

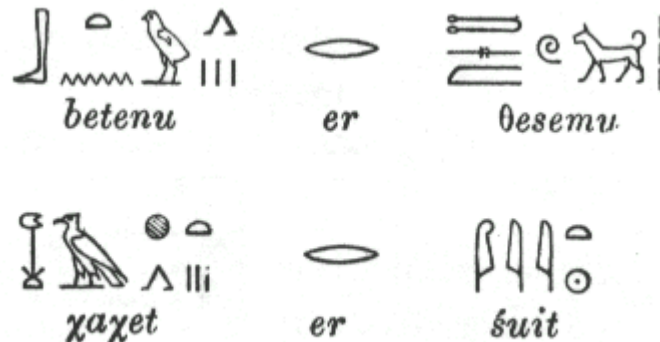


# Stefano Breccia

## La velocità della luce.

If we are to formulate mathematical rules concerning our universe, we must begin true. (Albert Einstein: "Special Relativity", 1905)

Già gli antichi egizi si erano posti il problema della velocità della luce:



(si parla di un esercito assai numeroso, i cui soldati corrono più veloci della luce)

Un paio di millenni più avanti, i redattori della Bibbia dimostrarono di ritenere che l'effettivo, si racconta come Geova abbia creato la luce: (per la verità, questa che viene rimangiata, a cura del MIT di Boston, ma la sostanza rimane)

... e Dio disse:

$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot B = \mu_0 J + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

... e la luce fu.

(si tratta delle equazioni di Maxwell sui campi elettromagnetici!)

Tornando al tema di questa presentazione, va sottolineato il fatto che si ritiene, nei lavori di Minkowski dimostrano che la velocità della luce nel vuoto (**c**) non è superabile. Ad

un corpo in moto a velocità  $v$ , si ha:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

ove  $m_0$  è il valore della massa a riposo (a velocità nulla).

Per comodità, riscriviamo l'equazione:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Ovviamente, quando la  $v$  tende al valore di  $c$ ,

il denominatore tende a zero, e quindi la massa  $m$  tende all'infinito. Se poi  $v$  dove diverrebbe negativo, e quindi la  $m$  diventerebbe immaginaria. Analoghe considerazioni di Minkowski, che sono alla base della Relatività Ristretta.

$$l_l = l_{l_0} \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$l_t = \frac{l_{t_0}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Per la cronaca, le altre tre equazioni di Minkowski sono:

Si riferiscono, rispettivamente, a lunghezza longitudinale, lunghezza trasversale, quindi per valori nulli di  $v$ .

*Apparentemente*, quindi, sembrerebbe che a livello relativistico non sia possibile quanto, mano a mano che la sua velocità aumenta, la sua massa aumenta, da sempre più vistoso, quanto più la  $v$  diventa una frazione significativa della  $c$ .

E quand'anche il nostro oggetto, grazie a chi sa quale miracolo, potesse aver spingerlo ad una velocità maggiore:

- *in primis*, sarebbe necessaria (e non sufficiente) una spinta infinita;
- *in secundis*, la sua massa, il suo tempo, le sue dimensioni, e quant' altro, diver

Le equazioni sono assai semplici, e contengono per l'appunto quanto testé afferr

In realtà, anche se quanto appena detto è normalmente sostenuto da coloro che della luce, vanno avanzate diverse obiezioni.

La prima, e più ovvia, consiste nel fatto che le equazioni di Minkowski si applicar uniformi tanto per fissare le idee, anche se la cosa non è, a rigore, corretta) ec sono alla base della Relatività Ristretta, la quale si riferisce proprio a questi ambit

Quindi, le equazioni di Minkowski non sono in grado di descrivere che cosa ac partire da uno stato di quiete. Di conseguenza, non vanno usate in tali contesti.

La seconda, e ben più pesante, obiezione, è che in nessun punto della Relatività che la  $c$  che compare in tantissime equazioni, sia la velocità della luce nel vuoto.

