

GLI ESPERIMENTI MENTALI DI EINSTEIN

Gianni Comini

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

marzo 2018

1 Introduzione

Gli esperimenti mentali sono stati usati dai più grandi fisici di ogni tempo. Galileo Galilei (1564-1642), ad esempio, attraverso l'esperimento mentale de "Il Gran Navillio", aveva dimostrato che le leggi della meccanica valgono inalterate in tutti i sistemi in moto rettilineo uniforme e, di conseguenza, che non esiste alcun esperimento in grado di decidere quale di questi sistemi sia fermo o in movimento. Successivamente, restando nell'ambito della meccanica Isaac Newton (1643-1727), attraverso l'esperimento mentale de "Il Gran Cannone", aveva dimostrato l'universalità della gravitazione in quanto forza che fa cadere le mele dal loro albero ma rende anche possibile il moto planetario.

Rispetto a quelli del passato, gli esperimenti mentali di Albert Einstein (1879-1955) spiccano per la chiarezza delle immagini proposte, capaci di sconvolgere la "meccanica classica" senza nemmeno ricorrere a spiegazioni verbali. Lo stesso Einstein, del resto, con l'aforisma "l'immaginazione conta più della conoscenza" aveva suggerito di non soffermarsi sugli aspetti matematici della Teoria della Relatività, ma di privilegiare l'immaginazione guidata da esperimenti mentali del tipo di quelli da lui proposti. Aveva poi aggiunto che gli "esperimenti", mentali o fisici che siano, devono spingere ad "interrogarci senza pregiudizi quando un'esperienza nuova confligge con le conoscenze acquisite".

A questo proposito, nella sua autobiografia aveva scritto che il conflitto tra esperienza e conoscenze acquisite gli si era presentato molto presto: aveva meno di cinque anni ed era ammalato quando il padre, per distrarlo, gli regalò una bussola. L'ago della bussola si orientava sempre verso "nord" (esperienza) senza che nessuno lo toccasse (conflitto con le conoscenze acquisite fino a quel momento). Einstein ricorda di aver pensato che vi fosse qualcosa di nascosto e meritevole di essere indagato dietro i movimenti dell'ago. (Ovviamente la "realtà nascosta" era il già scoperto campo magnetico terrestre, ma un bambino di nemmeno cinque anni poteva solo interrogarsi sull'inaspettato fenomeno).

2 Il ragazzo che inseguiva i raggi di luce

Nel 1895, a sedici anni, Einstein aveva appena abbandonato la scuola secondaria a Monaco, in Germania poiché, a suo giudizio, il sistema educativo tedesco era rigido e nozioni-

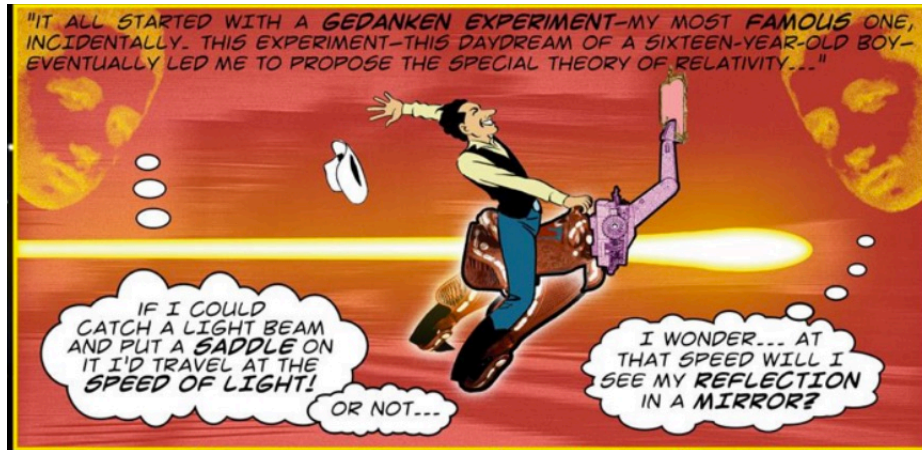


Figura 1: Inseguire un raggio di luce fino a raggiungerlo e cavalcarlo [I. Gamow e S. Steele, *Calling Dr. Einstein*, Big Bang Production, 2012].

stico al punto da scoraggiare la creatività degli allievi. Aveva anche convinto la famiglia, che nel frattempo si era trasferita in Italia, a lasciarlo proseguire la scuola ad Aarau, in Svizzera, in un Istituto noto per un sistema educativo (il metodo Pestalozzi) che incoraggiava l'intuizione degli allievi. Per la sua età Einstein, pur carente nelle materie umanistiche, aveva (va da sé) un ottimo livello di preparazione in matematica e, soprattutto, in fisica che già lo mettevano in grado di affrontare, in autonomia, argomenti piuttosto avanzati.

Verso la fine del 1800 non si dubitava del fatto che tutte le onde richiedessero un mezzo per propagarsi: le onde dell'oceano l'acqua, le onde sismiche il terreno, e così via. Si constatava poi che la velocità di propagazione delle onde era una velocità relativa rispetto al mezzo in cui si propagavano. Pertanto era naturale, per gli scienziati del tempo, aspettarsi che anche le onde elettromagnetiche si propagassero in un mezzo che veniva chiamato "etere" (per quanto nessuno avesse idea di cosa l'etere fosse).

