

*Alberto Palazzi*

*La relatività  
da Lorentz a Einstein*

*Una guida per principianti,  
perplessi e scienziati sperimentali*

*il glifo ebooks*

ISBN ebook: 9788897527398

ISBN edizione cartacea: 9788897527404

Prima edizione: novembre 2017 (A)

Copyright © *il glifo*, novembre 2017

*www.ilglifo.it*

Tutti i diritti sono riservati.

# Indice

## INTRODUZIONE

### 1. NOZIONI PRELIMINARI

- 1.1 *Relatività ristretta e relatività generale*
- 1.2 *Misure dello spazio: il problema del regolo campione*
- 1.3 *Misure del tempo: il problema dell'orologio campione*
- 1.4 *Simultaneità e successione dei fenomeni nel tempo*
- 1.5 *Misure della velocità della luce*

### 2. ETERE, TEORIA ELETTROMAGNETICA E IPOTESI DI LORENTZ

- 2.1 *Teoria elettromagnetica e principio di inerzia*
- 2.2 *Problema della velocità come costante fisica*
- 2.3 *Il moto rispetto all'etere e l'esperimento Michelson e Morley*
- 2.4 *Propagazione delle onde elettromagnetiche*
- 2.5 *Teoria della relatività "fisica" di Lorentz*
- 2.6 *Fattore di contrazione di Lorentz*
- 2.7 *Trasformazioni galileiane e trasformazioni di Lorentz*
- 2.8 *Formula per la composizione delle velocità*
- 2.9 *Contrazione dello spazio e dilatazione del tempo: un equivoco ricorrente*
- 2.10 *Relatività della simultaneità e delle misure di tempo*
- 2.11 *Derivazione delle trasformazioni di Lorentz*

### 3. LA SOLUZIONE DI EINSTEIN

- 3.1 *Due postulati di Einstein*
- 3.2 *Sincronizzazione di orologi in sistemi distanti*
- 3.3 *Sincronizzazione di orologi distanti con mezzi diversi dalla luce*
- 3.4 *Le trasformazioni di Lorentz entrano in gioco*
- 3.5 *Domanda al lettore, e istruzioni*
- 3.6 *Sincronizzazione di orologi distanti con il mezzo della luce*
- 3.7 *ED1905 capitolo 1, "Definizione di simultaneità"*
- 3.8 *ED1905 capitolo 2, "Relatività di lunghezze e tempi"*
- 3.9 *ED1905 capitoli 3, 4 e 5, trasformazioni di Lorentz e conseguenze*
- 3.10 *Ricapitolazione dei paragrafi precedenti*

- 3.11 *ED1905 capitolo 6, applicazione all'elettrodinamica e invarianza delle equazioni di Maxwell*
- 3.12 *ED1905 capitolo 6, dettaglio riguardo all'elettrodinamica*
- 3.13 *Presupposti e conseguenze dell'applicazione delle trasformazioni di Lorentz all'elettrodinamica*
- 3.14 *Interpretazione secondo cui la dilatazione è convenzionale*
- 3.15 *Interpretazione secondo cui la dilatazione è apparente*
- 3.16 *Interpretazione secondo cui la dilatazione è reale*
- 3.17 *Bilancio delle tre interpretazioni*

#### **4. IL CONCETTO RELATIVISTICO DI MASSA: $E=mc^2$**

- 4.1 *Concetto di fotone, o quanto elettromagnetico*
- 4.2 *Nozioni di fisica elementare necessarie per comprendere  $E=mc^2$*
- 4.3 *Convertibilità tra massa ed energia*
- 4.4  *$E=mc^2$ : derivazione non relativistica di Rohrlich (didattica)*
- 4.5  *$E=mc^2$  e aumento di massa con la velocità*
- 4.6 *Massa, energia e velocità: derivazione non relativistica di Lewis (1908)*
- 4.7 *Massa, energia e velocità: problemi rivelati della concezione non relativistica*

#### **5. DILATAZIONE DI SPAZIO E TEMPO E PRINCIPIO DI INERZIA**

- 5.1 *Riformulazione del problema*
- 5.2 *Natura della contraddizione*
- 5.3 *Il conflitto tra interpretazione apparente e interpretazione reale della relatività*
- 5.4 *Interpretazione della relatività ristretta poco dopo il 1905*
- 5.5 *Transizione dall'interpretazione apparente a quella reale (1911)*
- 5.6 *Interpretazione realista della dilatazione attraverso la relatività generale (1918)*