Ciò che si afferma è che tale  $c$  è la velocità del veicolo di informazioni più veloce

Si dà il caso che, dal nostro punto di vista, le due cose coincidano (e quindi  $c$  è ma si tratta di un puro accidente, dovuto alle nostre limitazioni tecnologiche ammesso che esistano, si propagano forse a velocità maggiore di quella della luc

L'unico momento nel quale Einstein giustifica l'uso della velocità della luce è Particolare, nel quale egli afferma:

*Si ammette, secondo l'esperienza, che la grandezza:*

$$\frac{2 \cdot \overline{AB}}{t'_A - t_A} = c$$

*sia una costante universale, cioè la velocità della luce nel vuoto.*

(la sottolineatura è ovviamente dovuta all'autore di queste note; circa la formula, in questa sede è i

Le proprietà inconsuete di qualche cosa che si muova alla velocità  $c$ , così giustificano unicamente nell'ipotesi che non esista alcunché di più veloce.

Ad esempio, in base all'affermazione testé citata, il valore di  $c$  è indipendente dall

Questa proprietà è probabilmente la più sorprendente, in quanto è in apparenza quotidiana.

Se due automobili si muovono l'una verso l'altra, ciascuna alla velocità di 100 km/h delle velocità singole, quindi a 200 km/h.

Se un aereo decolla a 200 km/h rispetto all'aria, e si muove contro un vento che rispetto alla pista, di soli 150 km/h (per questo motivo, appena possibile, gli aerei

Nel caso della luce, qualunque sia la velocità dell'osservatore, egli misurerà sempre la stessa velocità (cronaca).

Tornando all'esempio delle due automobili, se per assurdo esse si muovessero (Autovelox!!!) quindi a circa 300 mila km/sec, l'una rispetto all'altra avrebbe una velocità di 600 mila km/sec come parrebbe logico.

Il motivo è ovvio: se così non fosse, ciascuna automobile sarebbe, rispetto all'altra, più veloce di  $c$ .

Dato che in nessuna equazione della Relatività si impone che  $c$  sia la velocità massima di un veicolo di informazione disponibile, non è difficile applicare le equazioni di Relatività a situazioni per le quali il mezzo di informazione più rapido non sia la luce, ma un altro mezzo.

Questa analisi, al di là di qualche considerazione divertente, ci può permettere di fare alcune considerazioni relativistiche.

Paradossalmente (ma non tanto) se fossimo tutti ciechi, una bomba atomica esplode con una velocità rispetto a quella che oggi conosciamo, in quanto in un mondo di esseri privi della

$$E = m \cdot c^2 \quad (*)$$

potrebbe, al più, essere la velocità del suono nell'aria; invece di 300,000,000 m/sec, sarebbe un milione di volte inferiore; elevando al quadrato, l'energia di una bomba atomica sarebbe inferiore a quella di una bomba quale noi la conosciamo.

\* Per la cronaca, questa equazione è stata scritta da Hasenöhril nel 1904, un anno prima di Einstein!

*Sic stantibus rebus*, a livello di Relatività Ristretta (quindi in assenza di campi, di gravità, di percepire un qualche oggetto in moto a velocità maggiore di  $c$  ?

Ovviamente no, in quanto tutte le caratteristiche fisiche dell'oggetto sarebbero, in un certo senso, Minkowski.

Ciò, naturalmente, fintanto che i nostri strumenti di indagine restino limitati a velocità pari a  $c$ .

Ma il fatto che noi non si riesca a percepire direttamente un oggetto in moto ad una velocità maggiore di  $c$  non significa che questo non possa esistere. Anzi, un eventuale tale oggetto potrebbe dare origine a fenomeni strani.

Per cercare di capire come vanno le cose, immaginiamo un mondo abitato da persone che possono percepire solo velocità inferiori a  $c$ .

elettromagnetiche.

Per questi signori, evidentemente,  $c$  è la velocità del suono nell'atmosfera, qualch

Proponiamoci di studiare questo mondo, però dal nostro punto di vista di ess  
elettromagnetiche, e, per di più, forti della nostra tecnologia in termini di aerei  
nostre cavie).