Al contrario, Einstein sedicenne era turbato dall'ipotesi di esistenza dell'etere e, per dare concretezza alla sua perplessità, aveva immaginato di inseguire nell'etere un raggio di luce fino a raggiungerlo ed a cavalcarlo su una speciale sella. In tal caso il "cavaliere" si sarebbe mosso ad una velocità v pari alla velocità della luce c (dal latino *celeritas*) ed avrebbe visto l'onda elettromagnetica ferma (diremmo noi: come un surfista che cavalca un'onda dell'oceano). Le conseguenze sarebbero state abbastanza paradossali: c sarebbe stata la velocità assoluta rispetto all'etere e, di conseguenza, la velocità relativa del raggio rispetto a al "cavaliere" sarebbe stata pari a

$$c - v = 0$$

In Figura 1, l'immagine della scena non avrebbe mai raggiunto uno specchio fissato sul davanti della sella (e, diremmo noi: il "cavaliere" non avrebbe potuto farsi un "selfie" da postare su Facebook per immortalare la straordinaria impresa).

Per la verità, nel 1895 erano già passati circa 8 anni dall'esperimento fisico di Michelson e Morley che aveva dimostrato, in maniera inconfutabile, l'impossibilità dell'esisten-

za dell'etere. Dell'etere dell'epoca resta, comunque, ancora una traccia nel linguaggio comune quando si dice che "i segnali radiotelevisivi sono trasmessi attraverso l'etere" e, di conseguenza, è comprensibile che, come molti ancor oggi, l'Einstein sedicenne non fosse a conoscenza dell'esperimento di Michelson e Morley.

3 L'impiegato dell'Ufficio Brevetti

Nel 1905, a ventisei anni, Einstein era un cittadino svizzero in possesso del "diploma di insegnante di matematica e fisica" (nell'Università Italiana attuale sarebbe una laurea, forse magistrale) avendo, già nel 1901, sia ottenuta la nuova cittadinanza (che lo metteva al sicuro dal servizio militare prussiano) sia conseguito, al Politecnico di Zurigo, il titolo di "insegnante" (che, all'epoca, dava prospettive di lavoro). Einstein, tuttavia, non era riuscito a trovare un posto come insegnante e, per mantenersi agli studi di dottorato all'Università di Zurigo, aveva accettato il posto di assistente tecnico all'Ufficio Svizzero dei Brevetti a Berna. In questo modo, rispetto all'insegnamento, probabilmente guadagnava di più ed aveva più tempo libero da dedicare al suo, straordinariamente creativo, lavoro autonomo di ricerca.

Sul piano filosofico Einstein, da buon empirista, era convinto che la conoscenza umana potesse derivare solo dall'esperienza e, quindi, rifiutava il concetto di tempo assoluto uguale per tutti i sistemi di riferimento in quanto

- "Dobbiamo tener presente che tutte le nostre asserzioni nelle quali il tempo gioca un ruolo sono sempre asserzioni su eventi simultanei. Quando per esempio dico che - Quel treno arriva qui alle ore sette [ciò significa che] il porsi della lancetta piccola del mio orologio sulle 7 e l'arrivo del treno sono eventi simultanei -. [Tuttavia] una definizione del genere non basta più quando si tratta di collegare temporalmente eventi che abbiano luogo in posti diversi..."

Infatti, per collegare temporalmente un evento in A con un evento in B, che abbiano luogo nello stesso sistema di riferimento a una distanza D uno dall'altro, è necessario disporre di due orologi sincronizzati. All'Ufficio Brevetti di Berna - siamo in Svizzera - molte "pratiche" riguardavano la sincronizzazione di orologi in aree vaste, e quasi tutte le domande di brevetto facevano riferimento alla sincronizzazione mediante segnali luminosi. Per Einstein era quindi naturale pensare che la sincronizzazione dell'orologio in B con l'orologio in A si dovesse fare, come in Figura 2, inviando a B un segnale luminoso proveniente da A e tenendo conto del tempo di percorrenza AB. Successivamente, per fornire ad A l'informazione su un evento registrato in B, si poteva inviare un segnale luminoso da B e tenere conto in A del tempo di percorrenza del tratto BA.

A questo punto, però, si intuiva che

- un tale procedimento poteva funzionare solo se la luce completava in tempi uguali i due percorsi AB e BA, indipendentemente dallo stato di moto del sistema in cui A e B si trovavano. (Non si dimentichi che anche gli orologi "fermi" si spostano a causa dei moti di rotazione a 1.688 km/h e, soprattutto, di rivoluzione a 30 km/s della Terra rispetto al Sole).

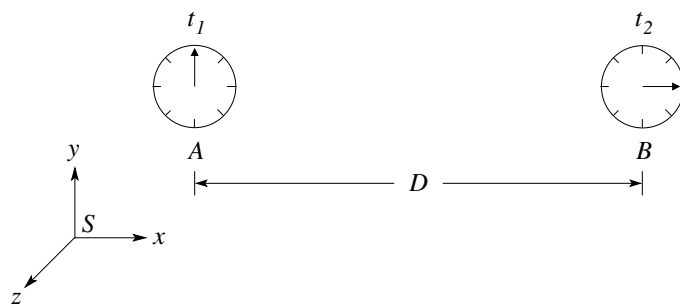


Figura 2: La sincronizzazione dei due orologi è possibile solo se la velocità della luce non cambia nei percorsi AB e BA anche se il sistema S si muove.

