

Gli esperimenti mentali di Einstein

Gianni Comini – CISM

marzo 2018

Secondo Einstein

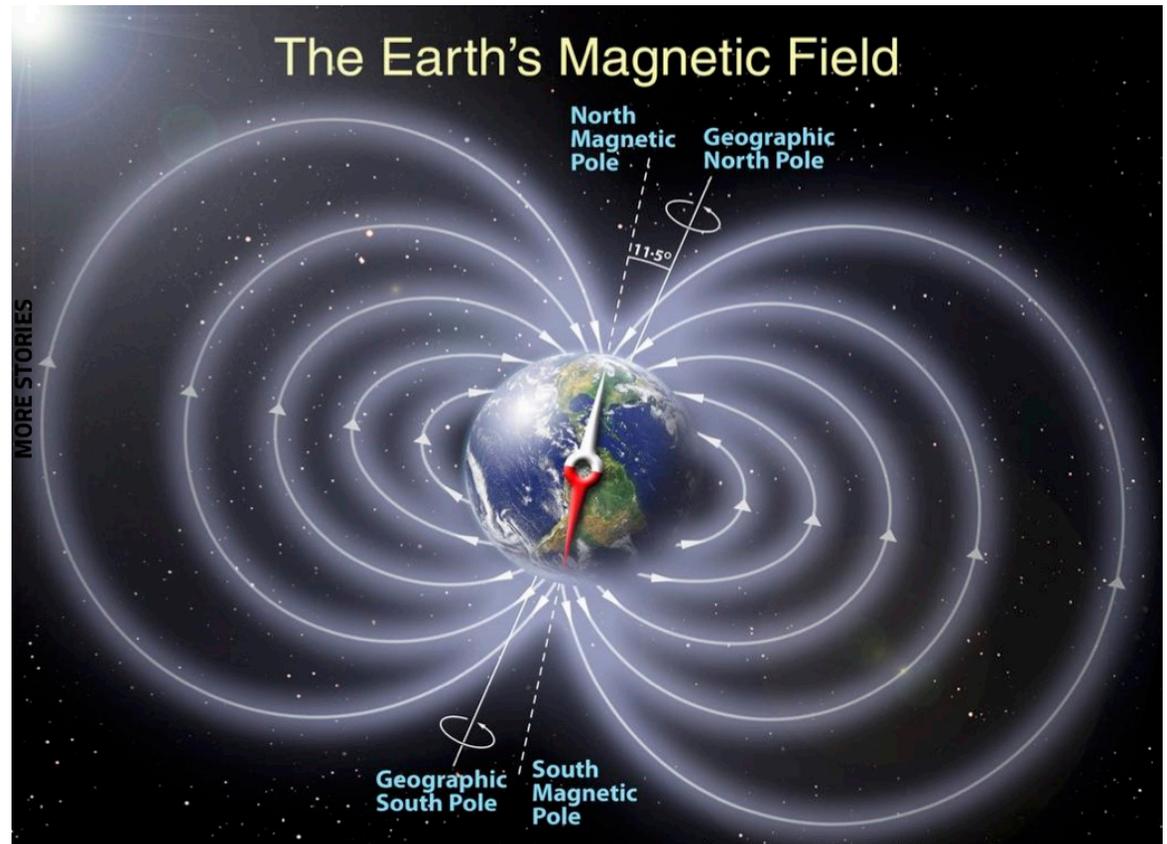
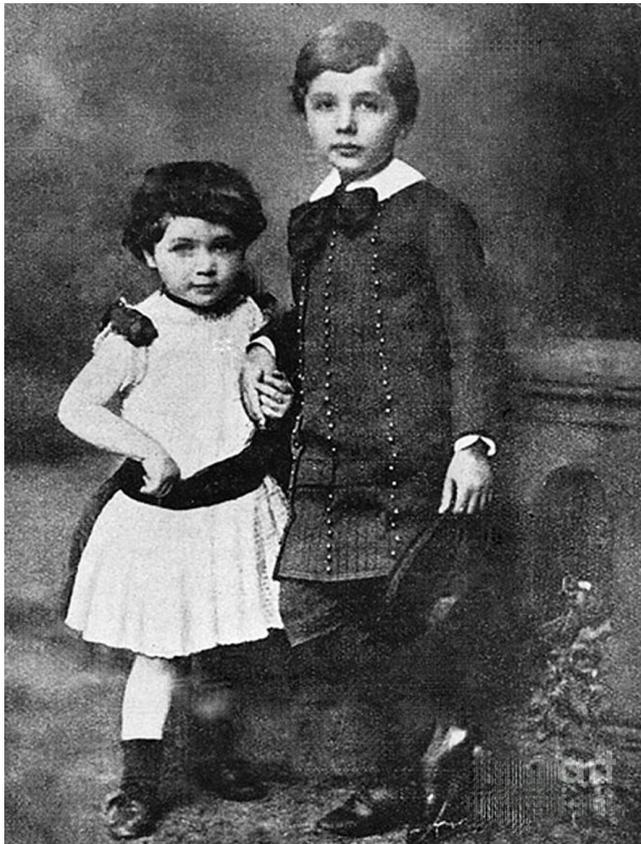
- “L’immaginazione conta più della conoscenza”.
- “La Teoria della Relatività va affrontata senza soffermarsi sugli aspetti matematici, ma privilegiando l’immaginazione guidata da esperimenti mentali”.
- Gli esperimenti, fisici o mentali che siano, devono, soprattutto, spingere ad “interrogarci senza pregiudizi quando un’esperienza nuova confligge con le conoscenze acquisite”

Conflitto tra esperienza e conoscenza



- Einstein non aveva ancora 5 anni ed era ammalato. Il padre, per distrarlo, gli regalò una bussola.
- L'ago si orientava sempre verso nord (esperienza), senza che nessuno lo toccasse (conoscenza).
- Einstein rimase molto turbato ma poi pensò che vi fosse qualcosa di nascosto e meritevole di essere indagato dietro i movimenti dell'ago.

