



# *Naviglio Piccolo*

Mercoledì 18 marzo 2015 - ore 21.00

## **Eppur si muove ... ancora**

### **Caccia al killer seriale delle certezze terrestri Cronache di un viaggio nello spaziotempo**

Lezione a cura di

### **Maria Cristina Fighetti e Pierluigi Boschetti**

L'idea che l'uomo si fa del mondo in cui vive subisce periodici attentati, spesso letali, ma poi risorge, come l'Araba Fenice, rivisitata o del tutto nuova, dai Greci ai contemporanei, da Copernico, Newton, Maxwell, Einstein fino ai killer più insidiosi...

Il 3 Dicembre 2014, al "Naviglio Piccolo", **Maria Cristina Fighetti** e **Pierluigi Boschetti** hanno iniziato a segnalare i più gravi attentati alle certezze scientifiche, con il supporto di testimonianze e immagini. Abbiamo ripercorso alcuni avvenimenti in tempi storici, fino ad arrivare nel secolo scorso, prossimo e non ancora digerito, perché sconvolgente sul piano filosofico della conoscenza.

E anche oggi non è finita...

Abbiamo già visto come la teoria quantistica abbia abbattuto definitivamente certezze quali il principio di causa – effetto, per sostituirle con una visione statistica che propone un mondo basato sulla probabilità.

Questa seconda puntata si occupa dell'omicidio *dell'uomo sul trono al centro del Creato* e della nascita *dell'esploratore dell'Universo*.

Qualcuno ha incatenato il tempo allo spazio e mostrato come la gravità non sia una forza, ma il modo di essere dello spaziotempo.

Nel vuoto più assoluto, si aggira il fantasma dell'etere nei suoi travestimenti e la teoria quantistica fa a botte con la relatività.

**Viale Monza 140 (M1 Gorla - Turro)**

Informazioni: [www.navigliopiccolo.it](http://www.navigliopiccolo.it) email [naviglio.piccolo@navigliopiccolo.it](mailto:naviglio.piccolo@navigliopiccolo.it)



# *Naviglio Piccolo*



# Naviglio Piccolo

## Eppur si muove ... ancora

### Spazio e tempo

Sembrano idee semplici, intuitive, ma S. Agostino diceva:” Che cos'è dunque il tempo? Quando nessuno me lo chiede, lo so; ma se qualcuno me lo chiede e voglio spiegarglielo, non lo so.”. L'analisi di tali concetti ha sempre provocato il pensiero dell'uomo, a cominciare dai filosofi greci e via via attraverso il Rinascimento fino ai nostri giorni..

### Il pensiero prescientifico

Lo spazio di volta in volta è stato inteso come il contenitore degli oggetti materiali o come qualità che si riferisce alla loro posizione.

Il vero problema riguardo allo spazio si presentò con Zenone che parlando dello spazio non più come vuoto (non ente), ma come luogo, ne rilevava profonde contraddizioni. Infatti, diceva: “Se lo spazio esiste, deve esistere in qualche posto e quindi in un nuovo spazio; ma la stessa situazione si ripete per questo secondo spazio, sicché il concetto di spazio si dimostra contraddittorio e assurdo”. Per Aristotele lo spazio non è pensabile senza un corpo contenuto: al contrario della dottrina dei pitagorici, non è il corpo ad avere bisogno di uno spazio per essere collocato, ma al contrario, se non si desse corpo, non si darebbe neppure il luogo che lo contiene. Ad esempio, ogni corpo celeste individua per Aristotele un proprio luogo, e cioè, nel suo pensiero, una particolare “sfera celeste”.

Nel Rinascimento ci fu una grande fioritura di teorie, preludio all'imminente rivoluzione scientifica, coniugando nuovi modelli cosmologici con l'osservazione empirica dei fenomeni celesti.

Già Bernardino Telesio delinea, in opposizione ad Aristotele, la tesi di uno spazio unitario, omogeneo, pura “attitudine a ricevere i corpi” privo di differenziazioni qualitative e di direzioni privilegiate. Fu soprattutto Giordano Bruno (De immenso et innumerabilibus 1590-91) a sviluppare compiutamente un'idea dello spazio nettamente alternativa a quella aristotelica; Bruno, infatti, concepì lo spazio come ente infinito e uniforme, quantità continua e indivisibile, che tutto comprende, senza essere da nulla compreso; da queste qualità dello spazio egli dedusse l'infinità dei mondi e dell'universo, rifiutando la concezione aristotelica dei luoghi, e aprendo così la strada alla fisica, all'astronomia e alla cosmologia moderne. Cartesio, nella sua rigorosa riduzione del mondo fisico alle caratteristiche della geometria, pervenne alla riduzione della materia a pura tridimensionalità, identificandola perciò con l'estensione in lunghezza, larghezza e profondità. Ciò consentì, una volta liberata la materia da ogni altra qualità, di descriverne il comportamento in termini puramente meccanici, ma l'identificazione di estensione e materia gli impedì di concepire l'esistenza del vuoto e intese il movimento in termini puramente relativi. Quando due corpi mutano il loro reciproco rapporto, è frutto di pura convenzione affermare che uno dei due si è mosso e l'altro è rimasto immobile.



# Naviglio Piccolo

## Newton

Ma veniamo al momento in cui la scienza si affaccia sul teatro della conoscenza, nella seconda metà del XVII secolo, con Galilei e Newton, resi poeticamente da Ugo Foscolo ne "I Sepolcri":

*... e di chi vide  
sotto l'etereo padiglion rotarsi  
più mondi, e il Sole irradiarli immoto,  
onde all'Anglo che tanta ala vi stese  
sgombrò primo le vie del firmamento:*

Le riflessioni di Newton sullo spazio sono ben sintetizzate in un esperimento tanto semplice quanto ricco di spunti anche filosofici. Si tratta dell'esperimento noto come "il secchio di Newton" del 1689, che è diventato un protagonista della storia della fisica.



Vediamo come si realizza questo semplice esperimento.

Si prende un secchio appeso a una corda e pieno d'acqua, facendolo girare su se stesso in modo che si attorcigli la corda fin che è possibile, e poi si lascia libero di ruotare. La corda si srotola e il secchio comincia a girare, e la superficie dell'acqua inizialmente piana, diventa sempre più concava man mano che l'attrito le comunica la velocità del secchio, e questo è tutto.

Semplice no? Perché la superficie dell'acqua diventa concava?