Non sappiamo quali possano essere i problemi di un ipotetico aereo trans-lumina  
un aereo supersonico.

Tanto per cominciare, sul cruscotto di un Concorde esistono almeno tre diver  
forniscono tre indicazioni diverse (in realtà dovrebbero essere quattro, ma il qua  
dai costruttori di aerei supersonici).

Le quattro velocità di cui si parla sono:

- velocità rispetto al suolo, normalmente misurata in nodi, cioè in miglia nautiche/c
- velocità rispetto all' aria (in questo caso si tratta di due misure diverse, la *True* ,  
*Speed*, cioè la velocità misurata dal tubo di Pitot, soggetto a tutta una serie di err  
nodi;
- velocità rispetto all'aria come percentuale della velocità del suono, misurata i  
velocità del suono, 1.1 un po' al di sopra).

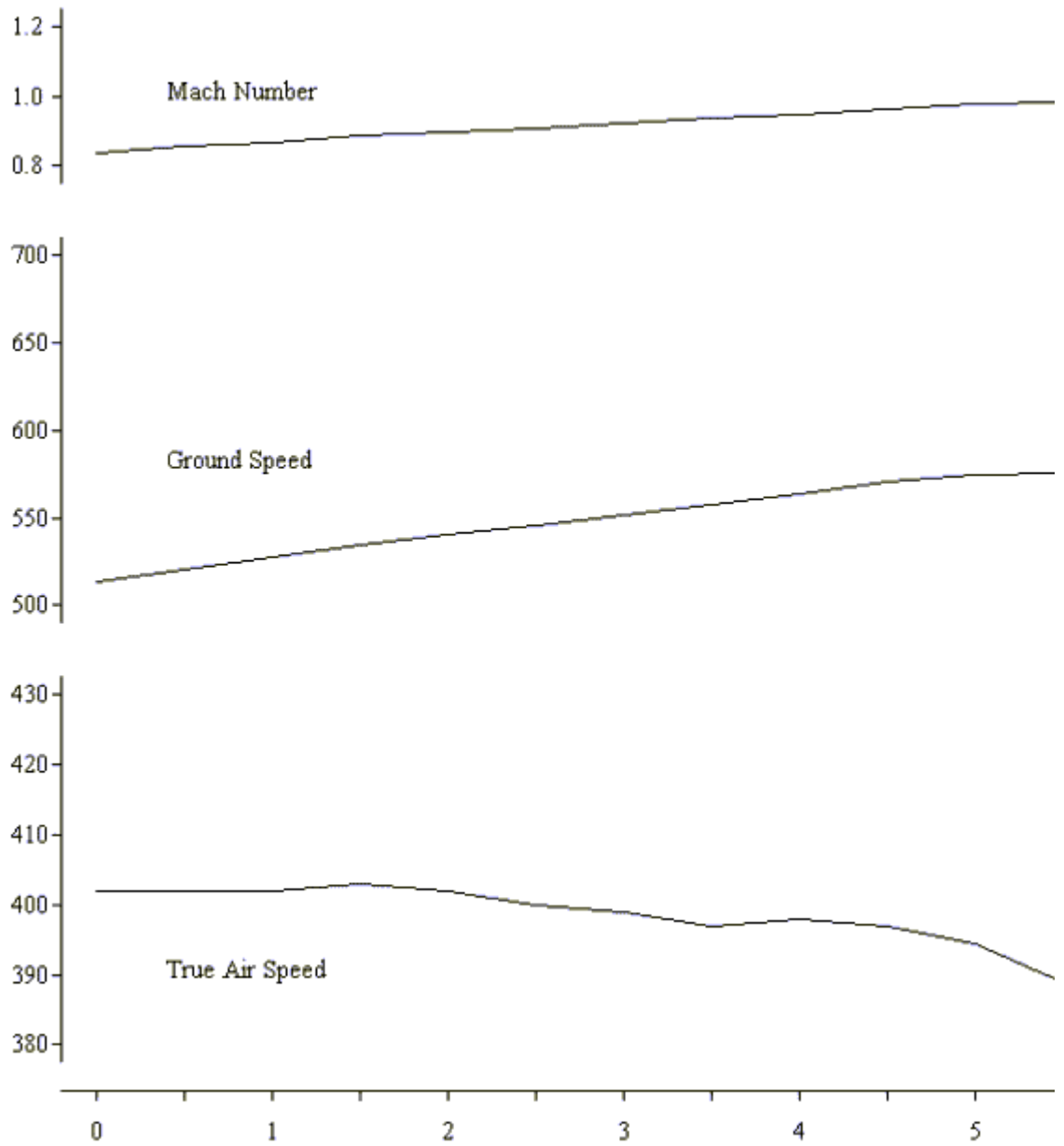
Non è affatto detto che queste quattro velocità siano fra di loro coerenti.