Einstein a 5 anni (con la sorella Maja) e la “realtà nascosta”

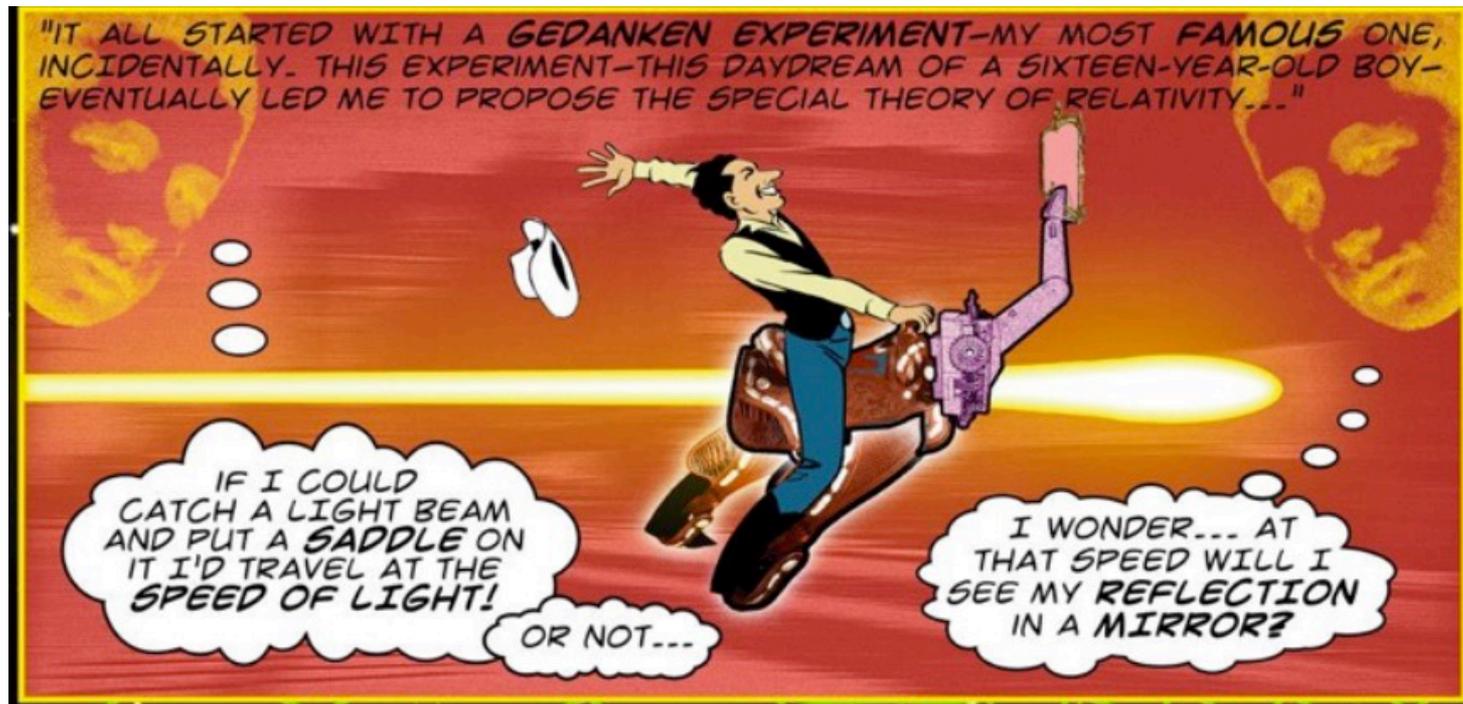


Einstein a 16 anni



- Aveva abbandonato la scuola secondaria a Monaco perché “il sistema educativo tedesco era rigido e nozionistico al punto da scoraggiare la creatività”, e si era iscritto ad Aarau in Svizzera in un Istituto noto per il “metodo Pestalozzi” che incoraggiava l’intuizione.
- Era carente nelle materie umanistiche ma, da autodidatta, aveva raggiunto un ottimo livello di preparazione in matematica e fisica.
- Gli scienziati del tempo pensavano che le onde elettromagnetiche, e quindi la luce, si propagassero nell’etere (anche se nessuno sapeva cosa fosse l’etere).
- Einstein sedicenne non credeva nell’esistenza dell’etere e per dimostrarlo ideò un esperimento mentale.

Inseguire un raggio di luce



Inseguire un raggio di luce fino a cavalcarlo farebbe sparire l'immagine dallo specchio fissato alla sella.

(Michelson e Morley avevano già dimostrato sperimentalmente che l'etere non esisteva ma il sedicenne Einstein, come molti ancora oggi, non conosceva l'esperimento. Del resto, chi non ha mai sentito che "i segnali radiotelevisivi sono trasmessi attraverso l'etere?").