Tutti siamo pronti a rispondere che dipende dalla forza centrifuga. Ma il punto è proprio qui, la "forza centrifuga" non è una forza, perché non c'è un'interazione tra corpi, ma c'è solo il movimento rotatorio del sistema di riferimento.

Il fatto è che da più di trecento anni ci si sforza di capire cosa sia realmente la "forza centrifuga", coinvolgendo nei tentativi gli scienziati e i filosofi della scienza, e s'intuisce che la piena comprensione di questo fatto potrebbe permetterci di progredire nella comprensione della struttura dell'universo.

## Il moto

Per introdurci alla comprensione di questo esperimento partiamo un po' da lontano; e precisamente parliamo della velocità. Cosa c'entra la velocità con lo spazio e il tempo? Beh, la velocità è il rapporto tra lo spazio e il tempo, allora l'analisi della velocità ci dà indicazioni sulla struttura dello spazio e del tempo.

Bene, procediamo. Sappiamo tutti che la velocità di un moto dipende da chi lo osserva. Sarà capitato a tutti di essere su un treno in stazione e di percepire un inizio di movimento, ma di avere impiegato un po' di tempo per accorgersi se il treno che si muove in realtà è il nostro o quello a fianco, o entrambi. Per definire il moto è quindi necessario specificare, rispetto a cosa ci si muove. Potremmo dire "rispetto alla stazione" e allora la scelta di quale treno si muove è univoca; in mancanza del riferimento "stazione" si può sostenere con pari diritto sia che si muove il mio treno, sia che si muove l'altro.

Tuttavia esistono dei moti dei quali ci si accorge anche senza un riferimento e sono i moti accelerati. Ad esempio, in un treno che sta accelerando o che cambia repentinamente direzione ci si sente sbalottati da una parte o dall'altra. Perché le accelerazioni sono così speciali? Che cosa hanno di speciale che le rende percepibili da ogni osservatore, indipendentemente dalla definizione di un riferimento? È una questione rilevante, che tocca temi molto complessi che riguardano il significato di spazio e di tempo.

*Il secchio*



# Naviglio Piccolo

Ritorniamo al nostro secchio. Abbiamo visto che dopo un po' dall'inizio della rotazione, la superficie dell'acqua comincia a diventare concava. Perché? Saremmo tentati di dire subito: perché l'acqua ruota, ma Newton non si accontentò. Ruota rispetto a cosa? Il secchio parrebbe essere il riferimento più ovvio, ma Newton capì subito che non poteva funzionare. Infatti, all'inizio, quando il secchio comincia a girare e l'acqua è ancora ferma, esiste un moto relativo tra il secchio e l'acqua, ma la sua superficie resta piana. Dopo un po' quando l'acqua gira alla stessa velocità del secchio, la superficie è concava. Se ne dovrebbe concludere che quando esiste un moto relativo tra l'acqua e il secchio, la superficie è piana, quando non esiste moto relativo è concava. Però all'inizio sono rispettivamente fermi e la superficie è piana. Vediamo cosa succede proseguendo nell'esperimento; la corda si attorciglia dall'altra parte rallentando il secchio fino a fermarlo, mentre l'acqua continua a ruotare, a questo punto c'è ancora moto relativo tra acqua e secchio (l'acqua continua a ruotare mentre il secchio è fermo), ma la forma della superficie è concava!

Evidentemente il riferimento scelto presenta qualche incongruenza.

## *Lo spazio tempo*

Newton introdusse allora la sua idea radicale di spazio e di tempo.

**Esistono uno spazio e un tempo assoluti rispetto al quale indicare se un corpo si muove e che moto fa.**

**Lo spazio, che segue strettamente la geometria euclidea, è indipendente dall'esistenza di corpi materiali, è un contenitore vuoto, indifferente alla materia in esso contenuta e all'osservatore che in esso analizza i movimenti della materia.**

**Il tempo assoluto è un fluire eterno ed uniforme, uguale per tutti gli osservatori, qualunque sia il loro moto.**

Pur convenendo sulla difficoltà o addirittura sull'impossibilità di percepire lo spazio assoluto, sosteneva che aveva effetti osservabili: le accelerazioni, ad esempio quelle che accadono nel secchio che ruota, esistono in relazione allo spazio assoluto.

Sappiamo che solo il moto relativo è importante; tuttavia nella visione di Newton, anche se siamo liberi di valutare il mondo da qualsiasi prospettiva, ce n'è una "più uguale" delle altre, quella del riferimento assoluto. Per una formica sullo stivaletto di un pattinatore, sono il ghiaccio e le tribune che ruotano, per uno spettatore, invece, è il pattinatore che ruota. Le due posizioni sembrano altrettanto valide, ma nella visione newtoniana una è più esatta dell'altra. Se è il pattinatore che ruota rispetto allo spazio assoluto, le sue braccia tendono ad allargarsi, mentre se è il palazzo del ghiaccio a farlo, e il pattinatore no, sulle braccia non si esercita alcuna forza. L'esistenza dello spazio assoluto sembra chiudere la questione.

La forma concava della superficie dell'acqua diventava così una prova, seppure indiretta, dell'esistenza dello spazio assoluto. Lo spazio assoluto rispetto al quale l'acqua "ruota" fa effettivamente la differenza tra le condizioni di moto relativo tra acqua e secchio all'inizio e alla fine; rispetto allo spazio assoluto all'inizio dell'esperimento, l'acqua è ferma, mentre alla fine l'acqua ruota! Si conclude univocamente che l'acqua ferma rispetto allo spazio assoluto presenta una superficie piana, mentre in rotazione la presenta concava.

Naturalmente si affaccia subito la questione di sapere cos'è lo spazio assoluto, ma qui Newton diventa vago "non definisco, invece, spazio, tempo, luogo e moto, perché notissimi a tutti", limitandosi a descriverlo così: "lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione a qualcosa di esterno, rimane sempre simile e immobile".

Non si dissolvono così le difficoltà secolari, che hanno circondato questo concetto. Esiste una differenza fra lo spazio e la materia? Esiste lo spazio indipendentemente dalla



# Naviglio Piccolo

presenza di oggetti materiali? Esiste lo spazio vuoto? Spazio e materia si escludono a vicenda? Lo spazio è finito o infinito?