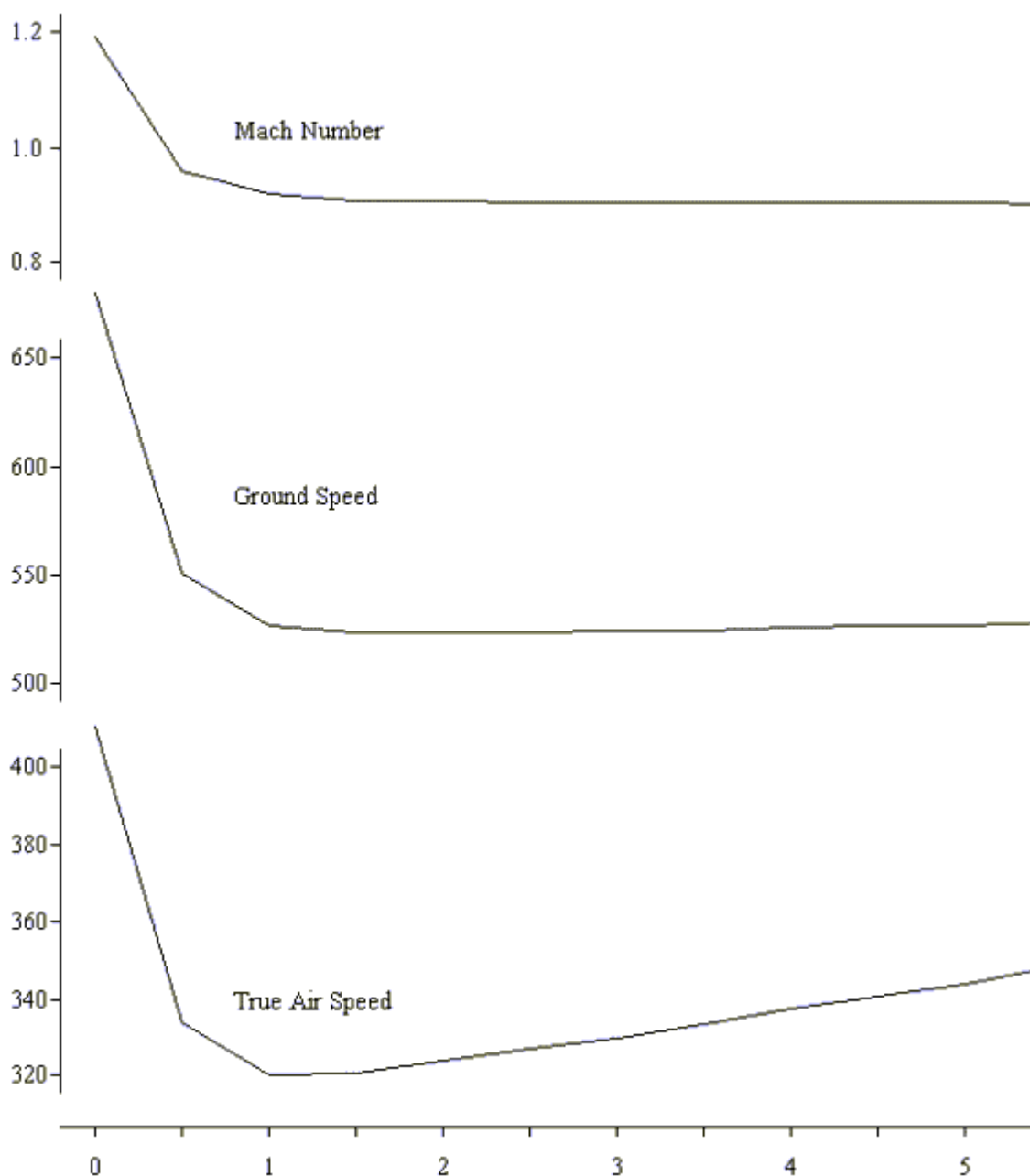
Non solo non sono proporzionali l'una all'altra, ma può benissimo darsi il caso c  
ciò è dovuto a diversi fattori, quali la densità dell'aria, la sua temperatura, l'eventu