L'esperienza mentale della cavalcata di un raggio di luce e l'esperienza pressoché quotidiana all'Ufficio Brevetti avevano, quindi, portato Einstein ad assumere come punto di partenza della Relatività il fatto che

- **la luce nello spazio vuoto si propaga sempre con la stessa velocità c , indipendentemente dallo stato di moto dei corpi emittenti.**

Nell'enunciare tale postulato il ventiseienne Einstein non si era curato delle conseguenze devastanti che ci sarebbero state per i ben noti concetti classici di simultaneità, tempo e lunghezza (o, più probabilmente, si era divertito al pensiero di tali conseguenze).

4 La Relatività Speciale

Il nome implica che, come già osservato, la costanza della velocità della luce comporta la "relatività" dei concetti di simultaneità, tempo e lunghezza, mentre l'aggettivo significa che la teoria, in quanto limitata ai soli sistemi in moto rettilineo uniforme, è "speciale".

4.1 La simultaneità è relativa

Si pensi, ad esempio, ad una viaggiatrice posta al centro di un vagone ferroviario che si sposta a velocità costante (Figura 3 sopra). Quando lei arriva al punto esatto in cui si trova un osservatore sulla banchina, fa partire simultaneamente due lampi di luce: uno dalla parete anteriore e uno da quella posteriore del vagone. Per evidenti motivi di simmetria, i due lampi arrivano simultaneamente all'osservatrice.

L'osservatore fermo sulla banchina, invece, vede i due raggi percorrere distanze diverse (Figura 3 sotto), e si convince che il lampo anteriore arriva prima (la viaggiatrice si sta avvicinando al punto di emissione), e il lampo posteriore arriva dopo (la viaggiatrice si sta allontanando dal punto di emissione). Questo mostra che due eventi simultanei nel sistema di riferimento del vagone non sono simultanei nel sistema di riferimento della banchina.

D'altra parte, non esistono sistemi di riferimento privilegiati e, con pari diritto, la viaggiatrice vede il vagone fermo e la banchina che scorre verso sinistra nella figura con

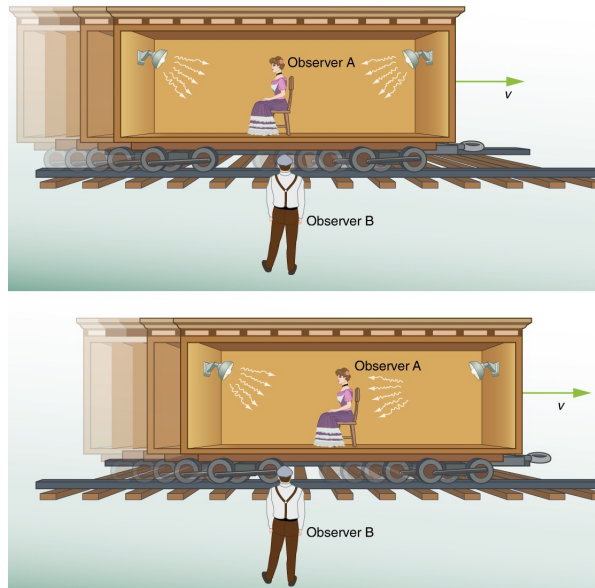


Figura 3: Esperimento mentale dei lampi di luce. Sopra: la viaggiatrice fa partire simultaneamente due lampi quando si trova in corrispondenza esatta dell'osservatore sulla banchina e, per simmetria vede arrivare insieme i due lampi. Sotto: l'osservatore non è d'accordo perché, a causa del movimento del vagone, vede arrivare prima il lampo partito dalla parete anteriore. [Openstax, *University Physics - Volume 3*, Rice University, 2017]

velocità pari a v . Quindi, possiamo anche chiederci cosa succede se, in corrispondenza al passaggio della viaggiatrice, l'osservatore accende simultaneamente due lampioni equidistanti da lui e posti uno a destra e uno a sinistra. Per motivi di simmetria l'osservatore vede arrivarli due luci nello stesso istante, mentre la viaggiatrice vede arrivare all'osservatore prima la luce di sinistra (direzione verso la quale, dal suo punto di vista, la banchina di muove) e dopo la luce di destra.

4.2 Il tempo è relativo

Si pensi, ad esempio, alla misura dell'intervallo di tempo impiegato da un lampo di luce per compiere il percorso emettitore-specchio-ricevitore all'interno di un veicolo. Nell'esperimento mentale "originale" il veicolo era ancora un vagone ferroviario (Einstein viaggiava abitualmente in treno tra Berna dove lavorava e Zurigo dove studiava) ma, nella versione modernizzata di Figura 4 (a), il veicolo è diventato un'astronave. L'astronauta misura l'intervallo di tempo e lo trova pari a

$$\Delta t_0 = 2D/c$$

dove $2D$, è la lunghezza totale del percorso, c è la velocità della luce e il pedice 0 sta per tempo proprio (in quanto misurato con un solo orologio fermo rispetto all'astronave).