## Leibniz

Leibniz, contemporaneo di Newton, credeva fermamente che lo spazio in sé non esistesse. Parlare dello spazio è solo un modo semplice e pratico per identificare quel luogo in cui le cose sono relative le une alle altre. Un chiaro esempio dell'idea di Leibniz è dato dall'alfabeto, esso stabilisce delle relazioni tra le lettere, la a precede la b, che a sua volta è seguita dalla c etc., ma se escludiamo le lettere costituenti, l'alfabeto non esiste. Al contrario di Leibniz, Newton aveva spostato il dibattito da un piano puramente filosofico, al mondo dei dati scientificamente verificabili.

## Ernst Mach

Circa duecento anni dopo, il fisico e filosofo Ernst Mach (1838-1916), non era tanto propenso a digerire la questione dello spazio assoluto. La sua linea di pensiero nel riesaminare l'esperimento del secchio di Newton, fu di prestare maggior attenzione alla possibile esistenza di altri riferimenti evidenti all'esperienza, rispetto ai quali considerare la rotazione dell'acqua. Che dire delle stelle fisse nel cielo? Se ci mettiamo a ruotare nello spazio cosmico, sentiamo che sulle nostre braccia si esercita una forza, e nello stesso tempo le stelle non sono più ferme, ma seguono ampie traiettorie circolari. Ne deduciamo una correlazione tra la forza esercitata sul nostro corpo e la consapevolezza del moto rispetto alle stelle distanti. La domanda che si pose immediatamente fu: nello spazio assolutamente vuoto, senza stelle, senza galassie, senza niente di niente, se iniziassimo a ruotare, ce ne accorgeremmo? In base all'esperienza quotidiana penseremmo di sì, ma la situazione in esame, non è paragonabile alla nostra esperienza quotidiana. Stiamo esaminando una situazione in cui non ci sono oggetti materiali vicini o lontani cui riferire il nostro moto. Su questa base Mach fece una proposta coraggiosa: nel caso descritto, non potrebbe esserci il modo di percepire una differenza tra i vari stati di rotazione, e se non vi sono parametri di riferimento, rotazione o no è la stessa cosa.

Mach concluse dicendo che nello spazio reale è la presenza delle stelle, delle galassie e di tutta la materia dell'universo ad esercitare sull'acqua che gira nel secchio la forza che le fa assumere la forma concava che noi osserviamo.

Distinguere tra la posizione di Newton e quella di Mach è semplicissimo, basta osservare un pattinatore nel palazzo del ghiaccio e mettere in rotazione l'intero universo intorno a lui, palazzo, Terra, sistema solare, galassie etc. se sulle braccia del pattinatore non si esercita nessuna forza, siamo obbligati a riconoscere la giustezza dell'idea di Newton, altrimenti, visto che la materia intorno al pattinatore esiste ancora, è giusta l'idea di Mach. Semplice vero? Ma non molto pratico.

Fin qui abbiamo parlato di spazio; per il tempo, concetto un po' più complesso, entrambi la pensavano allo stesso modo, pur basandosi più su preconcetti che su osservazioni. Riportiamo ad esempio cosa dice Newton nei suoi *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*: "Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente". Una conseguenza immediata della concezione dello spazio e del tempo assoluti è che tutti gli osservatori in qualsiasi





# Naviglio Piccolo

posizione o stato di moto si trovino, quando misurano distanze o intervalli di tempo trovano gli stessi risultati. Dobbiamo evidenziare qui che, per un fisico sperimentale, spazio e tempo per essere ben definiti devono essere misurati, deve cioè essere stabilito un metodo di misura efficace ed accurato.

## Relatività ristretta

Nel 1905 fu pubblicato l'articolo di Einstein "Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento", titolo non molto pretenzioso, se pensiamo alla rivoluzione che ebbe a scatenare nella concezione dello spazio e del tempo.

Einstein, giovane ricercatore, basò le sue osservazioni su due fatti cruciali che i fisici stavano cercando invano di dimostrare:

- L'esistenza dell'etere, cioè del mezzo che supporta la trasmissione delle onde luminose
- La composizione delle velocità per la luce

Con l'audacia che solo un giovane estraneo agli accademismi poteva avere, concluse con le seguenti ipotesi:

**"Se l'etere non si trova, se ne può fare a meno, e se non si trova differenza tra la velocità della luce, misurata in diverse condizioni di moto, vuol dire che la velocità della luce è sempre la stessa per tutti gli osservatori".**

Dire che le conseguenze di queste due semplici ipotesi sono state drammatiche è quasi un eufemismo. Lo spazio e il tempo non erano più un assoluto, come nella visione di Newton, ma la loro misura dipendeva dallo stato di moto degli osservatori. Due osservatori in movimento tra di loro, quando misuravano la distanza tra due punti o la durata dei fenomeni, ottenevano risultati diversi. Lo spazio e il tempo erano strettamente interconnessi e certamente ben lontani da come li concepivano Newton e anche Mach. Le ipotesi di Einstein successivamente ottennero numerose verifiche sperimentali, ma le conseguenze che ne derivavano facevano a pugni con il senso comune.

Fu Max Planck a suggerire la parola relatività, per indicare la soggettività delle descrizioni dei fenomeni fisici fatte da osservatori in moto uniforme relativo tra loro. Soggettività da intendersi, non come arbitrio, ma come risultato di processi di misura legati da precise relazioni, come descritto nella teoria di Einstein.

La matematica della relatività ristretta (moti uniformi) si può rendere molto semplice, utilizzando solo l'algebra che s'impara nelle scuole medie, ma è d'incomparabile difficoltà concettuale perché urta contro il senso comune. I suoi risultati sembrano incredibili alla luce della nostra esperienza quotidiana, anche se ampiamente suffragati dagli esperimenti. In effetti, le differenze sono sensibili solo per movimenti che avvengono a velocità prossime a quelle della luce che è di circa 300.000 km/s. È una velocità che non possiamo sperimentare ordinariamente, neanche sulle stazioni spaziali che raggiungono "solo" i 30000 km/h circa.

