

## GLI ANTEFATTI RELATIVISTICI

### Macchine e lampadine

Siamo agli inizi del '900 e sulla fisica, come dice uno dei maggiori scienziati viventi all'epoca, Lord Kelvin, (1824-1907) splende un sole luminoso... a parte 3 nuvolette.

Effettivamente nel secolo appena passato gli studiosi avevano fatto passi da gigante nella comprensione della natura e il metodo di ricerca iniziato nel '600 da Galileo Galilei (1564-1642) aveva portato i suoi frutti.

Dopo la metà dello stesso secolo, Isaac Newton (1643-1727) aveva scritto le leggi della meccanica e proposto una legge della gravitazione in grado di descrivere i moti osservati dei pianeti.

Gli scienziati successivi, basandosi sui risultati di Galileo e Newton, avevano sviluppato una serie di concetti e metodi che avevano permesso loro di affrontare e risolvere i problemi legati al moto dei corpi, al calore, all'energia e alla sua trasformazione in lavoro. Questi studi avevano dato anche una fortissima spinta alla produzione tecnologica: le macchine iniziavano a sostituire gli uomini nei lavori faticosi e i treni, con i loro motori a vapore, sostituivano i cavalli.



### Avvertenza:

nelle equazioni è stato usato un puntino al posto del segno  $\times$  della moltiplicazione.

Se vuoi puoi sempre saltare le equazioni e andare avanti senza leggerle, ma ti consiglio di provare a guardarle, magari dopo un po' ti diventeranno familiari.

Forse tutto questo è ancora niente se paragonato alla totale rivoluzione nella vita quotidiana e sociale che si ebbe, dalla seconda metà dell'800, grazie all'utilizzo dell'elettricità. Insomma, la fisica aveva realmente illuminato, e questo è proprio il caso di dirlo, la vita delle persone, risolvendo quei problemi che per secoli erano rimasti incompresi.



### Il mondo di onde

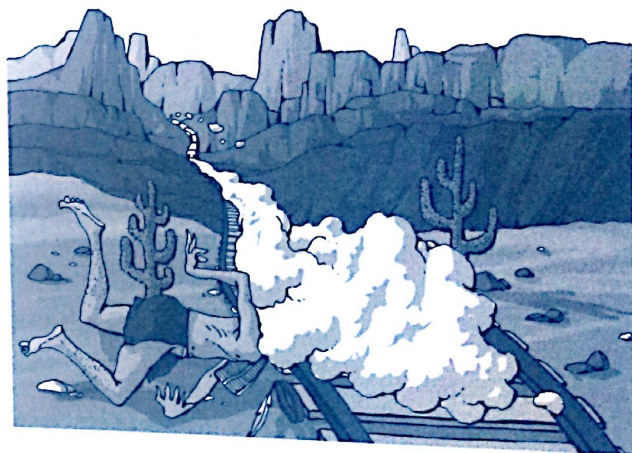
Nel 1864, James Clerk Maxwell (1831-1879) aveva pubblicato le equazioni a cui obbediscono le onde elettromagnetiche e proprio queste equazioni contenevano, anche se non esplicitamente, una delle 3 nuvole che oscuravano la luce che illuminava gli orizzonti della conoscenza scientifica.

Ormai il mondo era sicuro che i campi elettromagnetici si propagassero come onde e che la luce fosse composta da onde elettromagnetiche. Fin qui nessun problema.

La "nuvoletta" nasceva dal fatto che le onde, da che mondo è mondo, si propagavano in un mezzo e non certo nel vuoto. Ad esempio un'onda come quella marina si propaga nel mare, oppure in un lago o in fiume, magari anche in piscina o in un catino, ma se non c'è acqua... non c'è nemmeno l'onda.



Anche un'onda sonora, un rumore, ha bisogno dell'aria o di qualche altro mezzo per propagarsi. Nei film western si vede ogni tanto qualcuno che poggia l'orecchio sulle rotaie del treno per sentire se sta arrivando o meno. Le onde sonore, infatti, si propagano meglio (e anche più velocemente) nelle rotaie che nell'aria (quindi il treno si sente quando è ancora lontano), ma per farle arrivare alle nostre orecchie almeno l'aria serve.



### Cosa oscilla?

D'altra parte un'onda è un'oscillazione di qualche cosa. Ad esempio un'onda marina è uno spostamento in su e in giù di una certa quantità d'acqua. Se l'acqua non c'è, cosa oscilla, cosa potrebbe mai alzarsi e abbassarsi ritmicamente?

Le onde sonore comprimono l'aria e questa compressione viaggiando crea una decompressione e quindi un'altra compressione, e così via. Ma se non ci fosse l'aria, cosa si comprimerebbe? Il vuoto si può forse comprimere?



### Aristotele torna di moda

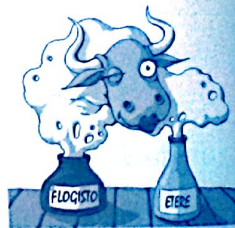
Tutti questi erano ottimi motivi per pensare che anche le onde elettromagnetiche, e quindi la luce, avessero bisogno di un mezzo, una materia che vibrando permettesse alle onde di propagarsi.

Certo, questa materia doveva essere un po' particolare: perfettamente trasparente, altrimenti la luce del Sole non sarebbe arrivata fino a noi, e finissima, dato che non si riusciva a "toccarla". Avrebbe dovuto essere immobile e riempire tutto l'universo. Ovviamente questa materia fu battezzata "etere", dato che Aristotele (uno dei più importanti filosofi greci, vissuto nel IV secolo a.C.) aveva chiamato etere la materia perfettissima, immobilissima e trasparentissima che, secondo lui, formava tutto l'universo sopra il nostro cielo.