L'astronave viaggia a velocità v rispetto alla Terra e, quindi, l'osservatore terrestre di Figura 4 (b) vede un percorso della luce diverso e più lungo, essendo lo spazio percorso

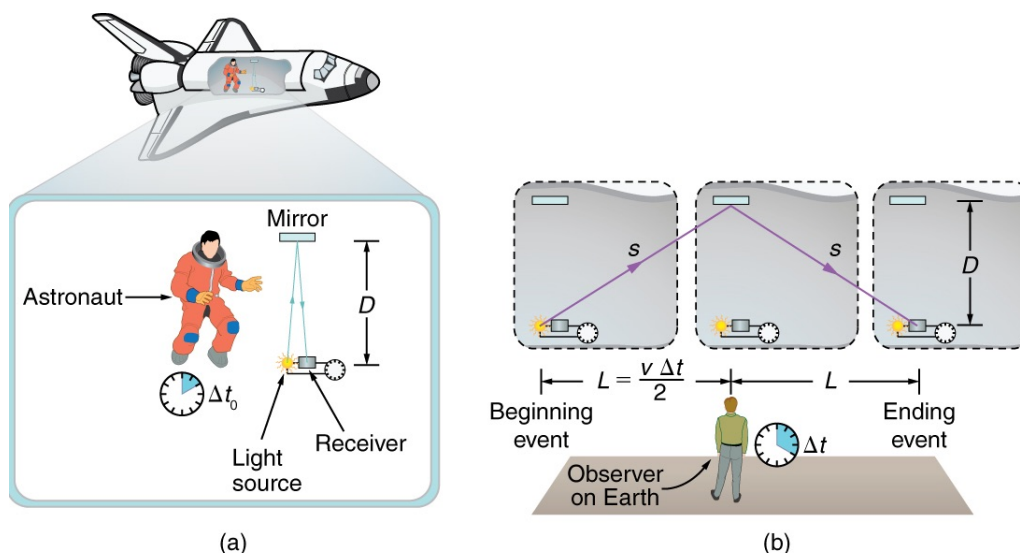


Figura 4: Esperimento mentale della misura di intervalli di tempo: (a) sull’astronave si misura l’intervallo di tempo proprio Δt_0 con un solo orologio mentre (b) a terra si misura l’intervallo di tempo Δt con due orologi sincronizzati. [Openstax, University Physics - Volume 3, Rice University, 2017]

$2S$ maggiore di $2D$ in quanto l’ipotenusa S di un triangolo rettangolo è più lunga del cateto/altezza D . (Un triangolo isoscele, come quello del percorso della luce, può sempre essere diviso in due triangoli rettangoli uguali). Poiché la velocità della luce è costante in tutti i sistemi di riferimento, l’osservatore terrestre misura un intervallo di tempo

$$\Delta t = 2S/c$$

che è maggiore di Δt_0 . In Figura 4 (b) tale intervallo è scritto senza il pedice 0 perché il tempo è misurato con due orologi sincronizzati fermi sulla Terra e, di conseguenza non è un tempo proprio (misurato con un solo orologio). Facendo la proporzione si ottiene

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

dove, come si è detto $S/D = \gamma > 1$. Applicando il teorema di Pitagora, si trova che γ è tanto maggiore dell’unità quanto più la velocità dell’astronave v si avvicina alla velocità della luce c . Ad esempio, con una velocità $v = 0.99c$ si avrebbe $\gamma = 10$ e l’osservatore terrestre troverebbe che il tempo trascorre 10 volte più lento sull’astronave.

Ovviamente la velocità $v = 0.99c$ è del tutto fuori dalla portata della tecnologia oggi disponibile. Ad esempio, la velocità delle due sonde terrestri attualmente più distanti dalla Terra: le Voyager 1 e 2 lanciate nel 1977 è, al momento, stabilizzata intorno ai 15 km/s, pari a 5 centomillesimi della velocità della luce, e con tale velocità γ risulta praticamente uguale all’unità.

Questo mostra che, nei sistemi in movimento il tempo trascorre più lentamente di quanto trascorra nei sistemi fermi sulla Terra, ma indica anche che la “dilatazione del tempo”, alla portata della tecnologia contemporanea, è trascurabile nella maggior parte

delle applicazioni ingegneristiche, per non parlare della vita di tutti i giorni. (Naturalmente, considerazioni diverse si applicano agli acceleratori di particelle usati in laboratori come quello del CERN di Ginevra, dove le particelle sono effettivamente “accelerate” a velocità prossime a quelle della luce).

4.3 La lunghezza è relativa

Nella versione “originale” dell’esperimento mentale di Einstein il veicolo era sempre il vagone ferroviario, ma nella versione modernizzata può essere interessante fare riferimento a una situazione di grande attualità. I ricercatori del Laboratorio per la Propulsione a Getto (JPL - Jet Propulsion Laboratory) della NASA, il 12 dicembre 2017 hanno annunciato l’avvio di uno studio per realizzare un mezzo di trasporto interstellare in grado di raggiungere Alfa Centauri entro il 2069, viaggiando ad una velocità pari al 10% di quella della luce ($v = 0,1c$). Inoltre, il 24 agosto 2016 sulla rivista Nature Online è stata annunciata la scoperta di un pianeta, battezzato Proxima b, che orbita intorno a Proxima Centauri la stella del gruppo Alfa Centauri più “prossima” al nostro sistema solare: “appena” 4,365 anni luce.

(Alfa Centauri è un sistema interstellare triplo costituito da tre stelle di neutroni: una nana gialla ed una nana arancione vicine tra loro e luminose al punto da risultare ben visibili dall’emisfero australe anche ad occhio nudo, ed una nana rossa, Proxima Centauri, più vicina alla Terra ma distante dalle due precedenti e molto meno luminosa di queste. Può essere curioso notare che “Avatar”, girato nel 2009, è ambientato in buona parte su “Pandora”, una delle quattordici lune del pianeta gigante gassoso “Polifemo” che sarà scoperto nel 2129 durante la prima missione interstellare umana su Alfa Centauri).