## *Effetti sul tempo*

Incominciamo a descrivere qualcuna di queste "stranezze" che capitano in uno spaziotempo relativistico. Due eventi che avvengono contemporaneamente per un osservatore non sono più simultanei per un altro osservatore in moto uniforme rispetto al primo. Questa è certamente una novità: fin qui non era mai stato messo in dubbio che il tempo scorresse uniformemente identico per tutti, e che tutti gli osservatori misurassero lo stesso tempo indipendentemente dal fatto che siano fermi o in movimento. Con Einstein

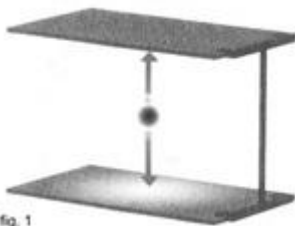


# Naviglio Piccolo

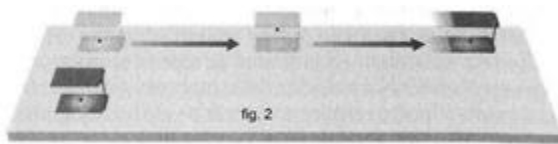
invece la simultaneità degli eventi, viene a dipendere proprio dal moto di chi li osserva. Mettiamo in scena una piccola rappresentazione che ci permetta di capire perché.

Aldo e Giacomo si sfidano a duello mentre si trovano alle estremità opposte della carrozza di un treno; Giacomo sul retro e Aldo sul davanti, verso la locomotiva e quindi nella direzione del moto. Due giudici, uno sul treno e uno sul marciapiede controllano la correttezza del duello. Le parti concordano di sparare quando esploderà un mucchietto di polvere da sparo posto al centro della carrozza. Il giudice sul treno accende la miccia e nell'attimo dell'esplosione, Aldo e Giacomo estraggono e sparano. Il giudice sul treno, considerato che i duellanti si trovano alla stessa distanza dall'esplosione, è certo che il bagliore dell'esplosione li raggiungerà nello stesso istante, e conferma la regolarità della procedura. Il secondo giudice sul marciapiede ne proclama a gran voce la scorrettezza, sostenendo che Giacomo ha visto il segnale prima di Aldo, perché, vista la direzione in cui avanza il treno, Giacomo va incontro alla luce dell'esplosione, mentre Aldo se ne sta allontanando. Ciò significa che la luce dell'esplosione ha percorso un tragitto minore per raggiungere Giacomo e poiché la velocità della luce è costante, impiega anche un tempo minore. Quindi nessuno sta barando, È proprio la struttura dello spaziotempo che comporta questo effetto. Possibile che non se ne sia mai accorto nessuno? In verità, il senso comune si confronta sempre con situazioni in cui le velocità in gioco sono ben lontane dalla velocità della luce ed è facile verificare che se le velocità del treno dei due duellanti fossero anche quelle di un treno superveloce a 300 km/h, le differenze di tempo sarebbero dell'ordine di un trionesimo di secondo, che nessun orologio, neanche quelli atomici, può rilevare!

Ma nello spaziotempo relativistico il moto influenza anche la durata dei fenomeni! Vediamo: assumiamo innanzitutto un punto di vista pragmatico e definiamo il tempo come la quantità misurata da un orologio. E per studiare come il moto influenzi lo scorrere del tempo, data la nostra definizione operativa, analizziamo come il moto modifichi i cicli degli orologi. Consideriamo l'orologio concettualmente più semplice che in questa situazione si possa pensare: il cosiddetto "orologio a luce".

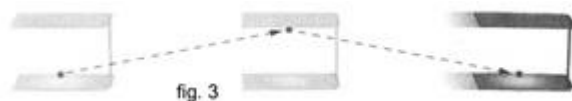


Lo vediamo in fig. 1. Due piccoli specchi paralleli e un fotone che rimbalza tra i due, e definiamo il tempo in base al numero delle oscillazioni compiute dal fotone. Se, ad esempio, la distanza tra gli specchi fosse di 15 cm, il fotone compirebbe un giro completo in un miliardesimo di secondo, quindi chiameremo "secondo" il tempo che impiega il fotone a compiere un miliardo di cicli.



Siamo in condizione di capire come il movimento influenza lo scorrere del tempo per due orologi "a luce" di cui uno in moto rispetto all'altro.

Nella fig. 2, sono rappresentati i due orologi a confronto, in basso l'orologio "fermo" e sopra quello in moto. Chiediamoci se dal punto di vista dell'orologio "fermo", un suo ciclo corrisponda a un ciclo completo anche per l'orologio in movimento. Il tragitto che segue il fotone nell'orologio in moto è il tragitto in diagonale che vediamo nella fig. 3.



Chiaramente fa un percorso più lungo e, *poiché ancora una volta dobbiamo evidenziare che la luce ha una velocità indipendente dallo stato di moto*, naturalmente impiega più tempo a fare un ciclo completo. Quindi l'orologio in moto batte il tempo più lentamente, e il tempo scorre più lento per l'orologio in moto. Aggiungiamo che, da quanto abbiamo appena visto, il rallentamento dell'orologio in movimento dipende dal percorso aggiuntivo che il fotone deve fare per completare un ciclo. Questo dipende dalla velocità dell'orologio rispetto all'osservatore fermo: quanto più





# Naviglio Piccolo

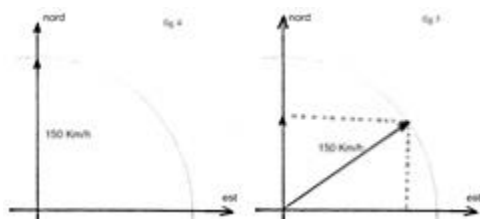
aumenta la velocità tanto più il percorso diagonale si allunga, e l'orologio rallenta sempre di più. Sottolineiamo che l'effetto è relativo solo alla direzione lungo la quale avviene il movimento, mentre non esiste effetto lungo la direzione perpendicolare. Dobbiamo anche osservare che nella nostra esperienza quotidiana non abbiamo nessuna evidenza di un fenomeno di questo tipo, perché le velocità cui siamo avvezzi sono lontanissime dalla velocità della luce. Un fenomeno che invece è inspiegabile se non con questo "rallentamento" degli orologi in movimento è la penetrazione dei raggi cosmici attraverso l'atmosfera .

I muoni, particelle elementari che si trovano nei raggi cosmici, hanno una vita media di 1,5 microsecondi misurata in laboratorio a bassa velocità, cioè dopo quel tempo si disintegrano. Nei raggi cosmici essi viaggiano al 99,92% della velocità della luce. Con la vita media misurata in laboratorio e a quella velocità farebbero un percorso di 450 m prima di "morire". L'atmosfera ha uno spessore di 15000 m, quindi i muoni non potrebbero attraversarla, come invece fanno. Il punto è che noi da terra vediamo i mesoni in moto e quindi con il tempo di vita aumentato, secondo la relatività, permettendo che riescano a percorrerla. I muoni dal loro punto di vista vivono il tempo del laboratorio perché sono *fermi* ma misurano l'atmosfera, in moto rispetto a loro, più corta e quindi riescono ad attraversarla.