### Scienziati capa-tosta

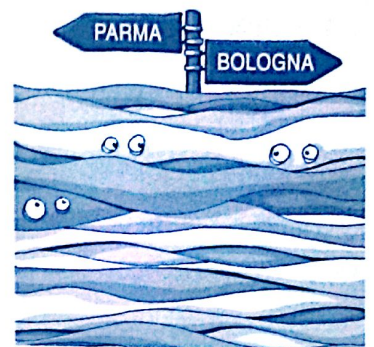
Scommetto che hai già capito come è andata a finire questa storia. Non è certo la prima volta che gli scienziati avevano ipotizzato l'esistenza di una qualche materia con caratteristiche un po' particolari. Il flogisto, per spiegare il fuoco; il calorico per spiegare il calore; e poi i fluidi elettrici e magnetici... insomma erano esistite tante "materie particolari" e tutte si erano in poco tempo rivelate una grande bufala!

Perché proprio l'etere doveva essere più realistico delle altre? Ah, saperlo!



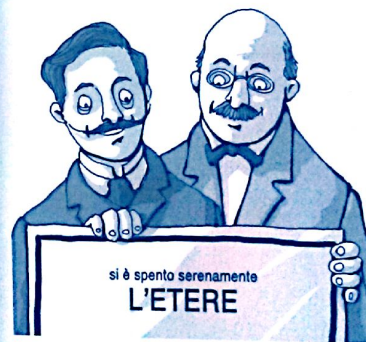
### Nebbia in val Padana

Comunque l'esistenza dell'etere era una delle 3 nuvolette che secondo Lord Kelvin offuscavano l'azzurro cielo della fisica all'inizio del nuovo secolo (1900). Nessuno riusciva a dimostrarne l'esistenza e la nuvoletta si trasformò in nebbia densa che venne poi spazzata via dalla teoria che prenderà il nome di "relatività speciale" o "relatività ristretta".



### Una coppia famosa

L'esperimento che decretò la morte dell'etere fu realizzato nel 1887 da due scienziati americani: Albert Abraham Michelson e Edward Williams Morley. Il primo non era proprio americano-americano, infatti era nato nel 1852 a Strzelno in Polonia, ma era arrivato negli Stati Uniti insieme alla famiglia all'età di soli 2 anni.



Studiò e dopo insegnò all'Accademia militare, quindi iniziò la carriera universitaria e nel 1907 vinse il premio Nobel in fisica per "i suoi strumenti ottici di precisione e le misure effettuate con essi".



Il premio Nobel era stato istituito nel 1901 e Albert Michelson era il primo americano (o almeno quasi-americano) che lo vinceva.

Edward Williams Morley, invece, era nato negli Stati Uniti, e precisamente nel New Jersey, nel 1838.

Insegnò chimica e geologia, ma il suo nome rimase indissolubilmente legato a quello di Michelson in una frase che è diventata quasi una sola parola: "l'esperimento-di-Michelson-e-Morley", cioè il più famoso esperimento non riuscito della storia!

#### In-successo?

In fisica un esperimento che non riesce può essere più interessante di uno che riesce perché in questo modo dimostriamo che una teoria è sbagliata. È proprio facendo cadere qualche "verità" data per scontata che sono nate le più grandi scoperte scientifiche.

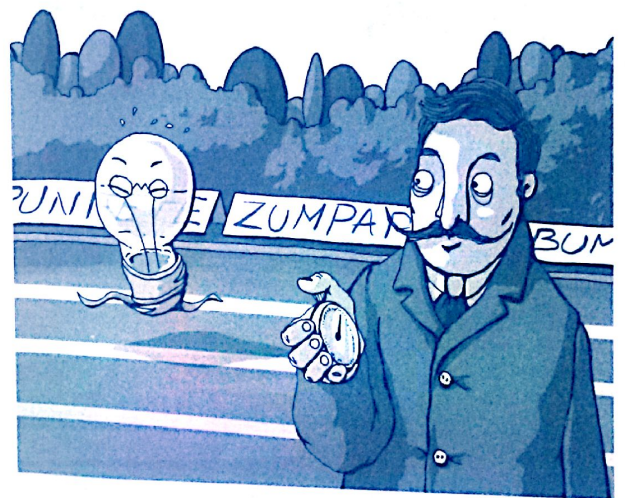
In onore al fatto che ha vinto il Nobel, forse potresti scegliere Michelson per farti raccontare il famoso esperimento.

– La luce è sempre stata la mia passione, fin dai tempi dell'Accademia e mi piace misurarne la velocità.

– Perché non era stata ancora misurata?



– Oh sì, certo, ci avevano provato in molti, pensa, anche Galileo aveva fatto un esperimento per misurare la velocità della luce, ma gli strumenti da lui usati erano troppo rudimentali.



– D'accordo, ma forse nel 1887 c'era qualche misura migliore di quelle di Galileo.

– Sì, forse la misura migliore era quella effettuata dai francesi Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) e Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), infatti noi abbiamo utilizzato un apparato sperimentale simile al loro.

– E avete ottenuto risultati migliori?



## Relativo alla relatività

– A noi non interessava tanto il valore assoluto della velocità della luce, ma il suo valore relativo.

– *Questo lo dice perché lei sa di essere finito dentro a un libro di relatività.*



– Oh, ci sono abituato, io finisco dentro TUTTI i libri di relatività. Il nostro problema, comunque, era quello di rilevare l'esistenza dell'etere.