Nel seguito vedremo due diagrammi, il primo relativo al superamento della veloci  
al di sotto della velocità del suono, questa volta in discesa.

In entrambi i casi, il passaggio del muro del suono ha avuto luogo attorno ai 30  
varie velocità, *IAS* (*Indicated Air Speed*), *Mach Number* e *GS* (*Ground S*,  
indipendente le une dalle altre.

(per una disattenzione dell'autore, nei due diagrammi seguenti ciò che è stato qualificato come *Tru*





Questo commento serve unicamente a sottolineare il fatto che il termine "velocità" prestarsi a diverse letture, a seconda delle circostanze, e di che cosa si stia guardando.

Torniamo a titolo di esempio al nostro mondo di ciechi. Il ruolo del radar sarebbe, in questo caso, sfruttare le onde sonore piuttosto che quelle elettromagnetiche. Sarebbe un sonar in modo analogo.

Se l'aereo è in allontanamento dalla stazione, ovviamente no (quell' "ovviamente" quanto le onde emesse dal sonar non potranno mai raggiungere l'obiettivo ed esso, se supersonico sarebbe effettivamente "immaginario", in base alle equazioni di Minkowski).

Se l'aereo si sta avvicinando, si muove più veloce degli echi che esso stesso genera. Gli echi, se la stazione, non sono in alcun modo correlati alle vere posizioni dell'aereo (almeno con la velocità della luce).

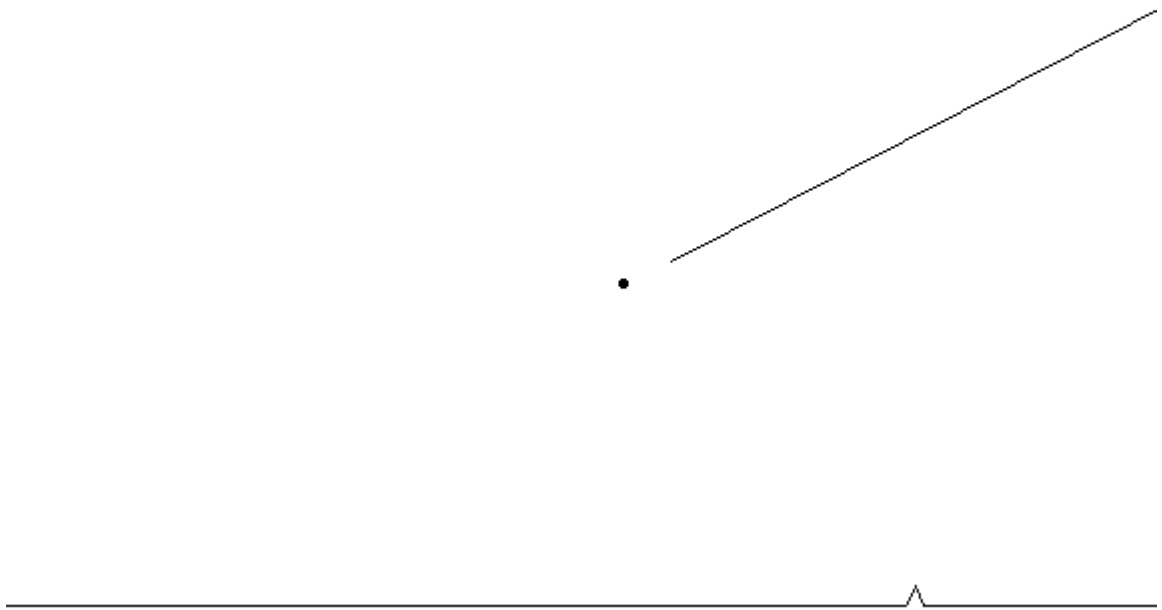
Il nostro bersaglio si comporterà quindi in modo apparentemente assurdo, secondo le equazioni di Minkowski.