## Effetti sullo spazio

Che dire dello spazio? Immaginiamo di osservare la lunghezza di un'automobile in moto, misurata da chi sta a bordo, e da chi sul ciglio della strada. Quest'ultimo la misura intanto che gli passa davanti. Chi è a bordo, fermo rispetto all'auto non ha problemi a misurarne la lunghezza. Chi la misura mentre gli sfreccia davanti, per trovarne la lunghezza, non può farlo direttamente, ma può cronometrare il tempo che impiega la macchina a passargli davanti e poi moltiplicarlo per la velocità. Chi è al bordo della strada si muove rispetto all'automobile e quindi con un orologio rallentato misurerà un tempo di passaggio più breve. In definitiva la moltiplicazione per la velocità darà chiaramente una misura più corta della lunghezza della macchina. Le distanze spaziali sono contratte per gli osservatori in moto!

Come già detto per l'effetto sul tempo, anche la contrazione delle lunghezze avviene solo lungo la direzione del movimento, le lunghezze in direzione perpendicolare al movimento restano invariate. Newton riteneva che il moto nel tempo fosse distinto dal moto nello spazio, cioè che tra questi due tipi di movimento non ci fosse nessuna relazione. Einstein invece capì che erano strettamente correlati. Una grande scoperta rivoluzionaria!



Premettiamo una semplice considerazione sul movimento. Immaginiamo un'auto che va verso nord alla velocità di 150 km/h (fig. 4). Se, sempre a 150 km/h va verso nord est, chiaramente la componente di velocità verso nord diminuisce, mentre aumenta la

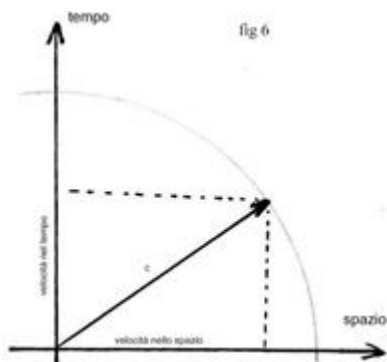
velocità verso est (fig. 5).

Ritorniamo alla scoperta di Einstein. Minkowski, un matematico lituano, reinterpretando lo spaziotempo della relatività come uno spazio a quattro dimensioni, tre per lo spazio ordinario e una per il tempo, fornì ad Einstein il supporto adatto a concretizzare le sue intuizioni. Einstein scoprì che lo stesso concetto, cioè la ripartizione del moto tra le varie dimensioni, sta alla base delle strane leggi della relatività. In particolare il moto può essere ripartito non solo tra le dimensioni spaziali, ma anche in quella temporale. Ed ecco la grande intuizione di Einstein: tutti gli oggetti sono sempre in movimento nello spaziotempo



# Naviglio Piccolo

a quattro dimensioni con una velocità fissa, quella della luce. Strano, siamo abituati a dire che i corpi devono avere sempre una velocità inferiore a quella della luce! In realtà l'affermazione è relativa allo spazio ordinario, qui stiamo parlando di velocità generalizzata nello spazio tempo a quattro dimensioni! Avendo appena parlato di spazio e tempo come due diversi tipi di dimensione, possiamo parlare di velocità nella dimensione tempo? Sì.



Visualizzare la “velocità generalizzata” nello spazio a quattro dimensioni è impossibile. Come supporto alla nostra intuizione però, possiamo considerare la fig. 6. Lo spazio è rappresentato dall'asse orizzontale, e il tempo da quello verticale. La “velocità generalizzata” è sempre la velocità della luce “c”, con una componente orizzontale che è l'ordinaria velocità nello spazio, e una componente verticale che è la velocità nel tempo. Come si presenta il moto di un'auto nello spaziotempo? Un'auto che dal nostro ordinario punto di vista è ferma, in realtà sta compiendo tutto il suo movimento nel tempo. Se l'auto comincia a muoversi, una

parte della velocità del suo moto totale, che ricordiamo essere sempre “c”, è utilizzata per compiere il suo moto nello spazio. In questo caso l'auto rallenta la sua velocità nel tempo per acquistarla nello spazio, come accade alla macchina nelle considerazioni precedenti che diminuisce la sua velocità verso nord, per acquistarla verso est. Il rallentamento dell'auto nel tempo implica che il tempo scorre più lento per la macchina in movimento di quanto non lo faccia per noi e per tutto ciò che sta fermo. Per qualsiasi velocità combinata nello spazio e nel tempo, più è grande la componente nello spazio, minore è quella nel tempo e viceversa. Per osservatori in movimento, il tempo scorre più lentamente di quello di osservatori fermi. Ritroviamo attraverso queste considerazioni, quanto avevamo visto sul rallentamento del tempo per gli orologi in moto. La luce, che viaggia sempre alla sua velocità massima, “c”, nello spazio, è speciale, perché avendo la velocità nello spazio uguale alla sua velocità complessiva, implica necessariamente che la sua velocità nel tempo è nulla, cioè il tempo è addirittura fermo!

Nel 1971 Hafele e Keating verificarono sperimentalmente la veridicità del rallentamento del tempo per gli osservatori in moto, confrontando il tempo di orologi atomici al cesio, (il massimo ottenibile di precisione per la misura del tempo) su aerei di linea e a terra. Notarono una differenza di alcune centinaia di miliardesimi di secondo in accordo con quanto previsto dalla relatività ristretta. L'universo funziona davvero così.

Fin qui tutto bene, ma il secchio in questa teoria viene spiegato? Beh, Einstein non aveva sostenuto che tutto è relativo, un assoluto resisteva ancora: “lo spaziotempo assoluto” rispetto al quale verificare le accelerazioni, come quella ancora in ballo del secchio di Newton. È lo spaziotempo il giudice inappellabile del moto accelerato: è il sistema di riferimento rispetto al quale si può sostenere che qualcosa, tanto per dire, un secchio, ruota in un universo altrimenti vuoto. Ecco la spiegazione di Einstein è simile a quella di Newton, sostituendo lo spazio assoluto newtoniano con lo spaziotempo di Einstein. Cioè si spiega che il secchio sta accelerando rispetto allo spaziotempo assoluto. Ricapitolando la situazione: secondo Newton il secchio ruota rispetto allo spazio assoluto, secondo Mach non ha nemmeno senso affermare che il secchio ruoti, secondo Einstein rispetto allo spaziotempo assoluto.