Al Politecnico di Zurigo: 1897-1901



1898

- Nel 1901 ottenne la cittadinanza svizzera che lo metteva al riparo dal servizio militare Prussiano e
- conseguì anche il Diploma di Insegnante di Matematica e Fisica (ma non riuscì mai a trovare lavoro come insegnante nella scuola secondaria).
- Per mantenersi agli studi di dottorato all'Università di Zurigo accettò un posto di assistente tecnico all'Ufficio Svizzero dei Brevetti di Berna.

Il matrimonio con Mileva Maric -1903



Aveva incontrato la futura moglie al Politecnico (unica studentessa del suo corso) e, già nel 1897, si era legato a lei. Mileva era di nazionalità Serba ed era più vecchia di lui di 4 anni. Ebbero una figlia nel 1902 (che morì quasi subito) e, dopo il matrimonio civile del 1903, altri due figli: nel 1904 Hans Albert (che divenne professore di ingegneria idraulica al Caltech e a Berkeley), e nel 1910 Eduard (che, in giovane età, fu travolto dalla schizofrenia).

L'impiegato dell'Ufficio Brevetti - 1905

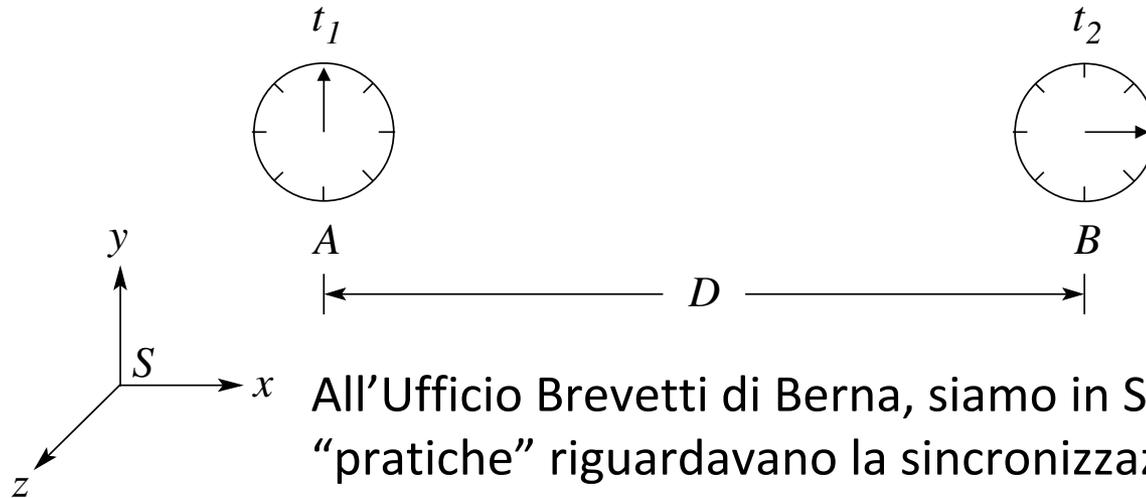


- Rifletteva sul concetto di tempo ed era convinto non esistesse un tempo assoluto (newtoniano) uguale per tutti i sistemi di riferimento.
- Da buon empirista, pensava che la conoscenza potesse derivare solo dall'esperienza.

“Tutte le nostre asserzioni sul tempo sono sempre asserzioni su eventi simultanei. Quando dico che quel treno è arrivato alle 7 significa che l'arrivo del treno e il posizionamento della lancetta piccola del mio orologio sulle 7 sono stati eventi simultanei...”

“Per collegare temporalmente due eventi che abbiano luogo in due posti diversi dello stesso sistema di riferimento è necessario disporre di due orologi **sincronizzati**”.

La sincronizzazione degli orologi



All'Ufficio Brevetti di Berna, siamo in Svizzera, molte "pratiche" riguardavano la sincronizzazione di orologi in aree vaste S utilizzando segnali luminosi.

Da A si invia un segnale a B e B sincronizza il suo orologio tenendo conto del tempo di percorrenza: $\Delta t = AB/c = D/c$.

Successivamente, per informare A di un evento in B si invia un segnale ed A tiene conto del tempo di percorrenza: $\Delta t = BA/c = D/c$.

Il procedimento può funzionare solo se la velocità della luce non cambia nei due percorsi AB e BA anche se il sistema S si muove. (Gli orologi "fermi" si muovono a causa della rotazione e rivoluzione della Terra).