#### **6. DISCUSSIONI DEI PARADOSSI DELLA RELATIVITÀ**

- 6.1 *Dopo Einstein*
- 6.2 *Il mesone  $\mu$*
- 6.3 *Geometria di Minkowski, spazio-tempo e linee di universo*
- 6.4 *Geometria di Minkowski e problema degli orologi*
- 6.5 *L'esperimento di Fizeau con l'acqua*

- 6.6 *L'esperimento Hafele-Keating e il sistema GPS*
- 6.7 *Problema della deduzione relativistica di  $E=mc^2$*

## **7. SUCCESSO DELLA RELATIVITÀ RISTRETTA E OPINIONI**

- 7.1 *Successo della teoria*
- 7.2 *Considerazioni (forse) ingenue sull'unità del tempo*
- 7.3 *Connessioni con la cultura del Novecento*
- 7.4 *Critiche razionali della relatività*
- 7.5 *Geometria non intuitiva dello spazio-tempo*
- 7.6 *Esperienza dell'autore di questo libro*

## **CONCLUSIONE**

## **BIBLIOGRAFIA**

## **QUARTA DI COPERTINA**

*Alberto Palazzi*

## ***Introduzione***

Esistono migliaia di libri che divulgano o espongono la teoria di Einstein con diversi livelli di complessità. Questa letteratura si è sviluppata a partire dal 1919, quando la teoria della relatività generale salì improvvisamente alla ribalta di una popolarità mondiale inaspettata per rimanervi ininterrottamente sino a oggi. Intorno al 1920, nel giro di un paio d'anni, furono pubblicate centinaia di divulgazioni<sup>1</sup> riguardanti sia la teoria della relatività ristretta, che risale al 1905, sia quella della relatività generale, elaborata da Einstein nei dieci anni successivi; poi è continuata senza interruzione una produzione di letteratura che espone sempre la stessa teoria con gli stessi argomenti e gli stessi mezzi espressivi. Il modo standard di descrivere la relatività ristretta è stato definito da autori diversi in un'epoca compresa grosso modo tra il 1911 e il 1925, ed è stato mantenuto fino ad oggi. Se a distanza di anni si scrivono libri nuovi molto simili ai precedenti ci deve essere qualche problema: in questa trattazione adottiamo una prospettiva diversa, con il fine di portare in evidenza il senso esatto della teoria della relatività ristretta, di consentire al lettore di giudicare in pieno la parte cinematica della teoria, quella che parla di spazi, tempi e orologi, e di dare soddisfazione al lettore facendogli comprendere anche come si può arrivare alla formula  $E=mc^2$ .

Nella letteratura relativistica troviamo tre specie di libri: introduttivi, divulgativi e specialistici. In ciascuna specie troviamo molte versioni simili tra loro: tutti i libri che sono stati scritti convergono verso gli stessi risultati, tutti procedono con lo stesso criterio. Chi ne ha consultati molti riconosce in ogni libro gli argomenti familiari e va in cerca della singola pagina o della singola osservazione che spera faccia luce su un

---

<sup>1</sup> Isaacson 2007, capitolo 12.

punto controverso e consenta di afferrare l'insieme della teoria: e questa è un'esperienza comune, perché a molti è capitato di avere fatto il tentativo di studiare la relatività, di avere afferrato lo schema del ragionamento e gli elementi della teoria, ma di essere rimasti perplessi sul nesso complessivo tra di essi. Ad ogni modo, specialmente per quanto riguarda la relatività ristretta, tutta la letteratura si può suddividere nei tre gruppi dei libri introduttivi, divulgativi e specialistici. Nel gruppo delle trattazioni di carattere introduttivo ci sono quelle più semplici, che sono meramente descrittive e servono per dare un'infarinatura della teoria, ma non possono né spiegare né far comprendere nulla: servono solo a creare nel lettore delle immagini, delle aspettative e delle curiosità su cui lavorare, rendendogli note le conclusioni della teoria, ma lasciandole inspiegate. I libri di questo gruppo sono tutto sommato superflui, perché ciò che possono insegnare si conosce già da filmati, trasmissioni televisive, voci di enciclopedia e articoli di giornale: insomma, dal sentito dire.

Il secondo gruppo delle trattazioni sviluppa i ragionamenti della teoria facendo uso di termini semplici e di pochissima algebra, ma quando i libri di questo tipo sono ben fatti, essi sono in grado di dare al lettore una conoscenza esatta della teoria. Questo perché la relatività ristretta, nella stessa trattazione di Einstein, non fa quasi uso di matematiche superiori, se non nella parte elettrodinamica dove ciò è indispensabile.