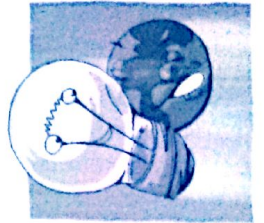
– *E che c'entra la velocità della luce?*

– Semplice: se l'etere esiste e se come noi supponiamo è fermo, allora la velocità della luce deve essere diversa se la Terra si muove nella stessa direzione della luce o in direzione opposta.

– *Non capisco cosa c'entri la luce con l'etere.*

– L'etere è proprio il mezzo dentro al quale si propaga la luce e rispetto all'etere la luce deve viaggiare sempre alla stessa velocità di circa  $300.000 \text{ km/s}$  (trecentomila chilometri al secondo), che per comodità possiamo chiamare velocità  $c$  (cioè  $c = 300.000 \text{ km/s}$ ). Questo vuol

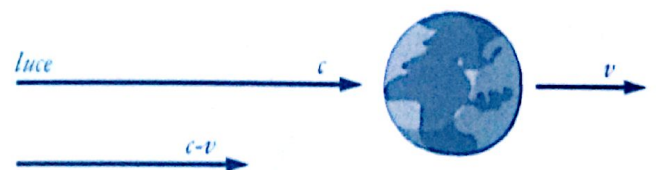
dire che, rispetto alla Terra, la luce viaggerà ad una velocità  $c-v$  se la velocità della Terra è  $v$  e la luce si sta muovendo nella stessa direzione in cui si muove la Terra. Mentre avrà una velocità  $c+v$  se viaggia in direzione opposta.



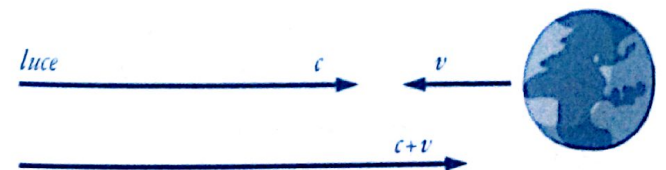
– *Spiega meglio.*

## L'etereo vento

– Guarda il disegno. L'etere è immobile. La luce rispetto

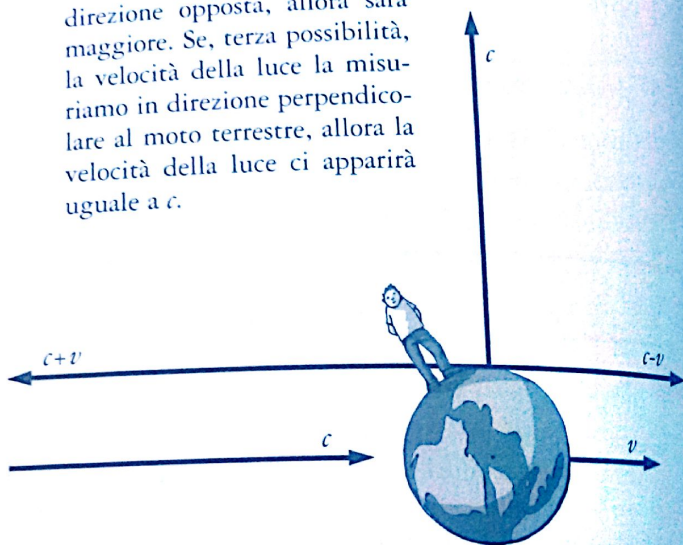


all'etere viaggia sempre alla velocità  $c$  e la Terra, rispetto all'etere, viaggia alla velocità  $v$ . Quando la luce e la Terra si muovono nella stessa direzione, dalla Terra la luce si vede più lenta ( $c-v$ , infatti la luce "rincorre" la Terra a velocità  $c$ , ma intanto la Terra "scappa" a velocità  $v$ ). Se invece luce e Terra hanno velocità opposte, allora la velocità della luce vista dalla Terra è maggiore ( $c+v$ , come avviene in un urto frontale).



- E come fate a far muovere la luce nella stessa direzione della Terra o in direzione opposta?

- Semplice, guarda la figura qui sotto, la Terra gira intorno al Sole con una velocità di circa 30 km/s. Se misuriamo la velocità della luce in direzione del movimento terrestre, allora questa velocità apparirà più piccola, se invece la luce viaggia nella direzione opposta, allora sarà maggiore. Se, terza possibilità, la velocità della luce la misuriamo in direzione perpendicolare al moto terrestre, allora la velocità della luce ci apparirà uguale a  $c$ .

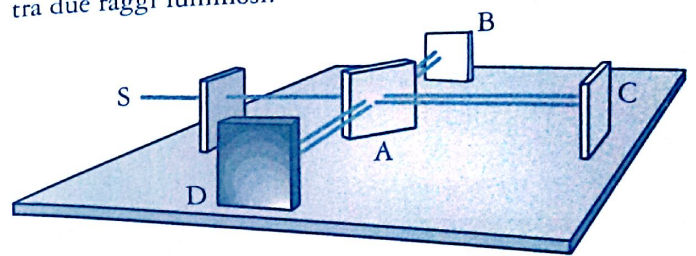


- Geniale, ma sei sicuro che la velocità della Terra non sia troppo piccola rispetto a quella della luce e che non si riesca a misurare niente?