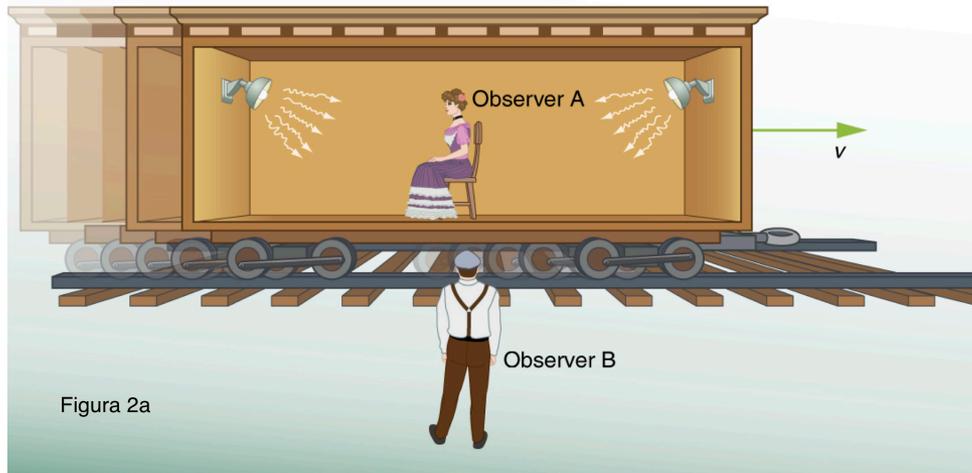
Costanza della velocità della luce c

- L'esperimento mentale della cavalcata di un raggio di luce e l'esperimento fisico di Michelson e Morley (del quale, nel frattempo, Einstein era venuto a conoscenza) avevano dimostrato che la propagazione della luce non era legata ad alcun supporto fisico, reale o inventato come l'etere.
- La necessità di sincronizzare gli orologi mediante segnali luminosi, emersa all'Ufficio Brevetti, portarono Einstein ad assumere come **postulato** che:
- **La luce nello spazio vuoto si propaga sempre con la stessa velocità c (dal latino celeritas) indipendentemente dal moto dei corpi emittenti.**

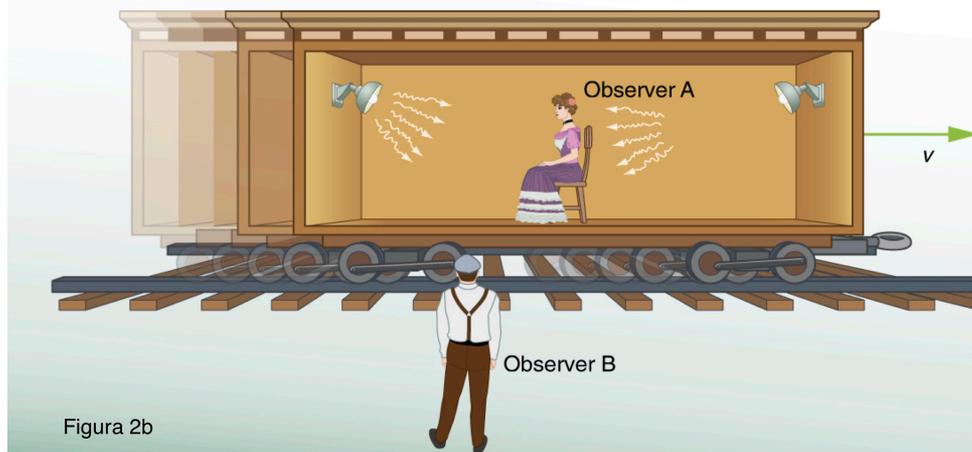
La Relatività Speciale

- Il nome implica che la costanza della velocità della luce comporta la “relatività” dei concetti classici di simultaneità, tempo e lunghezza (con, amo pensare, gran divertimento di Einstein).
- L’aggettivo significa che la teoria è “speciale” in quanto limitata ai soli sistemi in moto rettilineo a velocità costante.

La simultaneità diventa relativa



La viaggiatrice A fa partire simultaneamente due lampi di luce quando si trova in corrispondenza dell'osservatore sulla banchina e, per simmetria, vede arrivare simultaneamente i due lampi.

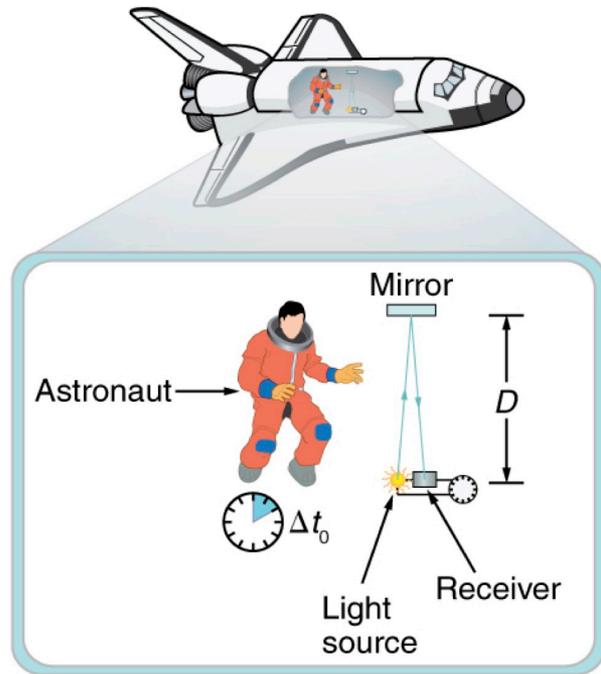


L'osservatore B non è d'accordo perché, a causa del movimento del vagone vede arrivare prima il lampo partito dalla parete anteriore (dal momento che il moto di A in quella direzione accorcia il percorso).

La reciprocità

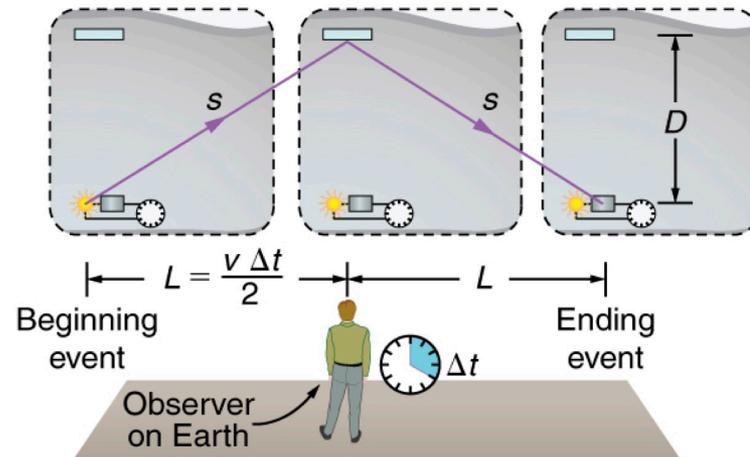
- **Non esistono sistemi di riferimento (ovvero “punti di vista” privilegiati).**
- Secondo la passeggera il vagone è fermo mentre la banchina scorre (verso sinistra nella figura) con velocità v .
- Se al passaggio del treno, l'osservatore accendesse simultaneamente sulla banchina due lampioni (da lui equidistanti: uno a sinistra e uno a destra), vedrebbe arrivargli le due luci nello stesso istante, ma la passeggera vedrebbe arrivare all'osservatore prima la luce di sinistra (verso la quale lo vede muoversi) e dopo quella di destra.