Il terzo gruppo delle esposizioni della teoria si rivolge all'istruzione universitaria e al pubblico specialista e perciò non può essere utilizzato dal lettore che si accosta ad esso senza una formazione specifica in fisica, matematica o ingegneria; tuttavia questo limite è molto meno rilevante di quello che si crederebbe per i lettori che non sono in grado di andare oltre il livello dei libri del secondo gruppo, perché la questione della relatività ristretta non è matematica: è logica. C'è uno

svolgimento che va seguito, e seguirlo non è facile, ma la matematica necessaria è quella della scuola, non quella dell'università.

Questo ci porta nel cuore del problema: tutta la letteratura relativistica ha il difetto di non esplicitare completamente le premesse e le assunzioni che si devono fare per comprendere la deduzione delle conseguenze, e in questo risiede la grande difficoltà che pressoché tutti provano di fronte alla teoria. Anzi, si è riscontrato spesso, e gli insegnanti lo confermano, che sono gli allievi più intelligenti, quelli che vogliono andare a fondo delle cose, ad avere difficoltà con la comprensione del nesso profondo tra gli elementi della relatività ristretta, mentre quelli che si accontentano di impossessarsi della chiave con cui ripetere certi giudizi e con cui applicare alcune formule matematiche non particolarmente complesse sono solitamente soddisfatti sia della teoria sia di se stessi. Prima di cominciare lo studio della relatività chi conosce l'argomento per sommi capi probabilmente partirà dall'opinione che la difficoltà della teoria risieda nel dover accettare la descrizione non euclidea dello spazio-tempo, andando contro abitudini consolidate da secoli. Dato ciò che si sa prima di assumere cognizioni precise questo sospetto è ragionevole e giustificato. Ma svolgendo con attenzione i dettagli vedremo che i concetti della teoria non presentano nessuna difficoltà in se stessi, e che la mancata comprensione dipende da un fattore completamente diverso e insospettato.

Questo libro è stato scritto per due tipi di lettori: quelli che conoscono come tutti le celebri immagini e suggestioni associate alla relatività ristretta e ne sono curiosi, ma non ne sanno nulla, se non per sentito dire o per avere letto qualche articolo o libro introduttivo, e quelli che ne conoscono i fondamenti per averli studiati in qualche testo di livello divulgativo o specialistico, ma non sono convinti di avere compreso e assimilato la concatenazione degli elementi della

teoria. Ci sono molti lettori e studiosi che si trovano in questa condizione anche dopo avere approfondito gli elementi tecnici della teoria: conoscono la teoria delle trasformazioni di Lorentz, la geometria di Minkowski, l'argomentazione a partire dalla teoria dello spazio-tempo della "formula più famosa del mondo",  $E=mc^2$ , ma sinceri con se stessi riconoscono di non essere convinti di avere afferrato in pieno la connessione tra le parti e la consistenza delle dimostrazioni.

Quindi questo libro descrive la teoria della relatività ristretta con la semplicità necessaria per poter essere capito dai lettori non specialisti, ai quali è richiesto solo di leggere con attenzione, ma al tempo stesso analizza la logica implicita all'argomentazione tipica della letteratura relativistica, e porta in luce le premesse che per lunga tradizione non vengono espresse con la chiarezza necessaria, e che perciò sono alla radice della difficoltà di comprensione della teoria. Questo libro è stato scritto tenendo conto sia dei bisogni dei principianti sia di quelli dei perplessi, che hanno cognizione della relatività ristretta ma sentono di non averla compresa. Perciò i lettori già al corrente degli elementi della teoria riconosceranno molti concetti a loro noti e leggeranno rapidamente o salteranno le esposizioni elementari delle cose che già conoscono, per soffermarsi sulle discussioni delle difficoltà.

Ovviamente, questo libro non è diretto a coloro che sanno di avere capito e assimilato la teoria e non avvertono il bisogno di alcun chiarimento.

Questo libro è in un certo senso un manuale pratico, che vi dà dei consigli per orientarvi in una materia in cui esso non può essere l'unica fonte: assimilato questo libro, il lettore sentirà la necessità di paragonarlo con la letteratura relativistica, nella quale a quel punto si sentirà a suo agio. Per quanto riguarda il metodo di lettura, tenete conto che in questo libro troverete poche figure e poche formule. Meglio però leggere tenendo a



portata di mano carta e penna per annotare qualche formula, fare qualche schema e disegnare qualche figura seguendo le istruzioni del testo. Poi, poiché la letteratura relativistica è sterminata e piena di ripetizioni delle stesse cose, ho scelto di ridurre al minimo lo spazio dedicato alle cose più note. Questo libro dovrebbe servire di introduzione e di guida alla lettura di altre trattazioni qualsiasi, di livello medio o specialistico, che potete leggere subito dopo avere finito questo, o anche di pari passo, passando alla trattazione specialistica dei singoli argomenti dopo avere assimilato l'introduzione alle idee di fondo che qui trovate espressa con chiarezza che non troverete altrove. Consiglio in particolare di leggere subito, in parallelo con questo libro, l'esposizione divulgativa della teoria scritta dallo stesso Einstein nel 1916, diffusissima e disponibile in numerose edizioni economiche.