# Naviglio Piccolo

## Relatività generale

Abbiamo risolto tutto? No, la verità è più complessa e interessante, lo spettacolo prosegue.

Einstein, nonostante le conclusioni opposte a quelle di Mach, era affascinato dalle idee del fisico austriaco. Mach aveva attribuito alle stelle lontane e all'altra materia presente nell'universo la forza che spinge le nostre braccia all'esterno quando ruotiamo o che spinge l'acqua nel secchio a risalire lungo le pareti a formare la tipica concavità, ma non aveva indicato il meccanismo in base al quale ciò succedeva. Einstein cominciò a sospettare che avesse a che fare con la gravità.

## Contrasto tra gravità e relatività

Einstein aveva due buoni motivi per indagare i rapporti tra la relatività ristretta e la gravità, così com'era concepita da Newton. Come vedremo tra poco gravità e relatività ristretta sono incoerenti tra di loro e poi la gravità avrebbe potuto fornire a Mach la spiegazione mancante della forza che agisce sull'acqua nel secchio in rotazione e in generale sulle accelerazioni.

La gravità newtoniana agisce istantaneamente tra masse a qualunque distanza. La gravità sarebbe più veloce della luce: impossibile! La gravità newtoniana e la relatività presentano un insanabile contrasto.

Al riguardo Einstein sviluppò una teoria chiamata relatività generale, riuscendo a chiudere il cerchio e a rispondere definitivamente all'interrogativo sollevato dal secchio di Newton: qual è la vera natura del moto accelerato.

In un giorno del 1907 Einstein, *grazie a una di quelle intuizioni che ogni scienziato desidererebbe avere una volta nella vita, si rese conto che gravità e moto accelerato sono due facce della stessa medaglia.* Formulò la sua intuizione nel cosiddetto *Principio di equivalenza*. Esso stabilisce che gli effetti dell'accelerazione non si possono distinguere da quelli della gravità. Per un osservatore assoggettato a un'accelerazione qualsiasi, tutte le leggi della fisica apparirebbero come ad un osservatore fermo in un campo gravitazionale; in altri termini non ci sarebbero misure capaci di fare distinzione tra queste due situazioni. Per chiarire ancora un po', appoggiati sulla cuccetta di un razzo, che accelera verso l'alto, ci si sente spinti da una forza contro il materasso; ma restando al chiuso nel razzo, non si può sapere se si sta accelerando verso l'alto, o se un campo di gravità ci attira verso il basso.

Stabilito il nesso tra gravità e accelerazione, Einstein era pronto a raccogliere la sfida di Newton e a cercare di spiegare in che modo la gravità eserciti la sua influenza. Perché è così importante la connessione tra la gravità e l'accelerazione? Perché, mentre la gravità è misteriosa, l'accelerazione è ben più comprensibile e quindi può essere utile per descrivere la gravità.

## La curvatura dello spazio



Per comprendere un po' meglio, come la gravità altera la struttura dello spaziotempo, consideriamo un moto accelerato in cui cambia la direzione della velocità, ma non il suo modulo, come nel moto rotatorio della giostra qui accanto. Ora in base al Principio di Equivalenza questo moto accelerato rappresenta un campo di gravità, (una gravità artificiale come nei progetti delle stazioni spaziali), di cui quindi possiamo capire la struttura.



# Naviglio Piccolo

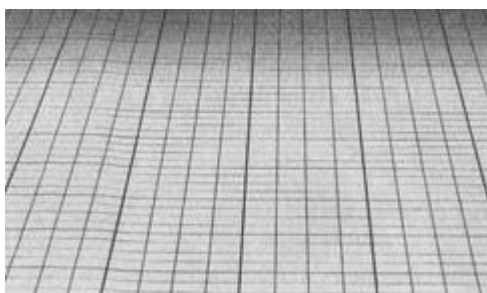
Bene, vediamo come si presentano lo spazio e il tempo a chi si ritrova lì dentro. Noi osservatori fermi possiamo usare un righello di lunghezza nota e vedere quante volte è contenuto nel raggio e nella circonferenza della giostra, ovvio che troveremmo un rapporto di  $2\pi$  tra la circonferenza della giostra e il suo raggio. Ma per chi è all'interno? Lanciamo un righello a Samantha e Pietro che sono sulla giostra e chiediamo di misurarne, il raggio e la circonferenza. Samantha misura il raggio e Pietro la circonferenza. Capiamo subito che Pietro troverà un risultato diverso dal nostro, che siamo fermi fuori dalla giostra. Il suo righello si muove proprio nella direzione del moto (freccia nella figura), pertanto, come abbiamo già descritto più sopra, si accorcia e sarà contenuto nella circonferenza un maggior numero di volte e la misura trovata da Pietro è maggiore di quella che abbiamo trovato noi. Samantha invece, troverà lo stesso nostro risultato, come misura del raggio, perché il suo righello non è rivolto nella direzione del moto, ma in direzione perpendicolare a questa e quindi, come abbiamo già sottolineato, non esiste accorciamento in direzione perpendicolare al movimento. Ne segue che Samantha e Pietro calcolando il rapporto tra la circonferenza e il suo raggio trovano un numero maggiore di  $2\pi$ . Com'è possibile? Se fin dall'antica Grecia il rapporto in questione doveva essere  $2\pi$ ? Einstein lo spiega così: il rapporto classico è vero solo per i cerchi disegnati su una superficie piana, mentre una superficie curva altera le consuete relazioni spaziali delle nostre immagini come in uno specchio deformante. *È come se lo spazio tempo all'interno della giostra fosse curvato dall'accelerazione o, che è lo stesso nella visione di Einstein, dalla gravità.*

Il moto accelerato non fa curvare solo lo spazio, ma anche il tempo, e qui, sebbene con la relatività ristretta ci siamo familiarizzati con l'idea di un'unione tra spazio e tempo, forse siamo un po' più sorpresi. Lo spazio curvo possiamo anche immaginarlo, magari riducendo il numero di dimensioni per aiutare l'intuizione, ma il tempo curvo cosa significa?

