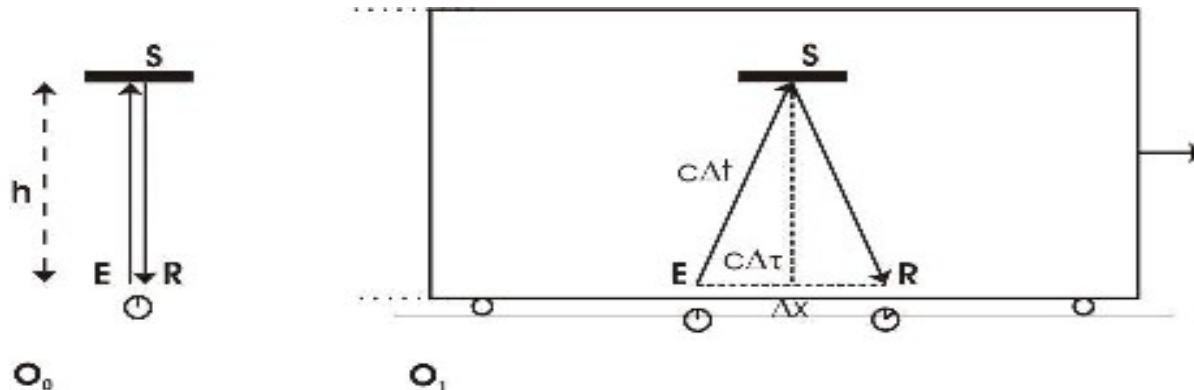
Per il sismologo i due eventi avvengono simultaneamente.

Per l'assistente e il pilota dell'astronave l'evento 1 avviene prima dell'evento 2. (risposta più frequente)

Spiegare perché la risposta a) è corretta e la b) risulta la più frequente.

Argomenta la tua interpretazione prima qualitativamente e poi quantitativamente, utilizzando le trasformazioni di Lorentz e/o i diagrammi di Minkowski.

## L' orologio a luce



Per Pitagora:

$$c\Delta t_1 = \sqrt{c^2\Delta t_0^2 + \Delta x_1^2}$$

da cui:

$$\Delta t_0 = \sqrt{\Delta t_1^2 - \Delta x_1^2 / c^2} = \Delta t_1 / \gamma \quad \text{con} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

e quindi:

$$\Delta t_0 < \Delta t_1$$

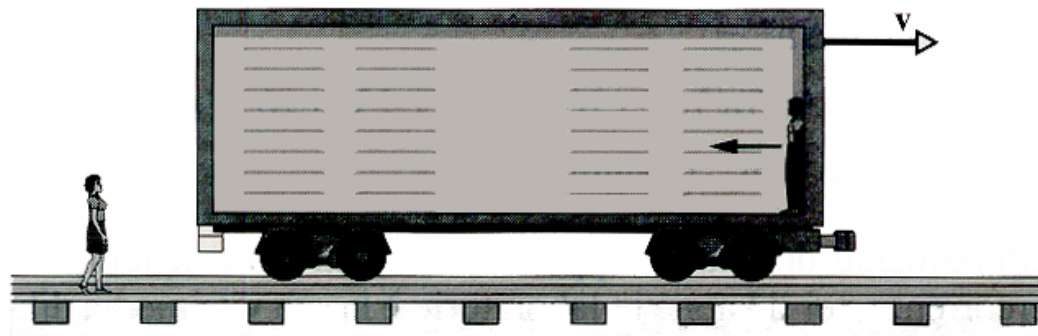
## Problema sul tempo proprio

(Halliday, Resnick, Walker, Fondamenti di Fisica, Zanichelli)

*Sei di fianco ai binari di una ferrovia e un treno ti passa davanti a velocità costante; dentro il treno uno sperimentatore invia un impulso di luce laser dal fronte verso il retro di un vagone.*

*a) Una tua misura della velocità del raggio laser in che rapporto è con la misura effettuata dallo sperimentatore che invia l'impulso?*

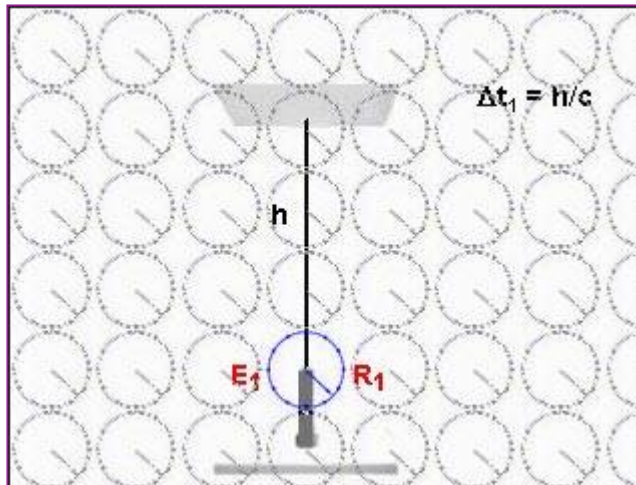
*b) Per lo sperimentatore la misura del tempo di percorrenza è un tempo proprio? Motiva le risposte.*