Ci sarà un *boom* sonico nel momento in cui l'onda di compressione passerà sopra la stazione. Gli echi saranno in alcun modo in grado di giustificare. Per contro, gli echi sonar mostreranno un comportamento apparentemente assurdo.

L'animazione seguente mostra un terreno orizzontale, con al centro un sonar (il traiettoria in salita, rappresentato dal cerchietto nero, che aggiorna la sua posizione vera, quale noi vedenti la percepiamo. Dopo un certo periodo, quando l'aereo sarà a sinistra due echi (due punti scuri) che mostrano ciò che il sonar rileverebbe. L'animazione reagirebbe al sorvolo da parte di un aereo in volo al doppio di  $c$ .

$$v = 2.0 * c$$

**moto de**

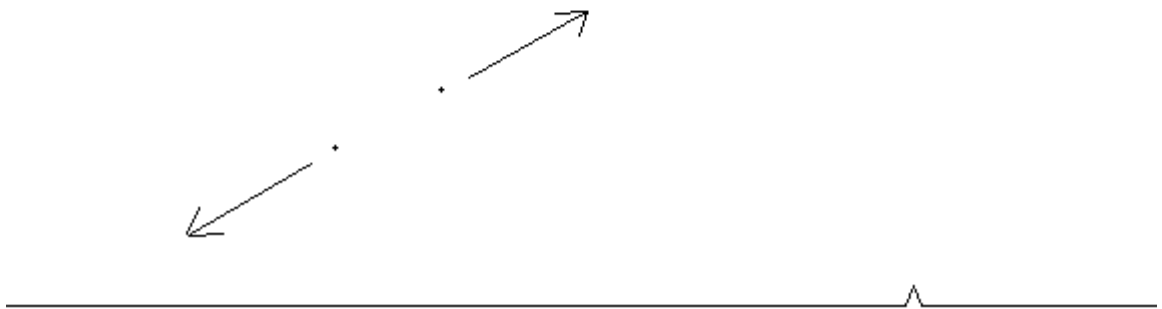




**moto re**

$$v = 2.0 * c$$

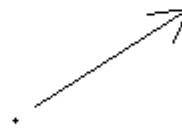
**echi visti dall'osservatore  
Le frecce indicano il moto  
apparente degli echi**



$$v = 2.0 * c$$

L'  
al

**gli echi si allontanano tra loro. Alla fine ne rimane uno solo**



In altri termini, solo quando l'aereo è ormai lontano dalla stazione sonar, questa irradia echi assai precedenti. Inoltre, gli echi sono doppi, l'uno in moto nella direzione dell'aereo.

Benché l'aereo sia doppiamente supersonico, i due echi si muovono entrambi alla stessa velocità.

Infine, entrambi gli echi scompariranno, come per incanto, in momenti diversi.

In altri termini, i nostri stupefatti addetti sonar rileveranno (quando l'aereo sarà già lontano) un unico eco in una zona del cielo, e che quindi si divide in due porzioni, che si muovono alla stessa velocità nota, l'ormai famosa  $c$  (in questo caso, 300 m/sec).

Morale, e senza necessità alcuna di entrare in dettagli di analisi tensoriale, una velocità di un rapido veicolo di informazione disponibile, qualunque cosa viaggi più veloce sarà, non potrà essere causa indiretta di fenomeni strani, che non si inquadrano nella teoria del *bang* sonico dell'esempio precedente, l'oggetto *apparentemente* scisso in due parti.