Per capire torniamo a Samantha e Pietro e chiediamo loro di fare un esperimento. Pietro deve restare fermo con la schiena appoggiata alla parete, mentre Samantha partendo dal centro deve raggiungerlo, fermandosi a ogni metro percorso e confrontare il suo orologio con quello di Pietro. Cosa otterranno? Noi fermi all'esterno possiamo prevedere i risultati. I due stanno procedendo a velocità diverse, più si è lontani dal centro e più spazio si deve percorrere per fare un giro; quindi la velocità aumenta con la distanza dal centro. Dalla relatività ristretta sappiamo che la velocità rallenta il tempo e quindi deduciamo che l'orologio di Pietro si troverà indietro rispetto a quello di Samantha, che inoltre scoprirà che il suo orologio rallenta man mano che si avvicina a Pietro (perché la sua velocità aumenta). All'interno della giostra quindi il tempo non scorre uniformemente, ma dipende dalla posizione (in questo caso dalla distanza dal centro). Diremo che il tempo si è incurvato se il suo scorrere varia con la posizione.

Dopo avere dimostrato che il moto accelerato curva lo spazio e il tempo e aver definito l'equivalenza tra accelerazione e gravità, Einstein compì il passo finale di spiegare il mistero della forza di gravità di cui Newton aveva illustrato efficacemente i risultati, ma della quale non aveva saputo spiegare la natura: la gravità è la curvatura dello spazio e del tempo.

Cerchiamo di capire un po' meglio. Cominciamo a ricordare che per Newton il Sole aggancia sé la Terra con un guinzaglio che è la forza di gravità che si propaga istantaneamente a grandi distanze.



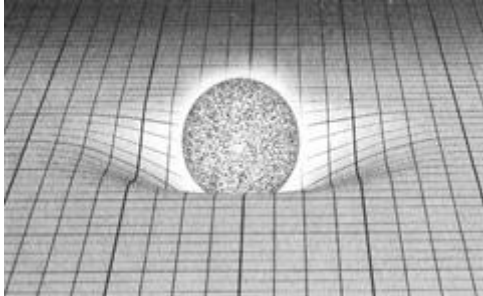
Per Einstein le cose sono diverse. Immaginiamo innanzitutto di trascurare il tempo e di pensare lo spazio solo con due dimensioni. In assenza di materia e di energia lo spazio è piatto, come è illustrato nella figura. Per millenni l'uomo si è





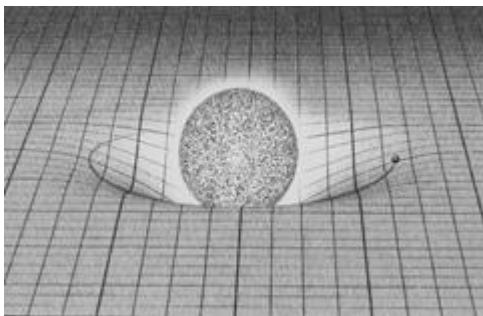
# Naviglio Piccolo

immaginato lo spazio in questo modo, e d'altronde così è visto ancora dalla relatività ristretta. Ma cosa succede in presenza di un oggetto massiccio come il Sole? Secondo i fisici precedenti non succede niente: lo spazio e il tempo sono solo il palcoscenico inerte dove accadono gli eventi. Seguendo il ragionamento di Einstein con l'esempio della



giostra in rotazione, abbiamo visto che una descrizione accurata del moto accelerato implica la curvatura dello spazio (e del tempo). Con Einstein possiamo ipotizzare che la presenza di un oggetto massiccio come il Sole deformi la struttura dello spazio circostante, come nella figura qui a lato, in cui la deformazione dello spazio è rappresentata come la deformazione di una membrana di gomma dovuta a una palla pesante.

E finalmente possiamo vedere che un pianeta, una stella, o anche la luce, sono costretti,



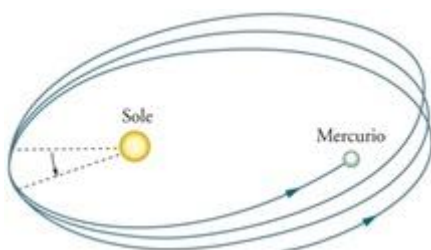
dalla deformazione dello spazio, a eseguire una deviazione attorno alla massa che ha deformato lo spazio. Questo risultato non è che il consueto effetto dell'attrazione del Sole sulla Terra. Ma, al contrario di Newton, Einstein ha spiegato il meccanismo grazie al quale la gravità si trasmette: la curvatura dello spazio. Si scopre così la natura della gravità e come agisce.

*L'agente della gravità non è una forza misteriosa che agisce istantaneamente a distanza, ma è la trama stessa del cosmo.*

## Prove sperimentali della Relatività generale

Le predizioni dei movimenti dei pianeti del sistema solare descritti dalla relatività generale, sono di una precisione assoluta e confermate sperimentalmente.

Spiega ad esempio, la "precessione dell'orbita di Mercurio", cioè il fatto che la traiettoria di Mercurio è un'ellisse che ruota, diremmo "a rosetta". Mercurio è il solo pianeta che ne risente, perché è il più vicino al Sole, dove lo spaziotempo è più deformato. Si era tentato di giustificare classicamente l'anomalia con una irregolare distribuzione della massa solare o con l'esistenza di frammenti di un pianeta interposto tra Mercurio e il Sole.

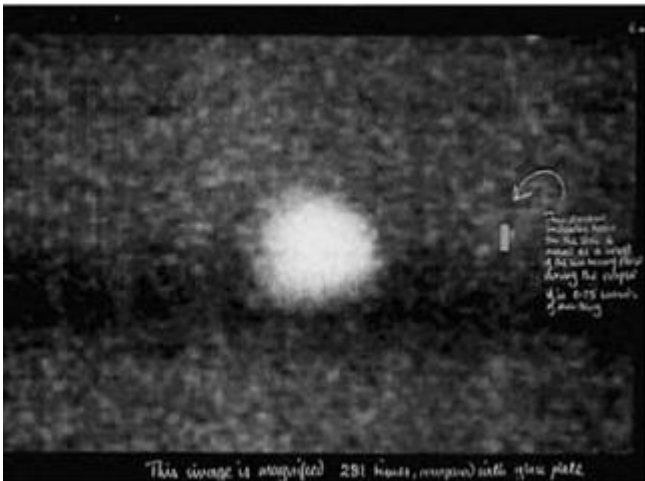


Nessun tentativo, tranne quello relativistico, ha dato risultati in accordo con la misura. È una prova della bontà di una teoria il fatto che si possa estendere a campi impreveduti rispetto al progetto che l'ha motivata.