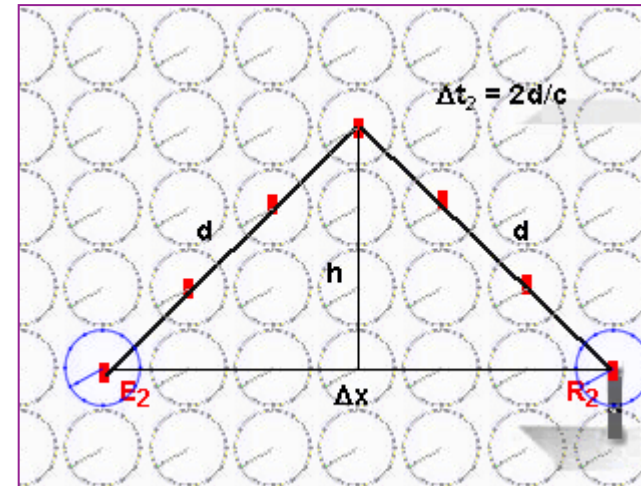


# La dilatazione dei tempi

In quiete

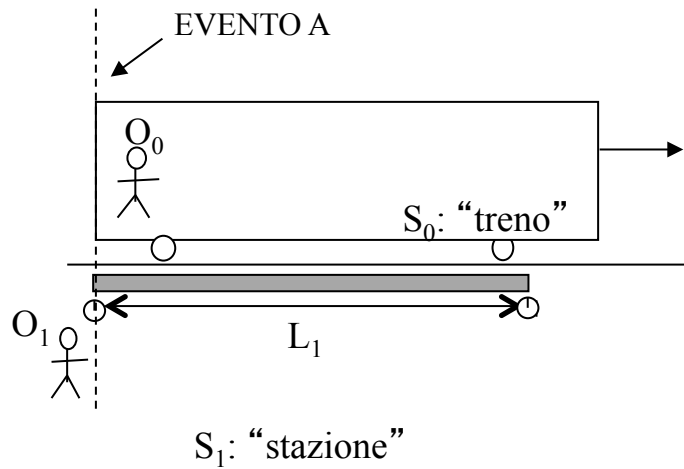


In moto

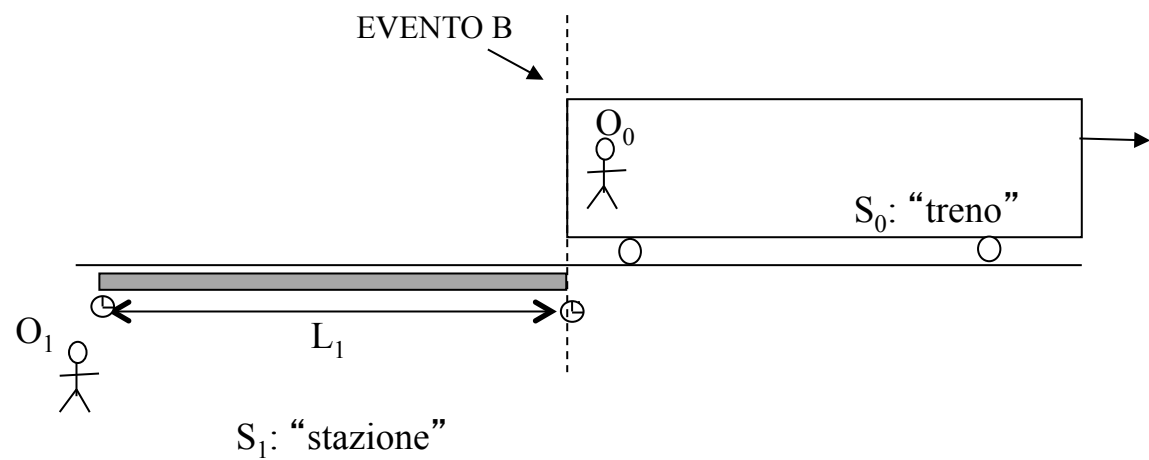


## DALLA DILATAZIONE DEI TEMPI ALLA CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

*Situazione fotografata all'istante in cui  
alla stazione gli orologi indicano  $t=0$*



*Situazione fotografata all'istante in cui per gli orologi della stazione è  
passato un tempo pari a  $\Delta t_1$*



$$L_1 = v \Delta t_1 = v (\gamma \Delta t_0) = L_0 \gamma$$

$L_1$  (lunghezza propria) >  $L_0$  (lunghezza non propria)