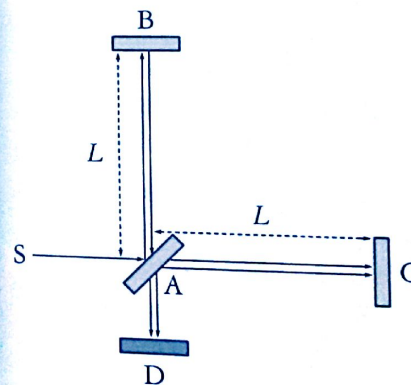
- Qualche probabilità che prima di fare l'esperimento io abbia fatto due conti, esiste! Guarda un po' cosa dovrebbe accadere.

### Interferisco io

Lo strumento di misura utilizzato da Michelson e Morley si chiama interferometro e misura l'interferenza tra due raggi luminosi.



L'idea è questa. Guarda la figura. Il raggio di luce parte dalla sorgente S, arriva allo specchio semiriflettente A. Mezzo raggio di luce viene riflesso e arriva allo specchio completamente riflettente B, l'altro mezzo raggio di luce attraversa A e arriva allo specchio completamente riflettente C.



Il raggio riflesso da B torna quindi in A, mezzo passa arrivando sulla lastra D e mezzo se ne torna verso la sorgente. La stessa cosa accade al raggio riflesso da C.

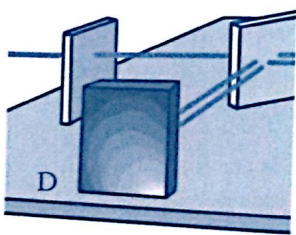
Se la distanza tra A e B è uguale a quella tra A e C (in figura questa distanza l'abbiamo chiamata  $L$ ) allora il tempo impiegato dal raggio di luce per andare da A a B e tornare indietro sarà  $t = \frac{2L}{c}$ ,

uguale al tempo che il raggio impiegherà a fare il percorso, andata e ritorno, tra A e C.

Infatti la velocità è proprio lo spazio percorso diviso il tempo impiegato a percorrerlo, quindi  $c = \frac{L}{t}$ , da cui si ricava  $t = \frac{L}{c}$  e questo è il tempo che la luce, che viaggia a velocità  $c$ , impiega a percorrere  $L$ , quindi a fare il percorso dell'andata. Al ritorno il tempo sarà uguale e quindi il tempo totale è il doppio  $t = \frac{2L}{c}$ .

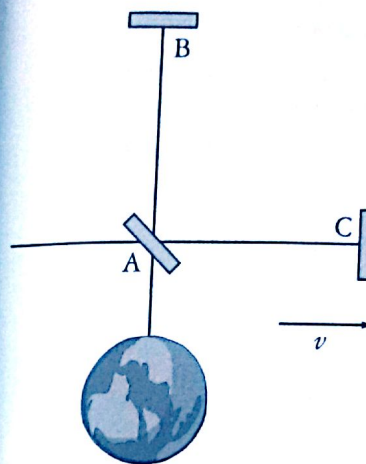
### Uguale a se stesso

Il nostro raggio di luce è sempre lo stesso, solo che noi in A lo abbiamo spezzato a metà e gli abbiamo fatto fare percorsi diversi, anche se lunghi uguali e che il raggio ha percorso nello stesso tempo. Quando dunque le due metà del nostro raggio si incontrano, si trovano in "fase". I raggi, sono infatti onde luminose e, come le onde del mare, hanno un punto "alto" e un punto "basso". Se i raggi sono in "fase" vuol dire che i punti alti delle due onde coincidono, così come i punti bassi e si vedono delle belle figure di interferenza: cerchi dove la luce è massima, alternati a cerchi scuri perché la luce non c'è, come vedi nel disegno.



meno ci sarà un punto completamente buio.

Se le onde, invece, sono un po' fuori fase, vuol dire che i loro massimi e minimi non si trovano esattamente allo stesso punto. Quando le onde si sommano, allora, non raggiungeranno in nessun punto la luminosità massima di prima e nem-



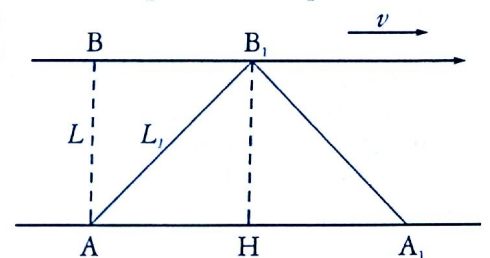
### Mettiamo in moto

Adesso dobbiamo ricordarci che la Terra si muove a velocità  $v$ . In questo caso lo specchio B è in posizione perpendicolare al moto della Terra, mentre lo specchio C è parallelo. Il raggio arriva sempre nello specchio semiriflettente A e viene di nuovo diviso in due. Una parte va verso lo specchio B e l'altra

verso lo specchio C. Le due situazioni, però, sono piuttosto diverse. Guardiamo prima dalla parte di B.

Mentre il raggio di luce viaggia da A a B, B intanto rispetto all'etere si è spostato nella posizione  $B_1$  e quando torna indietro, A sarà nella nuova posizione  $A_1$ . Se guardi la figura, vedi che il raggio di luce rispetto all'etere non percorre più lo spazio  $L$ , ma uno spazio più lungo  $L_1$ . Per percorrere questo spazio impiegherà un tempo  $t_1$  e sarà  $L_1 = t_1 \cdot c$ .

Mentre il raggio di luce arrivava in  $B_1$  lo specchio A si è spostato nella posizione H alla velocità  $v$  e quindi la distanza  $\overline{AH}$  sarà  $d = v \cdot t_1$ .