In Figura 5 (a), al centro di controllo terrestre viene misurata la lunghezza propria L_0 del percorso tra la Terra e Alfa Centauri (propria perché misurata utilizzando un solo telescopio munito di goniometro adatto a valutare la parallasse stellare, ovvero il cambiamento apparente di posizione della stella durante il moto orbitale della Terra). Al centro di controllo viene anche valutato il tempo di viaggio Δt utilizzando i segnali di due orologi: uno al punto di partenza e uno al punto di arrivo riassunti, nella figura, da uno solo rappresentativo dell’intero sistema. (Si noti che il sistema di valutazione della velocità è analogo a quello adottato dai Safety Tutor sulle autostrade: misura dell’intervallo di tempo trascorso nel passaggio di un veicolo da un punto iniziale a uno finale). Ciò consente di calcolare la velocità dell’astronave

$$v = L_0/\Delta t$$

e di comunicare il valore trovato all’astronauta.

Sul valore della velocità relativa v c’è sempre accordo: nemmeno i “blogger” più agguerriti hanno mai messo in dubbio il fatto che “se un treno passa a 60 km/h di fronte alla banchina, un passeggero sul treno vede la banchina spostarsi in direzione opposta ma sempre a 60 km/h”. Quindi, come ben evidenziato in Figura 5 (b), per l’astronauta l’astronave è ferma, mentre il sistema costituito dalla Terra ed Alfa Centauri si muove in direzione opposta a quella di volo ma alla velocità v misurata dal centro di controllo. Per valutare la lunghezza L del percorso, per lui incognita, l’astronauta si limita a misurare con il

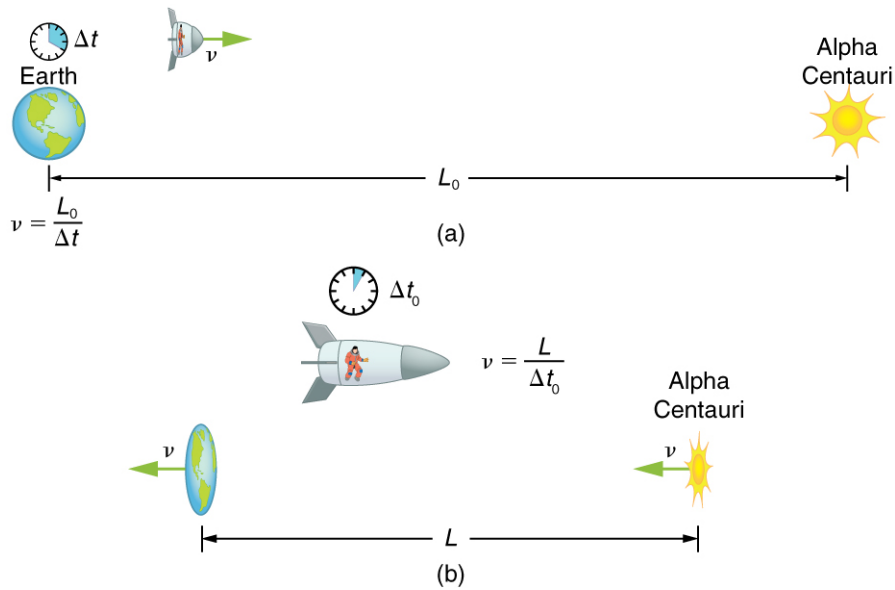


Figura 5: Esperimento mentale per la misura delle lunghezze applicato alle esplorazioni spaziali. (a) Il centro di controllo misura la distanza propria L_0 tra la Terra e Alfa Centauri e il tempo di viaggio Δt . (b) L'astroanauta trova una distanza contratta $L < L_0$, poiché la Terra e Alfa Centauri si muovono rispetto all'astronave, e percorre tale distanza nel tempo proprio $\Delta t_0 < \Delta t$. [Openstax, *University Physics - Volume 3*, Rice University, 2017]

suo orologio, fermo sull'astronave, il tempo proprio Δt_0 del viaggio. Successivamente, utilizzando la velocità relativa v , misurata dal centro di controllo, e la relazione

$$L = v\Delta t_0$$

l'astronauta (da bravo ingegnere) trova

$$L = (\Delta t_0/\Delta t)L_0 = (1/\gamma)L_0$$

dove γ è definibile anche come

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

ed è sempre maggiore dell'unità in quanto rapporto tra il tempo di viaggio misurato dal centro di controllo con due orologi sincronizzati fermi rispetto alla Terra e il tempo di viaggio proprio misurato dall'astronauta con un solo orologio a riposo sull'astronave in moto rispetto alla Terra.

Poiché si ha $\gamma > 1$ e $1/\gamma < 1$ risulta $L/L_0 < 1$, e questo mostra che l'astronauta valuta una lunghezza L del percorso, in moto rispetto a lui, più corta della lunghezza propria L_0 dello stesso percorso misurata dal centro di controllo fermo sul sistema Terra-Alfa Centauri. Un tale effetto si chiama "contrazione delle lunghezze degli oggetti in moto". Infatti, guardando attentamente la Figura 5, si nota che tutti gli "oggetti" in moto (astronave vista da Terra, e la stessa Terra e Alfa Centauri visti dall'astronave) sono più corti nella direzione del moto.