Riguardo alla strutturazione logica dell'argomentazione della relatività ristretta, ci sono molte cose inedite ancora da dire e perciò questo libro dedica il minimo spazio possibile alla trattazione di ciò che è noto o è spiegato esaurientemente altrove. Questo libro dice esplicitamente tutto ciò che è necessario sapere prima di entrare nel meccanismo deduttivo della relatività ristretta, ma per le nozioni più semplici e pacifiche, perlopiù dati storici e fattuali su cui non vi sono né difficoltà né discussioni, spesso troverete l'indicazione "vedi Enciclopedia". Vuol dire che lì per approfondire ciò che potrebbe non esservi noto o chiaro vi è consigliato di sospendere la lettura di questo libro e dare un'occhiata alla materia in argomento nelle voci di qualsiasi enciclopedia. Anche Wikipedia andrà benissimo, ma con l'avvertenza di preferire le voci in inglese piuttosto che quelle in altre lingue.

Infine, a chi vuole ripassare la fisica della scuola prima di accingersi allo studio della relatività ristretta, consiglio un testo inglese elementare, *Understand Physics: Teach Yourself* di Jim Breithaupt, una lettura rapida, piacevole ed efficace. Ma

consiglio anche di leggere il libro scritto e pubblicato da Einstein nel 1938 in collaborazione con Leopold Infeld: *The Evolution of Physics: The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*. Il libro è disponibile in italiano, con il titolo *L'evoluzione della fisica* (Boringhieri). Questo libro di Einstein introduce al problema della relatività con totale chiarezza per quanto riguarda gli antecedenti. Ma passando alla relatività ristretta esso propone riflessioni e considerazioni su di essa che sono rilevanti per chi già conosce la teoria, senza riuscire ad essere un testo utile per chi vi si accosti per la prima volta. Perciò è consigliabile leggere le parti prima e seconda, dove sono esposte le precondizioni della relatività ristretta, prima di mettersi allo studio, e le parti terza e quarta dopo avere acquisito cognizione della teoria. Il libro di Einstein e Infeld è completo, tratta anche della relatività generale e accenna alla fisica quantistica dal punto di vista di Einstein, che come si sa non le era favorevole.

In genere è molto frequente il caso in cui la biografia dell'autore di una teoria è irrilevante; e di regola bisognerebbe concentrarsi sullo studio di una teoria mantenendo se stessi nell'ignoranza della biografia dell'autore per evitare di dare etichette psicologiche banali a ciò che non si riesce a capire. Ma nel caso di Einstein è indispensabile tenere strettamente conto del contesto della teoria, e perciò anche della biografia, per la quale faccio riferimento a un libro recente e alquanto voluminoso, *Einstein. His Life and Universe* di Walter Isaacson. Vedremo che nel caso di Einstein la storia della teoria è particolarmente rilevante per la comprensione della sua fortuna e del suo consolidamento come canone accettato dal mainstream della comunità scientifica. La teoria della relatività ristretta nacque per rispondere a un quesito molto specifico che nella maggioranza delle trattazioni viene ignorato del tutto, e in qualche altra trattazione viene relegato in secondo piano: constateremo che questo fatto pregiudica la comprensione della

catena deduttiva della teoria, ma comprenderemo anche per quale ragione sia avvenuto questo mutamento di prospettiva, che a prima vista dovrebbe apparire curioso. La teoria della relatività ristretta ha assunto rapidamente un significato molto diverso rispetto allo scopo originario, e vedremo perché.

Un'ultima informazione pratica: nel seguito le note al testo contengono solo i rimandi alla bibliografia, e quindi non è necessario leggerle se non volendo rintracciare le fonti delle informazioni. Le eventuali osservazioni marginali non sono in nota, ma sono incorporate nel testo.

# ***1. Nozioni preliminari***

## ***1.1 Relatività ristretta e relatività generale***

Mantengo la promessa fatta nell'introduzione e rimando il lettore all'Enciclopedia (qualsiasi Enciclopedia, o qualsiasi altra trattazione della materia) per le nozioni storiche preliminari. Accenno qui solo a quanto è indispensabile sapere.