Applicando il teorema di Pitagora si trova:

$$t_1^2 \cdot c^2 = L^2 + v^2 \cdot t_1^2$$

$$L^2 = t_1^2 \cdot c^2 - v^2 \cdot t_1^2 = t_1^2 \cdot (c^2 - v^2) = t_1^2 \cdot c^2 \cdot (1 - \frac{v^2}{c^2})$$

da cui:

$$L = t_1 \cdot c \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}; \text{ e quindi } t_1 = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dato che il ritorno è uguale all'andata, il tempo totale di andata e ritorno sarà:

$$t_b = 2t_1 = 2 \cdot \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

### Avanti e indietro

La situazione verso C è diversa. La distanza tra A e C, infatti, rimane sempre costante e uguale a  $L$ , ma il raggio luminoso si muoverà ad una velocità  $c - v$  se viaggia nella stessa direzione della Terra e  $c + v$  nel caso opposto. Il tempo totale dell'andata e ritorno sarà

$$t_c = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = 2 \cdot \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

che risulta quindi più piccolo di  $t_b$  e precisamente se  $L = 1$  metro e  $v = 3 \cdot 10^4$  m/s (cioè la velocità di rivoluzione della Terra), allora  $t_b - t_c = 3 \cdot 10^{-17}$  s e per  $T = 10^{-15}$  secondi (periodo di oscillazione dell'onda luminosa), allora l'interferenza delle onde dovrebbe cambiare di un 3% che dovrebbe essere osservabile.

### Nada de nada

L'effetto non fu mai osservato. La differenza dei tempi  $t_b - t_c$  è sempre risultata compatibile con zero. Se vuoi vedere i risultati ottenuti per misurare questa differenza in esperimenti compiuti nel corso di vari anni puoi andare a pagina 162.

Sembra che il raggio luminoso impieghi lo stesso tempo per fare due percorsi di lunghezza diversa e questo è veramente molto strano.

### I grandi dell'epoca

Per provare a capirci qualche cosa, facciamo entrare in scena un grandissimo personaggio: Hendrik Antoon Lorentz.



Nacque ad Arnhem, in Olanda, il 18 luglio del 1853. Si laureò in matematica e fisica a Leyden dove, quando aveva solo 25 anni, fu creata per lui la cattedra di Fisica Teorica. Nonostante fosse stato invitato ad insegnare un po' ovunque nel mondo, rimase sempre nella sua università e, tutti i lunedì mattina della sua vita, tenne delle conferenze pubbliche su temi di fisica.

Questa bella abitudine dei grandi scienziati di parlare in pubblico delle loro ricerche oggi è andata quasi completamente persa, ed è veramente un gran peccato.

Questa bella abitudine dei grandi scienziati di parlare in pubblico delle loro ricerche oggi è andata quasi completamente persa, ed è veramente un gran peccato.







## LA RELATIVITÀ RISTRETTA

### La porta ri-stretta

– Non voglio andare avanti a conoscere la tua vita senza sapere cosa hai scritto nel 1905 sulla relatività.

– Hai ragione, ma parleremo dopo dell'articolo, preferisco farti entrare nella relatività da un'altra porta.

– Perché? È molto difficile?

– Be', lo puoi capire dal titolo "L'elettrodinamica dei corpi in movimento", l'articolo è centrato sulle equazioni di Maxwell, che a dirla tutta non sono troppo semplici, ma gli stessi concetti posso spiegarteli da un altro punto di vista e tutto ti apparirà chiaro. Alle equazioni di Maxwell ci arriveremo dopo, per adesso ti dovrebbe bastare sapere cosa sia la velocità. Lo sai?

– Sì, più o meno...

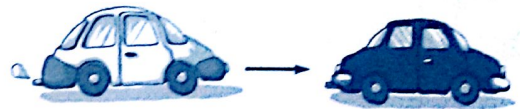
– È possibile definirla come lo spazio percorso in un certo tempo: quando dici "50 chilometri all'ora" (50 km/h), vuol dire che in un'ora percorri cinquanta chilometri.

– Bene, mi è chiaro.

### Allacciate le cinture!

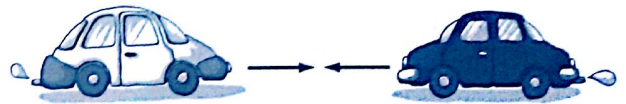
– Adesso andiamo un po' a sbattere: tu sei in macchina, la tua macchina si muove ad una velocità di 50 km/h e

va a sbattere contro un'auto ferma. A che velocità sei andato a sbattere?



– Direi a 50 km/h... anche se mi sembra troppo facile.

– È giusto. Seguimi ancora. Se invece vai a sbattere contro un'auto che ti viene addosso con una velocità di 50 km/h a che velocità hai sbattuto?



– Be', io vado a 50 km/h verso di lei, lei viene a 50 km/h verso di me... direi che quando sbattiamo, abbiamo una velocità reciproca di 100 km/h. Cioè l'urto avviene a 100 km/h e mi faccio molto più male di prima...

– Effettivamente, hai mai sentito parlare di un "urto frontale"? Il peggiore di tutti, proprio perché le velocità si sommano.

– E si sottraggono anche?

– Certo, si sottraggono. Perché in quei dannati inseguimenti dei film, i malviventi non vengono mai presi? Se una macchina va alla velocità di 50 km/h e tu la rincorri con una velocità di 50 km/h, quando mai la acchiapperai? Infatti la velocità relativa tra te e lei è esattamente zero. Sei d'accordo?

– Sì, direi che sono d'accordo.