Tornando al viaggio spaziale su Alfa Centauri, con $v/c = 0,1$ (obiettivo 2069 della NASA) si avrebbe: $1/\gamma = 0,95$ e, quindi, la sonda troverebbe un percorso abbreviato di circa il 5%. Se però, in un futuro lontano, si arrivasse a una esplorazione umana di Alfa Centauri con un'astronave capace di una velocità: $v = 0,99 c$, si avrebbe $1/\gamma = 1/10 = 0,1$ e gli astronauti troverebbero un percorso ridotto al 10% rispetto a quello valutato dalla Terra, ovvero pari a $4,365/10 = 0,4365$ anni luce. Pertanto, viaggiando ad una velocità sostanzialmente uguale a quella della luce (99% di c), gli astronauti completerebbero il percorso in un tempo proprio di circa $0,4365/0,99 = 0,4409$ anni, ovvero invecchierebbero di soli 0,4409 anni mentre gli addetti al centro di controllo sarebbero, nel frattempo, invecchiati di $0,4409 \gamma = 0,4409 \cdot 10 = 4,409$ anni.

Niente male per quanto previsto in una teoria formulata nel 1905 da un impiegato dell'Ufficio Svizzero dei Brevetti di Berna!

5 Dall'Ufficio Brevetti al “precariato” all'Università

Nel 1905, che è il suo “anno magico”, Einstein pubblicò la Tesi di Dottorato e quattro articoli a contenuto fortemente innovativo riguardanti tre aree diverse della fisica

- “Elettrodinamica dei corpi in movimento” nel quale espone la teoria della relatività speciale;
- “L'inerzia di un corpo dipende dalla sua energia?” un articolo breve nel quale ritornò sulla teoria della relatività speciale derivando la relazione $E = mc^2$ che è, forse, la formula più famosa della Fisica;
- “Movimento di piccole particelle nei liquidi a riposo secondo la teoria molecolare-cinetica del calore” nel quale fornì una spiegazione del moto browniano, e
- “Punto di vista euristico sulla produzione e trasformazione della luce” (premiato con il Nobel per la Fisica nel 1921) nel quale spiegò l'effetto fotoelettrico nei metalli, utilizzando il concetto di “quanto” introdotto da Planck (e dimostrandone così la validità).

Tuttavia, nemmeno dopo l'anno magico Einstein trovò un posto di insegnante e, di conseguenza, rimase all'Ufficio Brevetti di Berna dove fu promosso “funzionario di seconda classe a far tempo dal primo aprile 1906” (il burocrate è giustificato dal fatto che la promozione era dovuta al conferimento formale del dottorato di ricerca all'Università di Zurigo in data 15 gennaio 1906). Nel 1907, comunque, 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 che, qualche anno dopo, fu premiato con il Nobel). La domanda fu, però, 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, tuttavia, Einstein decise di piegarsi alla burocrazia e scrisse la tesi di abilitazione, ottenendo così la nomina a *Privatdozent* il 27 febbraio 1908. Ma la docenza “libera” consentiva solo di tenere corsi all'Università pagati da chi

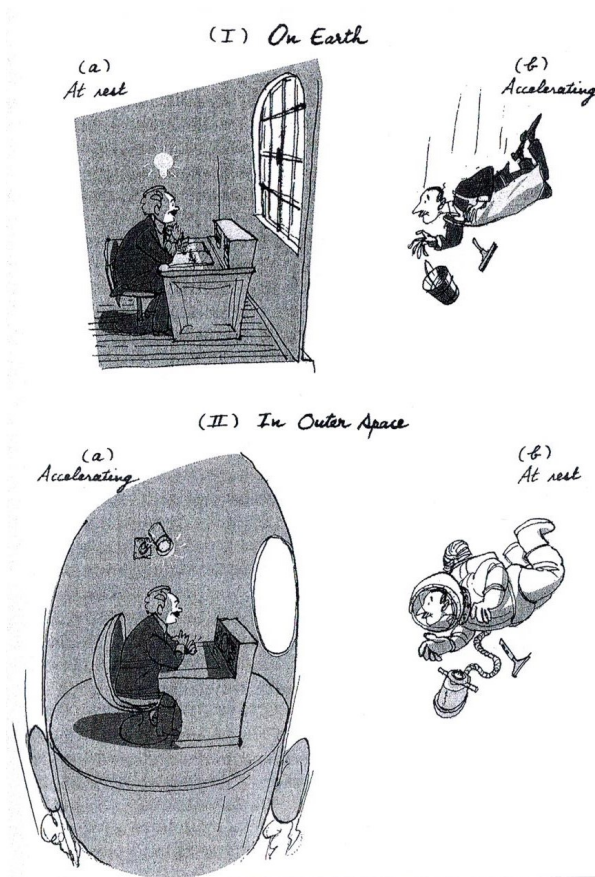


Figura 6: Esperimento mentale “dell’uomo che cade dal tetto”. In alto: Einstein dalla sua scrivania all’Ufficio Brevetti osserva un malcapitato che cade dal tetto. In basso: la situazione vista dall’ufficio posto in moto accelerato dai razzi con $a = -g$.

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.

6 La Relatività Generale

Dopo il 1905, comunque, Einstein non riposò sugli allori (del resto, al momento, negati) ma si pose, da subito, l’obiettivo molto ambizioso di formulare una nuova teoria che, successivamente, definì 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,
- proponeva una visione completamente nuova della gravitazione.