Il tempo diventa relativo



(a)

Figura 3

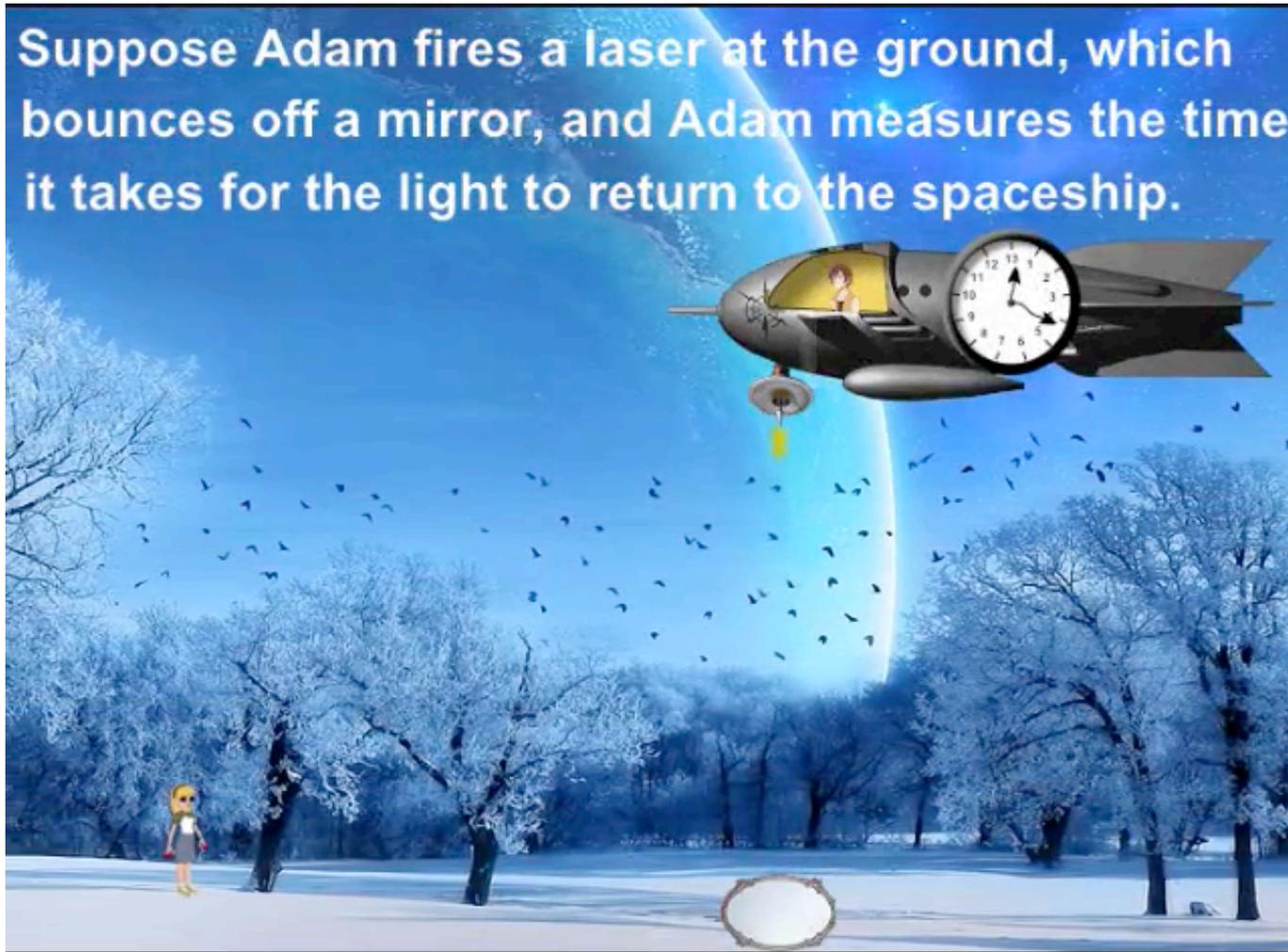


(b)

- (a) In questa versione modernizzata dell'esperimento mentale l'astronauta misura il tempo $\Delta t_0 = 2 D/c$ impiegato dalla luce nel percorso emettitore-specchio-ricevitore. (Il tempo è "proprio" ed ha pedice 0 in quanto misurato con un solo orologio).
- (b) L'osservatore a Terra vede un percorso della luce più lungo e, usando i segnali di due orologi sincronizzati posti uno all'inizio e uno alla fine del percorso, misura un tempo $\Delta t = 2 S/c > \Delta t_0$ (che, valutato con due orologi, non è un tempo "proprio").

Rivediamolo in film...

Suppose Adam fires a laser at the ground, which bounces off a mirror, and Adam measures the time it takes for the light to return to the spaceship.