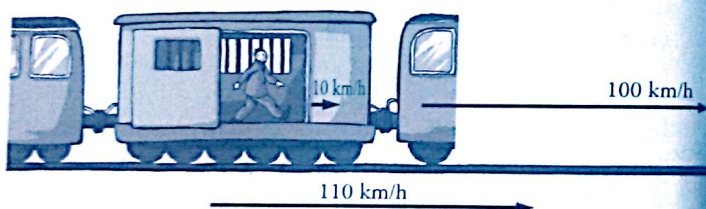


– Bene, ma continuiamo un po'. Questa storia delle velocità che si sommano o si sottraggono è veramente importante per capire la relatività.

– Penso di aver capito, ma se vuoi continuiamo.

### Buon viaggio

– Adesso sei su un treno, che si muove rispetto al terreno ad una velocità di  $100 \text{ km/h}$ . Tu stai correndo nella direzione del moto del treno ad una velocità di  $10 \text{ km/h}$ , rispetto al treno. A che velocità ti muovi rispetto al terreno?



– Direi che rispetto al terreno, cioè alla stazione, mi muovo con una velocità di  $110 \text{ km/h}$ . È giusto?

– Sì, e se invece andassi nell'altra direzione?

– Be' mi muoverei, rispetto al terreno, di  $(100 - 10) \text{ km/h}$  e quindi di  $90 \text{ km/h}$ .

42

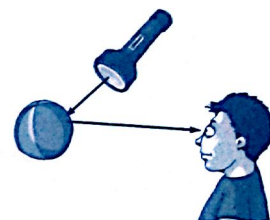
– Benissimo, più che benissimo, sei quasi pronto. Adesso devo solo assicurarmi che tu sappia come funziona l'occhio umano.

### Il bello della diretta

– Ma che dici Albert? Che c'entra l'occhio?

– Devo assicurarmi che tu sappia bene come funziona il meccanismo attraverso il quale noi vediamo, altrimenti non riuscirai a seguirmi.

– Sì, penso di sapere come funziona. Un raggio di luce colpisce un oggetto, rimbalza e poi entra nel mio occhio e lì...



– Va bene, basta così, cosa accade dentro l'occhio non mi riguarda, ma è importante che tu sappia che noi possiamo vedere perché un raggio di luce entra nell'occhio e se il raggio non entra, come accade in una stanza buia, allora non vediamo nulla. Inoltre è importante che tu capisca che noi vediamo sempre una cosa "passata", magari da pochissimo tempo, ma non vediamo mai quello che accade mentre accade. Vediamo quello che è accaduto un "pochino" prima, dove questo "pochino" è un tempo che può essere piccolissimo, ma non è mai zero.

– Questo mi sembra molto strano. Se tu stai scrivendo alla lavagna, io ti vedo "mentre" tu scrivi, mica dopo. Solo le trasmissioni televisive possono essere "in differita", la realtà è sempre "in diretta".



43



- Tu mi vedi perché un raggio di luce mi illumina, si riflette su di me e poi ti arriva dopo aver attraversato lo spazio che separa la mia persona dal tuo occhio.

- Certo.

- Ebbene, quel raggio di luce non ci metterà un po' di tempo ad arrivare fino a te? Quel tempo sarà piccolissimo, e quindi a te sembrerà immediato, ma non è zero. Il bello della "diretta" è che non esiste!

- Direi che tu hai ragione, ma direi anche che questo tempo è talmente breve che io lo considero uguale a zero.

### Questione di dimensioni

- Non posso biasimarti. La luce si muove a circa 300.000 km/s (chilometri al secondo), se io e te siamo lontani 3 metri, allora la luce impiega circa 1 centomillesimo di secondo ad arrivare da me a te.

- Per me non vuol dire molto "1 centomillesimo di secondo".

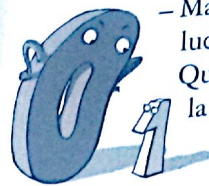
- Hai ragione, allora pensa che un raggio di luce, in un secondo, percorrerebbe circa 100 volte la distanza tra Roma e Berlino. Ti è più chiaro, adesso, quanto è veloce la luce?



- Accidenti, sì. Ecco perché il tempo che ci mette per arrivare da te a me, mi sembra uguale a zero.

- Capisco che tu possa considerarlo un tempo nullo, ma non lo è! In fisica, e peggio ancora in matematica, zero è zero e "piccolissimo" non è zero!

- Ma se io non posso accorgermi della differenza, devo per forza considerarlo zero!



- Ma se tu fossi sulla Luna te ne accorgeresti. La luce impiega circa un secondo ad arrivare. Quando Armstrong era sulla Luna ci arrivava la sua voce, portata da onde elettromagnetiche, con questo ritardo. Per capire il mio ragionamento, facciamo finta che la

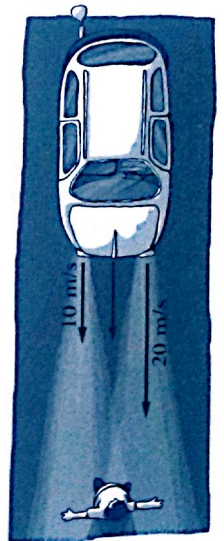
velocità della luce sia molto, ma molto, ma molto più piccola, ad esempio di soli 10 metri al secondo (10 m/s)... il ragionamento non cambia e noi possiamo intuire cosa succede.

- Proviamo.

### Un altro incidente è possibile

- Bene. Allora adesso ti metti per strada e guardi una macchina che ti sta venendo incontro con i fari accesi. La macchina si muove ad una velocità di 10 m/s verso di te. La luce esce dai fari ad una velocità di 10 m/s nella tua direzione, quindi, per la somma delle velocità che abbiamo appena visto, la luce si muove a 20 m/s verso

te che stai fermo, diciamo a 100 metri dalla macchina. La luce che esce dai fari impiegherà quindi  $\frac{100 \text{ m}}{20 \text{ m/s}} = 5 \text{ s}$  (5 secondi) ad arrivare fino al tuo occhio.