Albert Einstein nacque nel 1879 a Ulm, nel meridione della Germania, e a causa di vicissitudini familiari visse gli anni della giovinezza in Italia e in Svizzera. La leggenda vuole che sia stato un cattivo studente, ma lo studio della biografia rivela invece che fu uno studente talora brillante, ma sempre ribelle e polemico nei confronti degli insegnanti. Interessante è sapere che, poiché il padre e lo zio erano imprenditori pionieristici nel campo delle installazioni elettriche, Einstein conobbe fin da giovane le proprietà delle apparecchiature elettriche e diede prova di saperne intuire le particolarità con grande e innata facilità: a sedici anni scrisse una memoria, dal contenuto convenzionale, sull'etere e la teoria elettromagnetica, e quindi su ciò che sarà il problema centrale della relatività ristretta, e alla stessa età era in grado di aiutare gli adulti nei calcoli per il dimensionamento delle apparecchiature elettriche<sup>2</sup>:

Einstein passò la primavera e l'estate del 1895 con i genitori nell'appartamento di Pavia e diede una mano all'azienda di famiglia. In quest'occasione si mostrò capace di comprendere con facilità il funzionamento dei magneti, degli avvolgimenti e dell'elettricità che ne viene generata. Ci fu un'occasione in cui lo zio Jakob si trovava in difficoltà con i calcoli di una nuova macchina, e Einstein si mise a lavorarci sopra. Lo zio poi raccontò a un amico: "dopo giorni che il mio assistente ingegnere e io ci rompevamo la testa, il giovane ha messo a posto tutto in un quarto d'ora. Sentiremo parlare di quel giovanotto".

---

<sup>2</sup> Isaacson 2007, capitolo 2.

Einstein prese un diploma con voti mediocri, a causa delle polemiche con gli insegnanti, al Politecnico Federale di Zurigo, e non gli fu facile trovare impiego: il suo carattere lo condusse a sperimentare la disoccupazione intellettuale, a quel tempo più rara di oggi. Infine trovò un impiego che era modesto, ma era retribuito circa il doppio degli stipendi allora usuali, presso l'Ufficio Federale Svizzero dei Brevetti, e nell'anno 1905 pubblicò quattro articoli in una rivista di primaria importanza, *Annalen der Physik*, diretta da Max Planck. Dei quattro articoli il quarto è un'appendice del terzo ed è lungo soltanto tre pagine.

L'anno 1905 per questa ragione è noto come "annus mirabilis" di Einstein, e i quattro articoli hanno i titoli:

*... fine dell'anteprima ...*

## *Quarta di copertina*

Tutti sanno che la teoria della relatività ristretta di Einstein contiene una teoria delle misure di tempo, che non sono più concepite come assolute, ma divengono relative allo stato di moto dell'orologio e al punto di vista di chi esegue le misure, e lo stesso accade alle misure di spazio. Tutti sanno anche che la teoria contiene la deduzione del fatto che una piccola massa materiale può convertirsi in un'enorme quantità di energia secondo una precisa relazione quantitativa.

Ma moltissimi che hanno provato a studiare la teoria non sono riusciti a capirla: eppure, per capire perfettamente la parte che riguarda le misure di tempo e spazio basta sapere cosa sono la velocità e la radice quadrata e per farsi un'idea semplificata ma chiara della parte che riguarda i concetti di massa ed energia basta ricordare la fisica elementare della scuola. Evidentemente qualcosa manca in tutti i numerosissimi libri che descrivono la relatività in modo semplice o a livello superiore.

Questo libro è scritto in modo diverso da ogni altro. L'esposizione rigorosa, ma chiarissima, metterà ogni lettore che sappia cosa sono la velocità e la radice quadrata in condizione di capire completamente e alla perfezione la teoria dello spazio-tempo e di giudicarla con la propria intelligenza. In più il lettore si farà un'idea chiara dell'equivalenza tra massa ed energia e della sua relazione logica con la teoria dello spazio-tempo.

Questo libro è stato scritto per i principianti e per i perplessi che hanno tentato senza successo lo studio della relatività ristretta: gli uni e gli altri arriveranno a comprendere proprio il senso esatto del celebre e difficile saggio in cui Einstein espose la teoria nel 1905, che nel libro viene commentato parola per parola. E tutti i lettori avranno un'idea più chiara della rilevanza della relatività per la cultura del Novecento.

*Alberto Palazzi*

Studio di storia e filosofia e progettista di algoritmi informatici per la soluzione di problemi di complessità superiore, l'autore di questo libro riunisce le competenze necessarie per l'analisi del significato scientifico della relatività e per la ricostruzione del contesto storico e antropologico in cui essa nacque e divenne un'istituzione del nostro mondo.