## ATTENZIONE AL SIGNIFICATO DEI VARI TERMINI!!!

$L_1$  è la lunghezza dell' asta misurata da  $O_1$  con un regolo (misura di **lunghezza propria**);

$\Delta t_1$  è l' intervallo tra gli eventi A e B misurato da  $O_1$  (tale intervallo coincide con l' intervallo di tempo impiegato da  $O_0$  a percorrere la distanza  $L_1$  (misura di **tempo non proprio**));

$\Delta t_0$  è l' intervallo di tempo misurato da  $O_0$  tra gli eventi A e B *coincidenti spazialmente* (misura di **tempo proprio**) e può essere ricavato formalmente da  $O_1$ , applicando la relazione 'nota'  $\Delta t_0 = \Delta t_1 / \gamma$  (calcolo di un **tempo proprio** a partire da una misura di **tempo non proprio**);

$L_0$  è la lunghezza dell' asta ricavata da  $O_0$  come quella lunghezza percorsa da un oggetto che si muove con velocità  $v$  nell' intervallo misurato  $\Delta t_0$  (calcolo di **lunghezza non propria**) o, eventualmente, misurata direttamente da  $O_0$  come la distanza tra i due eventi simultanei corrispondenti al passaggio dell' inizio e della fine dell' asta (misura di **lunghezza non propria**).

# **Riflessioni sulla prospettiva operazionista di Einstein: dimensione epistemologica**

## **Il mondo della Relatività Ristretta di Einstein**

C'è un mondo di fatti e i fenomeni.

E questo mondo di fatti e fenomeni si è sbriciolato in eventi e di loro relazioni spaziotemporali misurate da regoli e orologi.

Spazio e tempo diventano **INSCINDIBILI** (per misurare l'uno ho bisogno dell'altro)

***Scelta operazionista e relazionista!***

## **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

“[...] egli riconobbe che il significato di un termine dev' essere cercato nelle operazioni che si compiono quando si applica quel termine. Se il termine è tale da potersi applicare a situazioni fisiche concrete, come il termine 'lunghezza' o 'simultaneità', allora il significato dev' essere cercato nelle operazioni con le quali si determina la lunghezza di oggetti fisici concreti, o nelle operazioni con le quali si stabilisce se due eventi fisici concreti sono o non sono simultanei.

[...] Einstein eseguì un' analisi delle operazioni fisiche che si usano per misurare le lunghezze e i tempi più particolareggiata di quanto non fosse mai stato fatto prima. [...] Per esempio, l' analisi di Einstein portò alla luce il fatto che, *per misurare la lunghezza di oggetti in movimento, l' uso degli orologi è altrettanto necessario di quello dei regoli rigidi* [...]. Quando poi l' analisi di Einstein portò a pensare che si potessero immaginare *procedimenti diversi per misurare la lunghezza di un oggetto in moto*, [...] divenne possibile ammettere che *la lunghezza di un oggetto in movimento può non essere uguale alla sua lunghezza in stato di quiete.*”

(Bridgman , 1958)

“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).



## Far discendere dall'Olimpo dell'a-priori...

*“[...] L'oggetto di ogni scienza [...] è di coordinare le nostre esperienze e dar loro una sistemazione logica.*

*La sola giustificazione dei nostri concetti e dei sistemi di concetti sta nel fatto che essi servono a rappresentare il complesso delle nostre esperienze; oltre a ciò essi non hanno nessuna legittimità. Son convinto che i filosofi hanno avuto un'influenza dannosa sul progresso del pensiero scientifico, trasportando certi concetti fondamentali dal dominio dell'empirismo, dove essi erano sottoposti al nostro controllo, alle altezze intangibili dell'a-priori.*

*Ciò è particolarmente vero per i nostri concetti di tempo e di spazio, che i fisici sono stati obbligati dai fatti a far discendere dall'Olimpo dell'a-priori per adattarli e renderli servibili.”*

(Einstein, 1922)

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



Spazio e tempo intesi come oggetti  
fisici dotati di sostanzialità

*(contenitori)*

**‘SPAZIO E TEMPO  
SOSTANZIALI’**

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

*(insieme di relazioni formali)*

**‘SPAZIO E TEMPO  
RELAZIONALI’**

*Epicuro, Lucrezio*

***Newton***

*Minkowski*

*Wheeler*

*Aristotele*

*Cartesio, Leibniz, Mach*

***Einstein, Poincaré***

*Weinberg, Sciama*

## Lo spaziotempo contenitore di Minkowski



30 giugno 1905



21 settembre 1908

“[...] D’ ora innanzi, lo spazio in se stesso, e il tempo in se stesso, sono condannati a svanire **come pure ombre**, e solo **una sorta di unione tra i due conserverà una realtà indipendente**”

(Spazio e tempo, 1908)



... alla prossima volta!!!