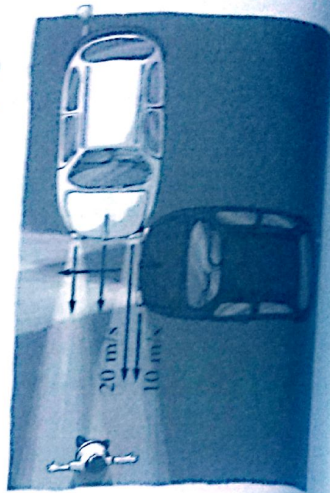


- C'è in realtà vedo quello che di fatto è accaduto 5 secondi prima?

- Esatto. Se il pilota, quando è a 100 metri da te spegnesse i fari, tu continueresti a vedere la luce per 5 secondi perché dopo 5 secondi ti arriverebbe l'ultimo raggio partito dai fari 5 secondi prima. Va bene?

- Direi di sì.

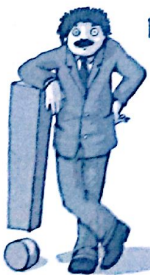
- Ecco, adesso pensiamo che, invece di spegnere i fari, l'auto avesse un incidente con un'altra macchina che stesse viaggiando in direzione perpendicolare a lei, sempre alla velocità di 10 m/s. Guarda la figura. La macchina nera non ti sta venendo incontro e quindi la velocità della luce che esce dai suoi fari non si somma a quella dell'auto. I raggi della luce della macchina nera si muovono verso di te con una velocità di soli 10 m/s e quindi, per percorrere i 100 metri che ti separano dall'auto, impiegano  $\frac{100 \text{ m}}{10 \text{ m/s}} = 10 \text{ s}$ !



### Punti (esclamativi) di vista

- Perché hai messo un punto esclamativo? Cosa c'è di strano?

- C'è di strano che in un certo istante le auto vanno a sbattere ad una distanza di 100 metri da te. Dopo 5 secondi tu vedi l'auto bianca frantumarsi senza nessun



motivo apparente, mentre alla nera non è ancora accaduto nulla. Solo dopo altri 5 secondi, finalmente anche la macchina nera apparirà incidentata! Allora? Non ti sembra un po' strano?

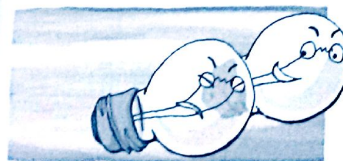
- Certo, ma il trucco ce l'hai messo tu all'inizio: la velocità della luce è molto, ma molto, ma molto più grande e quindi tu non ti accorgi nemmeno della differenza di tempo che passa tra quando vedi la prima auto rotta e quando vedi rotta anche la seconda.

- Questo è vero, ma per quanto tu non potresti percepirla, la differenza di tempi esisterebbe ugualmente e in altre occasioni potrebbe diventare importante, ad esempio, in un ipotetico urto tra due navicelle spaziali veloci e lontane, nel caso in cui si scontrassero mentre una si avvicina alla terra e l'altra no (nel caso in cui, quindi, per una navicella la sua velocità andrebbe sommata a quella della luce e per l'altra no).



- Hai ragione. E allora dov'è il trucco? Come si risolve il problema?

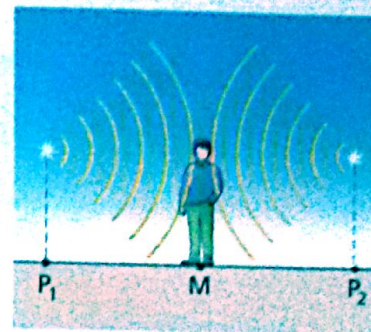
- Non c'è trucco: esiste una velocità massima e questa velocità non può mai essere superata. La velocità massima è la velocità della luce.



Per dire se due eventi sono simultanei o no, scegliamo un punto  $M$  che sia equidistante da  $P_1$  e  $P_2$  (→ figura a lato). Per definizione:

i fenomeni  $F_1$  e  $F_2$  (che avvengono nei punti  $P_1$  e  $P_2$ ) sono simultanei se la luce che essi emettono giunge nello stesso istante in un punto  $M$  equidistante da  $P_1$  e  $P_2$ .

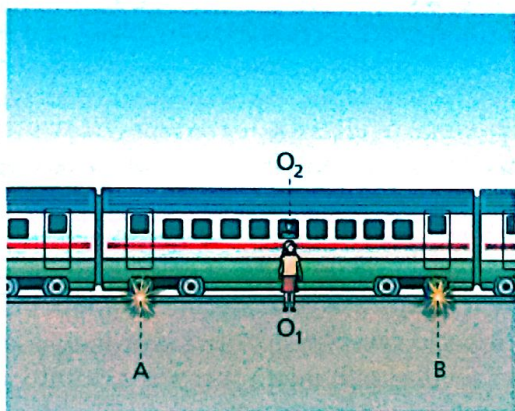
Il ragionamento che sta alla base di questa definizione è semplice: se le distanze  $P_1M$  e  $P_2M$  sono uguali, i raggi di luce (che hanno la stessa velocità) impiegano intervalli di tempo uguali per percorrerle. Quindi, se i due raggi di luce arrivano in  $M$  nello stesso istante, devono essere partiti simultaneamente.