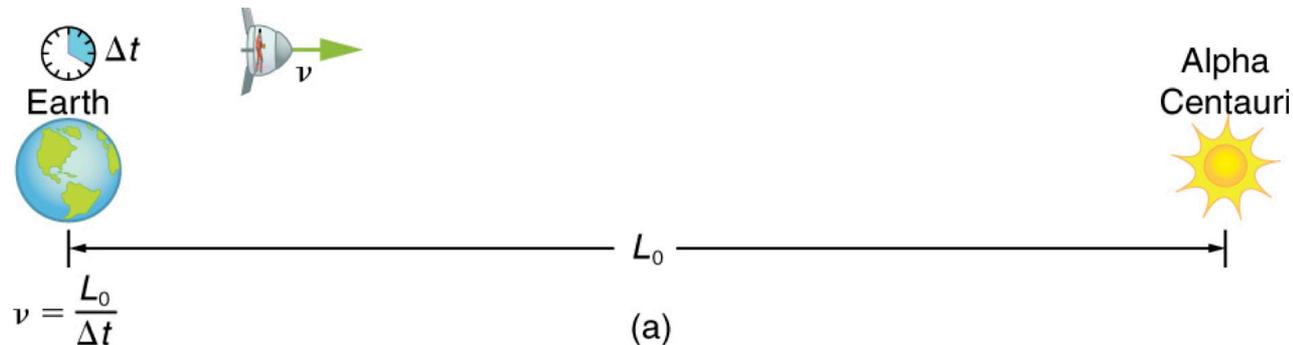
Il tempo dopo Einstein

- Nel sistema “astronave” il tempo scorre più lentamente di quanto scorra nel sistema “Terra”.
- Il rapporto tra i tempi si ricava dalla proporzione

$$\Delta t / \Delta t_0 = S/D = \gamma$$

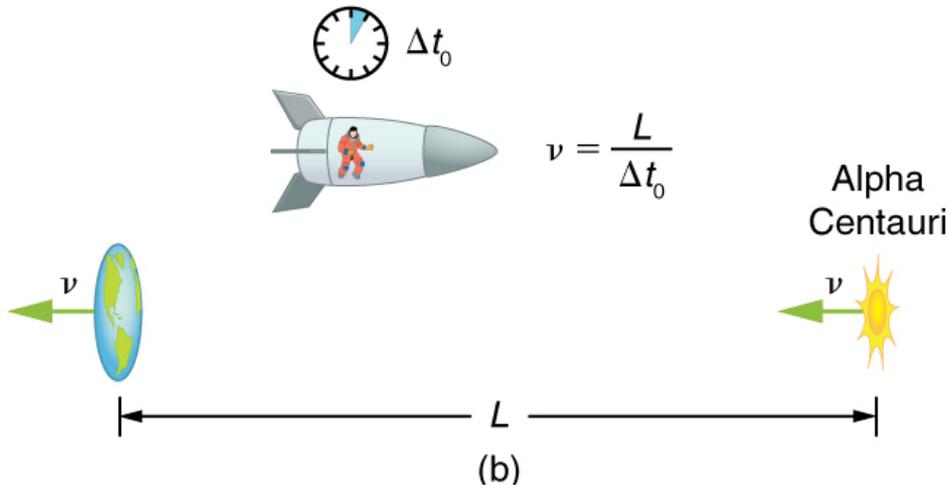
- Il rapporto S/D tra ipotenusa e cateto di un triangolo rettangolo e, quindi, γ sono sempre maggiori di 1 e crescono all'aumentare di v/c (rapporto tra velocità v dell'astronave e velocità della luce c).
- Applicando il teorema di Pitagora, con $v/c = 0,00005$ (sonde Voyager) si trova $\gamma \approx 1$ ma con $v/c = 0,99$ (particelle accelerate dal CERN o, forse, astronavi di un futuro lontano) si può avere $\gamma = 10$.
- Per la reciprocità, l'astronauta è convinto (e dal suo punto di vista ha ragione), che il tempo scorra più lentamente per l'osservatore fermo sulla Terra: “l'erba del vicino è sempre più verde”.

La lunghezza diventa relativa: da Terra



- In questa versione modernizzata dell'esperimento mentale ci si riferisce al Progetto NASA (annunciato il 12 dicembre 2017) di realizzare un mezzo di trasporto interstellare in grado di raggiungere Alfa Centauri entro il 2069 viaggiando a $v/c = 0,1$ (e, quindi, partendo circa 44 anni prima per la destinazione che si trova a 4,365 anni-luce).
- Durante il viaggio il centro di controllo misura (con un solo telescopio munito di goniometro) la lunghezza propria del percorso L_0 e, con due orologi sincronizzati (uno alla partenza e uno all'arrivo), il tempo di viaggio Δt .
- Ciò consente di calcolare la velocità relativa $v = L_0/\Delta t$ e di comunicarne il valore all'astronauta.

La lunghezza diventa relativa: astronauta



Premessa: nemmeno i “blogger” più agguerriti hanno mai messo in dubbio che la velocità relativa v di due sistemi sia uguale per entrambi i sistemi.

- L’astronauta misura il tempo proprio del viaggio Δt_0 con un solo orologio sull’astronave e, da bravo ingegnere, calcola $L = v \Delta t_0$ dove $v = L_0/\Delta t$ (informazione fornita da Terra).
- Grazie ai suoi studi trova anche $L = (\Delta t_0/\Delta t) L_0 = (1/\gamma) L_0$ ed essendo $\gamma > 1$ conclude che $L/L_0 < 1$.
- A questo punto è contento perché, per lui, il percorso è più breve di quanto misurato dalla Terra.