Al 1905 seguirono i 10 anni più faticosi (dal punto di vista scientifico) della vita di Einstein poiché, per arrivare ad una versione soddisfacente della nuova teoria della gravitazione, dovette ricorrere a concetti geometrici astratti e ad un apparato matematico complesso come il calcolo tensoriale. Invece, il completamento della Relatività Speciale avvenne improvvisamente grazie ad una intuizione fisica concretizzata, ancora una volta, in un esperimento mentale.

6.1 L'uomo che cade dal tetto

Nel 1907, quando la formulazione della relatività generale sembrava finita in un “vicolo cieco”, Einstein ebbe l'intuizione che poi definì “l'idea più brillante della mia vita”. Si trattava dell'esperimento mentale illustrato nella Figura 6, così descritto dallo stesso Einstein

- “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 (Figura 6 in alto). 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).

A questo punto l'esperimento mentale proseguiva immaginando che l'ufficio (dotato di razzi propulsori) e il malcapitato (vestito da astronauta) fossero traslati nello spazio profondo. In questo modo l'ufficio poteva muoversi con moto uniformemente accelerato rispetto allo spazio e all'improvvisato astronauta (Figura 6 in basso) ed Einstein, seduto alla scrivania, non si sarebbe accorto del cambiamento purché si fosse avuto

$$a = -g$$

ovvero l'accelerazione impressa dai razzi fosse stata uguale in valore assoluto ma, di verso opposto, alla gravità. Infatti, gli oggetti avrebbero continuato a cadere dalla scrivania (e il neo-astronauta sarebbe andato verso il “basso”) con l'accelerazione terrestre. Infine, se si fosse pesato, Einstein avrebbe letto un valore del proprio peso

$$ma = mg$$

uguale a quello misurato sulla Terra. Poiché gli esperimenti non avrebbero permesso di distinguere tra massa inerte (che si oppone alla forza) e massa gravitazionale, Einstein concluse che massa inerte e massa gravitazionale sono la stessa cosa. Inoltre, dal momento che la Relatività Speciale vale anche in presenza di campi gravitazionali, girando il ragionamento concluse che la validità della teoria deve continuare anche nel caso di sistemi in movimento accelerato uno rispetto all'altro.

Di qui l'enunciato del Principio di Equivalenza

- **un campo gravitazionale omogeneo è completamente equivalente ad un sistema di riferimento uniformemente accelerato.**

Ancora una volta le conseguenze furono strabilianti. Per citarne solo qualcuna (che qui ci si limita ad enunciare):

- i raggi di luce si incurvano nei campi gravitazionali;
- gli orologi rallentano nei campi gravitazionali;
- il colore della radiazione emessa dalle stelle è spostato verso il rosso (lunghezza d'onda più grande, frequenza più piccola e contenuto energetico minore) a causa del consumo di energia causato dall'uscita dal campo gravitazionale (notoriamente forte) delle stelle stesse.

Ma la conseguenza più sbalorditiva è

- l'esistenza dei "buchi neri".

quando la gravità diventa tanto forte da impedire l'uscita delle radiazioni luminose dai corpi (che, in compenso, catturano tutta la materia nelle loro vicinanze).

7 Il trionfo, la cosmologia moderna, e il "dopo relatività"

Dopo gli inizi stentati, conclusi con la faticosa nomina a Professore Associato all'Università di Zurigo nel 1909, 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), nel 1912 fu chiamato al Politecnico di Zurigo, e nel 1914 fu nominato direttore dell'Istituto di Fisica Kaiser Wilhelm (oggi Max Planck) di Berlino, nonché professore all'Università Humboldt 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.

Nel frattempo, l'enorme sforzo necessario a formulare la teoria della Relatività Generale, le difficoltà create dalla guerra, e i problemi connessi alla rottura del matrimonio avevano reso alquanto precarie le condizioni di salute di Einstein. (Per la cronaca "rosa": già nel 1914 la moglie Mileva Maric lo aveva abbandonato a Berlino tornando con i due figli a Zurigo, probabilmente perché sospettava una relazione sentimentale del marito con la cugina Elsa Lowenthal. Nel 1916 le, già di per sé, non brillanti condizioni generali di salute di Einstein, erano decisamente peggiorate a causa dell'alimentazione da "single in tempo di guerra" e dell'irregolarità dei pasti che l'impegno totalizzante per la formulazione della relatività generale comportava.

Nel 1917, Einstein ebbe un vero e proprio "collasso psicofisico": per diversi mesi non riuscì quasi ad uscire di casa, tormentato com'era da atroci dolori di stomaco che, praticamente, gli impedivano di mangiare e che lui aveva autodiagnosticato come "cancro". Fortunatamente, la genialità non è quasi mai universale, e i medici diagnosticarono un'ulcera che venne lentamente "curata" dalla stessa Elsa, dopo che Albert si era trasferito in

un appartamento contiguo a quello di lei. La cura fu un'alimentazione sana e regolare accompagnata dall'imposizione di un regime di vita relativamente meno forsennato, ma non dall'esercizio fisico che nessuno dei due prediligeva. (Per gli amanti del lieto fine: Albert sposò Elsa nel 1919 dopo, dicono, sette anni di "legame", non appena furono trascorsi i cinque anni di separazione da Mileva, previsti dalla legge dell'epoca).

Nonostante le difficoltà esterne Einstein, che possedeva una leggendaria capacità di concentrazione (e, forse per questo, una altrettanto leggendaria capacità di distrazione), pubblicò nel 1917 diversi articoli seminali, tra cui

- "Considerazioni cosmologiche sulla teoria della Relatività Generale"

nel quale applicò all'intero universo le equazioni di campo della Relatività Generale. Fino a quel momento la cosmologia si era limitata alle osservazioni astronomiche e, di conseguenza, le "Considerazioni" di Einstein segnano la nascita della cosmologia moderna che, dal 1917, procederà in parallelo tra teoria ed osservazioni.