Ricapitolando, non c'è alcuna equazione della Relatività, sia Ristretta che Generale, che ammetta velocità maggiore di  $c$ .

L'unica affermazione, peraltro ovvia, è che un eventuale moto di questo genere non può, genererebbe fenomeni sostanzialmente assurdi, non inquadrabili nei canoni della fisica.

Ma, ancora più strano, a livello di Relatività Generalizzata, è perfettamente ipotizzabile che due echi, nati dallo stesso istante da uno stesso punto, e giungano ad uno stesso traguardo, l'uno prima dell'altro.

stessa velocità (al limite, entrambi alla velocità della luce).

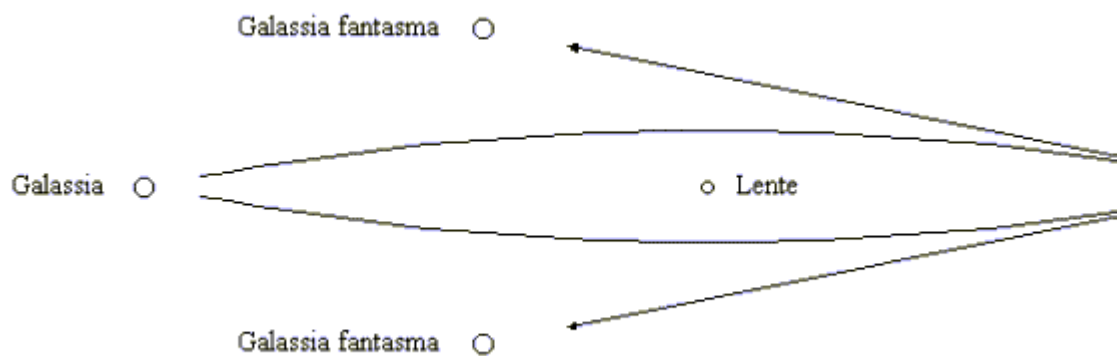
A prima vista, la cosa è banale: se pensiamo a due auto che partano dalla stessa muovendosi alla stessa velocità, ma lungo percorsi diversi, è ovvio che una arrive

L'apparente assurdo emerge quando si parla di  $c$ :  $c$ , per definizione, è la massima se lo spazio ed il tempo si deformassero opportunamente onde facilitare la vita all

Pure, è sempre possibile, come nell'esempio delle due automobili, che due raggi arrivino in istanti diversi allo stesso traguardo.

Anche senza entrare in dettagli relativistici, ciò accade in qualunque lente ed in qu scinde la luce solare nei colori dell'iride deriva dal fatto che alcuni raggi luminosi ir medesima meta.

È ben noto il funzionamento di una "lente gravitazionale": se fra una galassia lontana una grande massa (ad esempio un buco nero), esso distorce la traiettoria dei raggi remota, generando quindi immagini di galassie fantasma.



Se la fonte di massa è isotropa nello spazio, le immagini fantasma ci si presenteranno in tutte le direzioni della galassia reale (che sarà invisibile in quanto il buco nero impedirà a

Sono ormai note molte lenti gravitazionali, tutte abbastanza anisotrope, per cui esse mostrano immagini multiple dell'oggetto invisibile dietro al buco nero.

Se il buco nero fosse leggermente fuori asse, e quindi la luce dalla galassia remota non arriverebbe direttamente, avremmo molte immagini della galassia remota, giunte in istanti diversi. Tutte queste informazioni luminose, partite nello stesso momento, e tutte in moto alla stessa velocità, arrivano in tempi diversi, come se alcune fossero più veloci di altre!

L'autore di queste note ritiene un motivo di orgoglio l'essere stato plagiato da Einstein. Ha passato anni in anticipo! (stiamo o no parlando di relatività dei tempi?)

Scherzi a parte, sin dalla prima formulazione della Relatività, si è sottolineato il fatto che la velocità della luce nel vuoto sia unicamente da imputarsi all'esperienza diretta, e non a motivi te