La lunghezza dopo Einstein

- **Le lunghezze in movimento si contraggono.**
- Per l'astronauta sono la Terra e Alfa Centauri a muoversi e L è più corta di L_0 .
- Tutti gli oggetti in moto si contraggono: per la reciprocità sia l'astronave vista da Terra in (a), sia la stessa Terra e Alfa Centauri viste dall'astronave in (b).
- Con $v/c = 0,1$ (obiettivo NASA per il 2069) si ha $1/\gamma \approx 0,95$ e il percorso è abbreviato del 5%.
- Con $v/c = 0,99$ si avrebbe $1/\gamma = 0,1$ e si completerebbe il percorso in un tempo proprio di $0,4365/0,99 = 0,4409$ anni.
- Al centro di controllo però passerebbero 4,4 anni!
- Niente male per quanto previsto da una teoria (ormai super confermata) formulata nel 1905 da un impiegato ventiseienne dell'Ufficio Svizzero dei Brevetti di Berna.

Dall'Ufficio Brevetti al "precariato" all'Università



Nel 1905, che è il suo anno "magico", oltre alla Tesi di Dottorato, Einstein pubblicò 4 articoli a contenuto fortemente innovativo riguardanti 3 aree differenti della Fisica:

- "Elettrodinamica dei corpi in movimento" nel quale espose la Relatività Speciale;
- "L'inerzia di un corpo dipende dalla sua energia?" nel quale derivò la relazione $E = m c^2$;
- "Movimento di piccole particelle nei liquidi a riposo" nel quale spiegò il moto browniano e

- "Punto di vista euristico sulla produzione e trasformazione della luce" (premiato con il Nobel nel 1921) nel quale spiegò l'effetto fotoelettrico nei metalli utilizzando il concetto di quanto e dimostrandone così la validità.

Tuttavia nemmeno dopo l'anno magico trovò un posto di insegnante e così rimase all'Ufficio Brevetti dove fu promosso "funzionario di seconda classe" in quanto aveva conseguito il Dottorato.

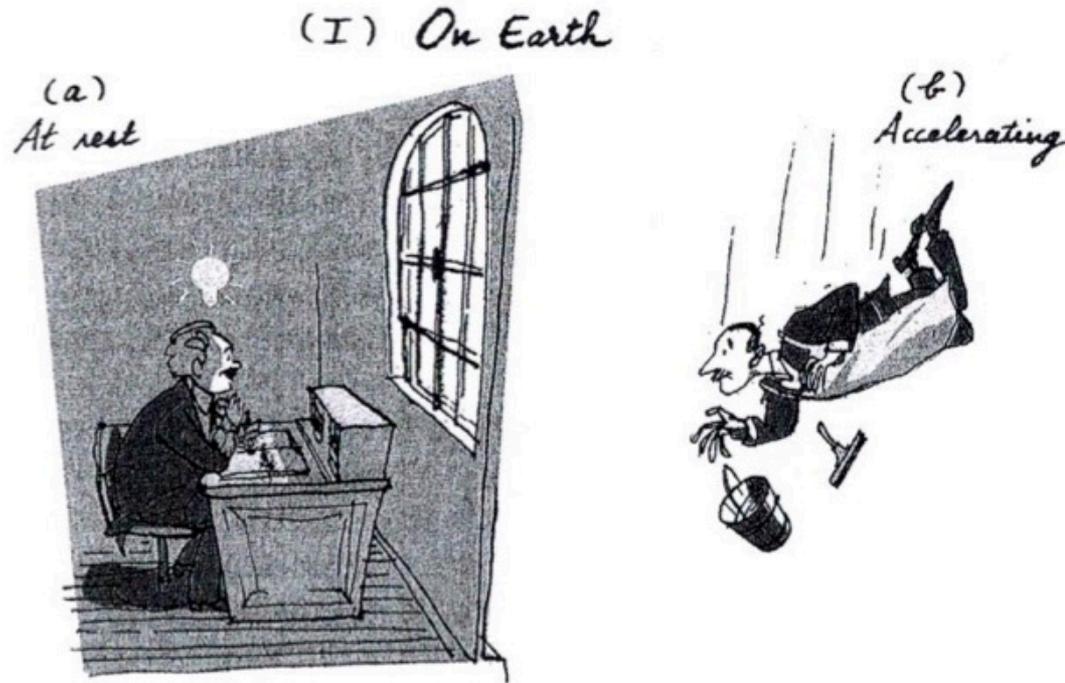
Così fan tutti

- Nel 1907 Einstein chiese l'abilitazione alla libera docenza all'Università di Berna, allegando alla domanda 17 lavori (inclusi i due sulla relatività speciale e quello sull'effetto fotoelettrico, successivamente premiato con il Nobel).
- La domanda fu respinta il 17 giugno 1907 in quanto il "richiedente" non aveva presentata, ritenendola giustamente superflua nel suo caso, la "tesi di abilitazione" (ovvero un lavoro non ancora pubblicato che la commissione avrebbe dovuto valutare).
- L'anno successivo Einstein si piegò alla burocrazia e scrisse la tesi di abilitazione, ottenendo così la nomina a *Privatdozent* il 27 febbraio 1908.
- La docenza "libera" consentiva solo di tenere corsi all'Università pagati da chi li frequentava, ed Einstein riuscì ad attrarre pochi studenti (tre, in realtà, e tutti colleghi dell'Ufficio Brevetti).
- Rimase allora all'Ufficio Brevetti fino al 1909 quando, quattro anni dopo aver rivoluzionato la fisica, fu finalmente nominato professore associato di fisica teorica all'Università di Zurigo.