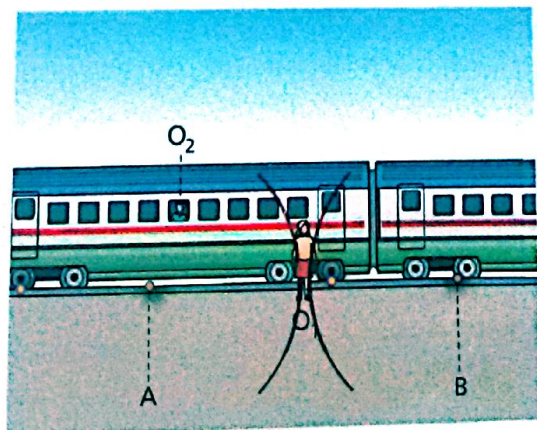
### ■ La simultaneità è relativa

Proviamo ora ad applicare la definizione precedente a un esempio specifico, inventato dallo stesso Einstein: consideriamo un treno che si muove a grande velocità rispetto a un osservatore  $O_1$  che si trova a terra, lungo i binari. Un secondo osservatore  $O_2$  si trova sul treno, a metà strada tra due punti  $A$  e  $B$ .

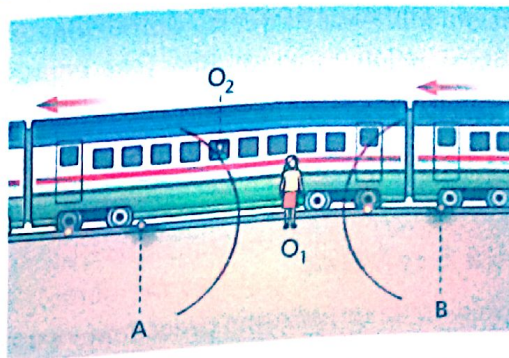
A un certo punto, due petardi esplodono sui binari in corrispondenza dei punti  $A$  e  $B$  (→ figura sotto). Le due esplosioni sono testimoniate dai segni di bruciatura che rimangono sui binari e sul treno, e la luce emessa da esse si propaga in tutte le direzioni con velocità  $c$ .



Il tutto è stato preparato in modo che i raggi luminosi emessi dai due petardi giungano a  $O_1$  nello stesso istante (→ figura sotto). Inoltre l'osservatore  $O_1$ , misurate le distanze tra il punto in cui si trovava quando ha visto le esplosioni e le due bruciature lasciate dalle esplosioni stesse, determina che tali distanze sono uguali. Sulla base della definizione precedente, egli giudica che i due petardi sono esplosi *simultaneamente*.



Dal treno l'osservatore  $O_2$  dà un giudizio differente: infatti, mentre i raggi luminosi si propagano, il treno si sposta (nel nostro esempio) verso sinistra ( $\rightarrow$  figura sotto). Quindi  $O_2$  vede prima l'esplosione che avviene alla testa del treno e soltanto dopo un certo intervallo di tempo l'esplosione che ha avuto luogo in coda al treno: non c'è dubbio che, secondo lui, le due esplosioni *non* sono state simultanee.



Allora i due eventi che stiamo esaminando, cioè le due esplosioni, sono stati simultanei per un osservatore e non simultanei per l'altro. Non c'è nulla di sbagliato: infatti, entrambi gli osservatori si sono attenuti strettamente alla definizione operativa di simultaneità. Entrambi hanno condotto in modo corretto le loro osservazioni. Eppure i loro responsi sono diversi.

Inoltre non c'è nulla di speciale che distingua il sistema di riferimento del treno da quello in cui i binari sono fermi: in maniera del tutto simmetrica, due eventi che sono simultanei per  $O_2$  non lo sono per  $O_1$ . Dobbiamo quindi ammettere che

il giudizio di simultaneità è relativo: due eventi che risultano simultanei in un dato sistema di riferimento non lo sono in un altro che si muova rispetto al primo.

L'analisi precedente, basata sul fatto che la velocità della luce ha un valore finito, ci fa capire che il tempo assoluto su cui è fondata la meccanica classica non ha significato fisico: lo avrebbe se la luce si propagasse a velocità infinita. In quel caso, il giudizio di simultaneità sarebbe assoluto, uguale per tutti gli osservatori.

Nella vita quotidiana, le velocità che riusciamo a ottenere sono così piccole rispetto a  $c$  che non è possibile avere un'esperienza diretta della relatività della simultaneità. Vedremo però che le cose cambiano se ci si muove a velocità abbastanza vicine a  $c$ .

**Definizione operativa di tempo**

Ricorda che in fisica qualunque grandezza, anche il tempo, è introdotta mediante una definizione operativa. Di conseguenza, per un fisico esiste il tempo assoluto soltanto se è possibile individuare un metodo per misurarlo.

**PROBLEMA**

Un treno è lungo 200 m e si muove alla velocità costante di 300 km/h. In un tratto rettilineo, agli estremi del treno esplodono due petardi nel modo illustrato nel paragrafo. Secondo un osservatore posto a terra, le due esplosioni sono simultanee.

► Quanto vale, per l'osservatore posto al centro del treno, l'intervallo di tempo che separa l'arrivo dei lampi di luce delle esplosioni?

**Strategia e soluzione**

- Per risolvere il problema conviene utilizzare un asse coordinato fermo rispetto al terreno e disposto lungo il binario. Chiamiamo  $x = L/2$  la posizione sul binario

$v = 300 \text{ km/h} = 83,3 \text{ m/s}$   
 $L = 200 \text{ m}$   
 $\Delta t = ?$