Nel 1917, al culmine degli studi relativistici, Einstein pubblicò anche l'articolo

- "Teoria quantistica dell'irraggiamento"

che è il suo più grande contributo alla teoria quantistica. In esso teorizzò che gli atomi, oltre a emettere spontaneamente radiazioni, possono essere stimolati a farlo. In particolare, un mezzo ottico formato da una nube gassosa di atomi della stessa specie può assorbire l'energia fornita attraverso impulsi elettrici o luminosi e, in conseguenza, emettere fotoni coerenti (ovvero con la stessa direzione ed intensità). Questo processo di emissione stimolata fu la base, intorno al 1960, per la realizzazione del LASER (un acronimo per "Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation", cioè "Amplificazione della Luce attraverso l'Emissione Stimolata di Radiazioni"). Attualmente nei laser si impiegano, come mezzi ottici, anche liquidi e cristalli oltre ai gas, ma la teoria del processo di emissione non è cambiata rispetto a quella formulata da Einstein.

L'ultimo grande contributo di Einstein alla teoria quantistica furono i due articoli

- "Teoria quantistica dei gas monoatomici - Parte I e Parte II"

apparsi, rispettivamente, nel 1924 e nel 1925 a seguito di un lavoro del fisico indiano Satyendra Nath Bose (1894-1974). Nel 1924, Bose applicò alle radiazioni luminose un metodo statistico originale basato sulla descrizione della luce come un gas di fotoni indistinguibili uno dall'altro. Quando l'articolo con la descrizione del suo modello fu rifiutato da diverse riviste, Bose non si scoraggiò e lo inviò direttamente a Einstein. Einstein riconobbe la genialità del contributo, tradusse personalmente l'articolo in Tedesco e lo fece pubblicare sulla prestigiosa *Zeitschrift für Physik*. Di più, Einstein notò che la statistica di Bose poteva essere estesa anche ai gas e scrisse i due lavori prima citati. Inoltre, prendendo in considerazione un gas di particelle quantistiche prevede la comparsa, a temperature prossime allo zero assoluto, di un nuovo stato della materia: il "condensato", successivamente chiamato di Bose-Einstein. (Il condensato è una specie di liquido nel quale le molecole non si attraggono reciprocamente. Per le sue proprietà estreme, il condensato trova applicazioni nello sviluppo di nuovi dispositivi optoelettronici, come laser ad alta efficienza energetica e interruttori ottici ultraveloci per i futuri sistemi di calcolo). Il primo condensato fu prodotto solo nel 1995 da Eric Cornell e Carl Wieman nel laboratorio

NIST-JILA dell'Università del Colorado, usando un gas di rubidio. Per questo risultato, Cornell e Wieman, assieme a Wolfgang Ketterle, hanno vinto il Premio Nobel per la fisica nel 2001.

Negli stessi anni dei suoi contributi storici alla teoria quantistica, Einstein cominciò a distaccarsi dalla teoria stessa in quanto non riusciva ad ammettere che gli eventi potessero aver luogo per caso, nemmeno a livello atomico; di qui la sua famosa frase, più volte ripetuta: “Dio non gioca a dadi”. Come Spinoza, infatti, anche Einstein, pur non credendo in un Dio personale che interagisse con gli uomini, era assolutamente convinto vi fosse un progetto divino riflesso nelle leggi eleganti che governavano l'universo. (Per riportare il discorso al livello elementare che ci è proprio, a questo punto si può citare Niels Bohr, il “filosofo” della meccanica quantistica che una volta, persa la pazienza, pare abbia risposto a Einstein: “Smettila di dire a Dio cosa deve fare”).

Nel 1925 Einstein aveva 46 anni e, come spesso accade ai grandi geni della fisica e della matematica, la sua creatività era appassita. Egli rimpiangeva di essere diventato una “autorità” dopo avere rivoluzionato la fisica proprio combattendo i difensori ad oltranza dell'autorità Newtoniana ma, ugualmente, spese gli ultimi 30 anni della sua vita criticando la meccanica quantistica e cercando invano una teoria unificata dell'elettromagnetismo e della gravitazione.

Fortunatamente, sul piano umano, Einstein conservò un grande rispetto per la libertà di pensiero e di parola che lo spinsero a rifiutare tutte le forme di oppressione ed a proporre costantemente la tolleranza come condizione necessaria per lo sviluppo di una società creativa. Utilizzò, infatti, l'enorme popolarità e l'immenso prestigio di cui godeva per battersi contro le dittature, l'antisemitismo, il razzismo, la guerra e la minaccia nucleare, trasformandosi in una vera e propria guida spirituale per buona parte dell'umanità.

Bibliografia

G. Comini, La relatività per non addetti ai lavori, CISM, 2017 [su Google cercare “cism relativita”].

D.C. Giancoli, Fisica con Fisica Moderna, CEA, Seconda Edizione, 2007.

I. Gamow e S. Steele, Calling Dr. Einstein, Big Bang Production, 2012.

W. Isaacson, Einstein: la Sua Vita, il Suo Universo, Mondadori, 2010.

Openstax, University Physics - Volume 3, Rice University, 2017 [su Google cercare “openstax university physics”].