La Relatività Generale

- Dopo il 1905 Einstein non riposò sugli allori (del resto, al momento, negati), ma si pose l'obiettivo di arrivare ad una nuova teoria, successivamente definita "Relatività Generale" in quanto
- **completava la relatività speciale estendendone i principi ai sistemi che si muovono con moto accelerato uno rispetto all'altro** e, soprattutto,
- **formulava una nuova teoria della gravitazione.**
- Il completamento della Relatività Speciale avvenne improvvisamente nel 1907 grazie ad una intuizione fisica concretizzata, ancora una volta, in un esperimento mentale.
- Per arrivare ad una nuova teoria della gravitazione, al contrario, furono necessari 8 anni di duro lavoro in quanto dovette ricorrere a concetti geometrici astratti e ad un apparato matematico complesso come il calcolo tensoriale.

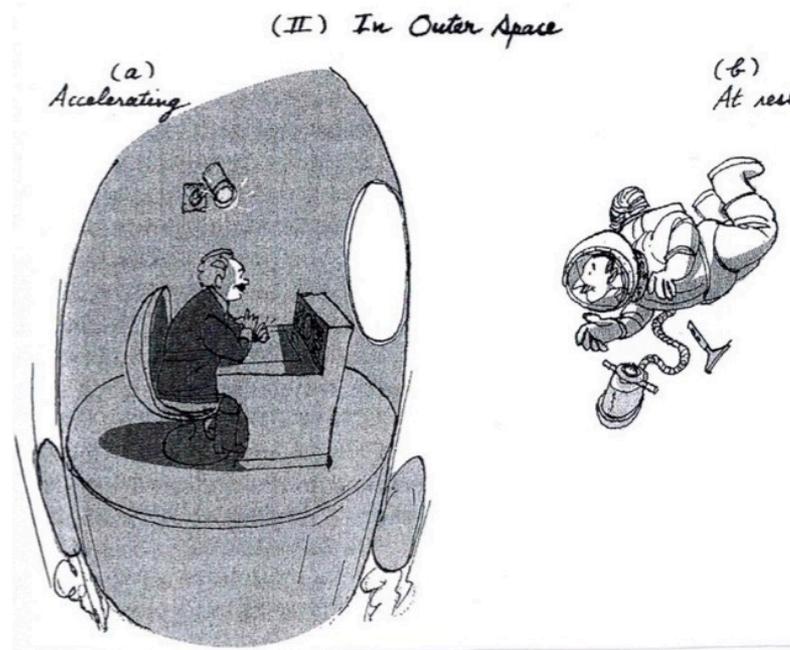
L'uomo che cade dal tetto - 1907



“Ero seduto sulla mia sedia all’Ufficio Brevetti quando, all’improvviso, pensai che se una persona fosse scivolata dal tetto non avrebbe avvertito il suo peso durante tutta la fase di caduta. Questa semplice idea mi fece un’impressione profonda, e divenne la base della mia teoria della gravitazione”.

(Noi, forse, avremmo pensato al “dopo caduta” ma, evidentemente, la genialità ha categorie diverse).

Ribaltiamo la situazione...



L'esperimento mentale prosegue immaginando l'ufficio (dotato di razzi propulsori) e il malcapitato (vestito da astronauta) traslati nello spazio profondo. L'ufficio può muoversi con moto uniformemente accelerato rispetto allo spazio ed Einstein non si accorge del cambiamento purché si abbia : $a = -g$. Infatti, gli oggetti cadono dalla scrivania e il malcapitato va verso il basso con accelerazione g mentre, su una bilancia, Einstein leggerebbe un valore del proprio peso uguale a quello misurato sulla Terra.

Principio di equivalenza

Dall'esperimento mentale segue che

- **Un campo gravitazionale omogeneo è completamente equivalente ad un sistema in moto uniformemente accelerato.**
- **Poiché la Relatività Speciale vale in presenza di campi gravitazionali, la validità deve continuare anche nel caso di sistemi in movimento accelerato uno rispetto all'altro.**

Il trionfo accademico

- Dopo gli inizi stentati, fama e stima dei Fisici di tutto il Mondo erano talmente cresciute che la velocità di avanzamento nella carriera universitaria di Einstein divenne, a dir poco, stupefacente.
- Nel 1911 fu nominato professore ordinario nella sezione in lingua tedesca dell'Università Carolina di Praga (la più antica università centro-europea) e nel 1912 fu chiamato al Politecnico di Zurigo.
- Nel 1914 fu nominato direttore dell'Istituto di Fisica Kaiser Wilhelm (oggi Max Planck) di Berlino, nonché professore all'Università Humbolt sempre di Berlino (e, raro riconoscimento per un docente di appena 35 anni, fu dispensato dalla maggior parte degli obblighi didattici).
- Nello stesso anno fu accolto all'Accademia Prussiana delle Scienze dove nel 2015 presentò una serie di memorie sulla Relatività Generale e, nel 1916 (l'anno in cui pubblicò il lavoro di sintesi "Fondamenti della teoria della Relatività Generale") fu nominato Presidente della Società Tedesca di Fisica.

Il resto della biografia di Einstein può essere letto nella relazione sul sito web. Nel frattempo...

Grazie per l'attenzione