Ancora più interessante, la relatività generale spiega



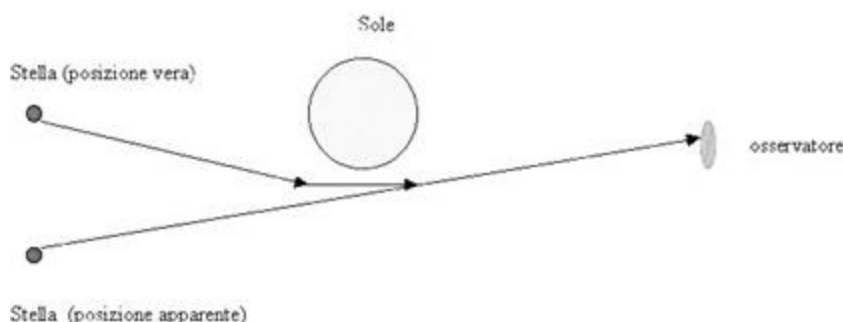
# Naviglio Piccolo



perché si possono vedere stelle che geometricamente dovrebbero essere nascoste dal Sole. Infatti, esse sono rese visibili dalla deviazione del percorso della luce causato dalla presenza del Sole, come si vede nella figura successiva. Questo effetto è stato misurato da Eddington durante un'eclissi del 1919, in cui l'oscuramento del Sole ha reso possibile vedere stelle che, appunto, sarebbero dovute essere nascoste dalla luminosità del Sole. Per curiosità e interesse storico, riportiamo una delle lastre studiate da Eddington durante quell'eclissi. In particolare a destra si vede, alla coda della freccia la posizione di una stella, e col trattino verticale la posizione in cui avrebbe dovuto essere se la sua luce non fosse stata deviata dal Sole. Ci si potrebbe chiedere come mai la luce, senza massa, è attratta da un campo gravitazionale.

Un fatto poco noto riguarda Eddington. La partecipazione all'osservazione di quell'eclissi di Sole lo salvò dalla corte marziale. Da quacchero devoto aveva rifiutato di prestare servizio militare durante la prima guerra mondiale. La mia opposizione alla guerra si fonda su ragioni religiose... *Quand'anche l'astensione degli obiettori di coscienza facesse la differenza tra la vittoria e la sconfitta, non possiamo giovare alla nazione disobbedendo deliberatamente alla volontà divina. Ciò l'aveva portato a un passo dal campo di detenzione. A salvarlo fu Dyson, l'astronomo reale, che affrontò di petto l'Ammiragliato britannico, sostenendo che sarebbe stato un peccato rischiare la vita di Eddington sui campi della Somme, mentre avrebbe potuto servire meglio il suo paese organizzando e guidando una delle spedizioni per l'osservazione dell'eclissi del 1919. Oggi in quale altra nazione sarebbe successa la stessa cosa?*

Si possono dare due forme di spiegazione. La prima fa ricorso alla legge di equivalenza di massa ed energia, forse una delle equazioni più famose della fisica,  $E=mc^2$ . Vista l'equivalenza di massa ed energia, anche l'energia, luminosa in questo caso, deve comportarsi come una massa, cioè deve subire l'attrazione gravitazionale. La seconda invece dipende dalla struttura curva dello spazio intorno agli oggetti massicci. Il cammino della luce come abbiamo visto nella pagina precedente è costretto a "seguire" le pieghe dello spazio. Schematicamente succede quello che è rappresentato nella figura seguente.



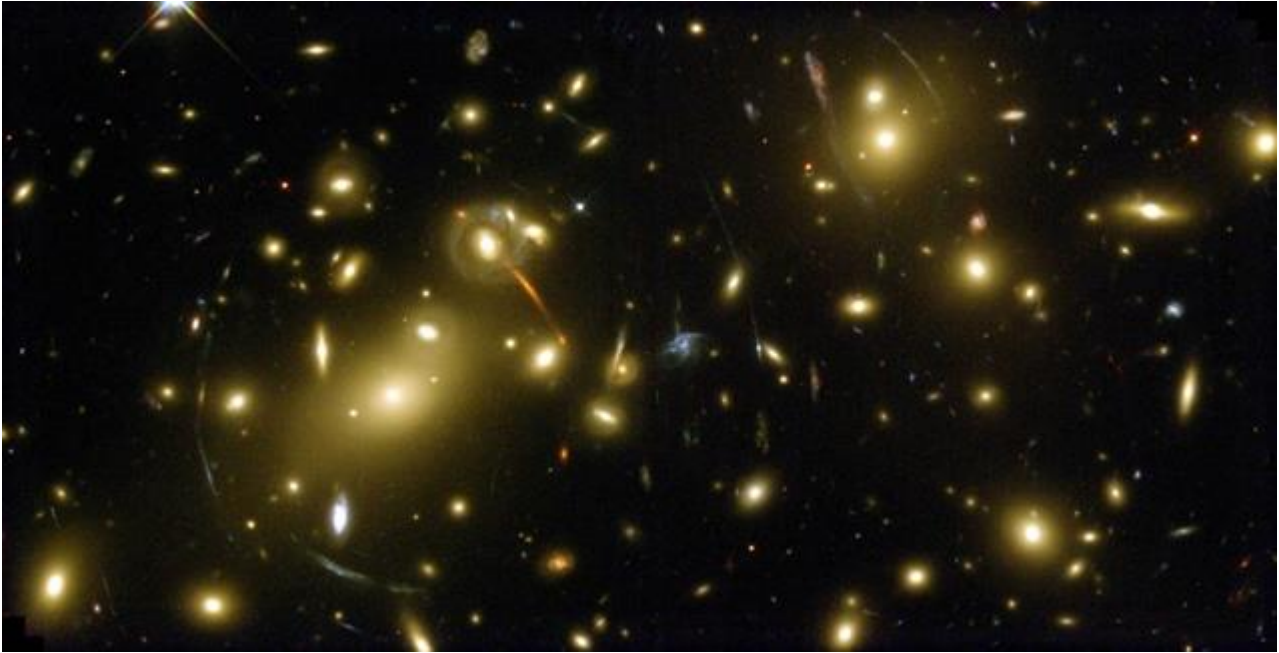
Interviene nell'esame del fenomeno il fatto che l'occhio parteggia per Newton, poiché considera rettilineo il tragitto della luce. Infatti tiene per buona solo la direzione finale del raggio e produce il miraggio della posizione apparente della stella.



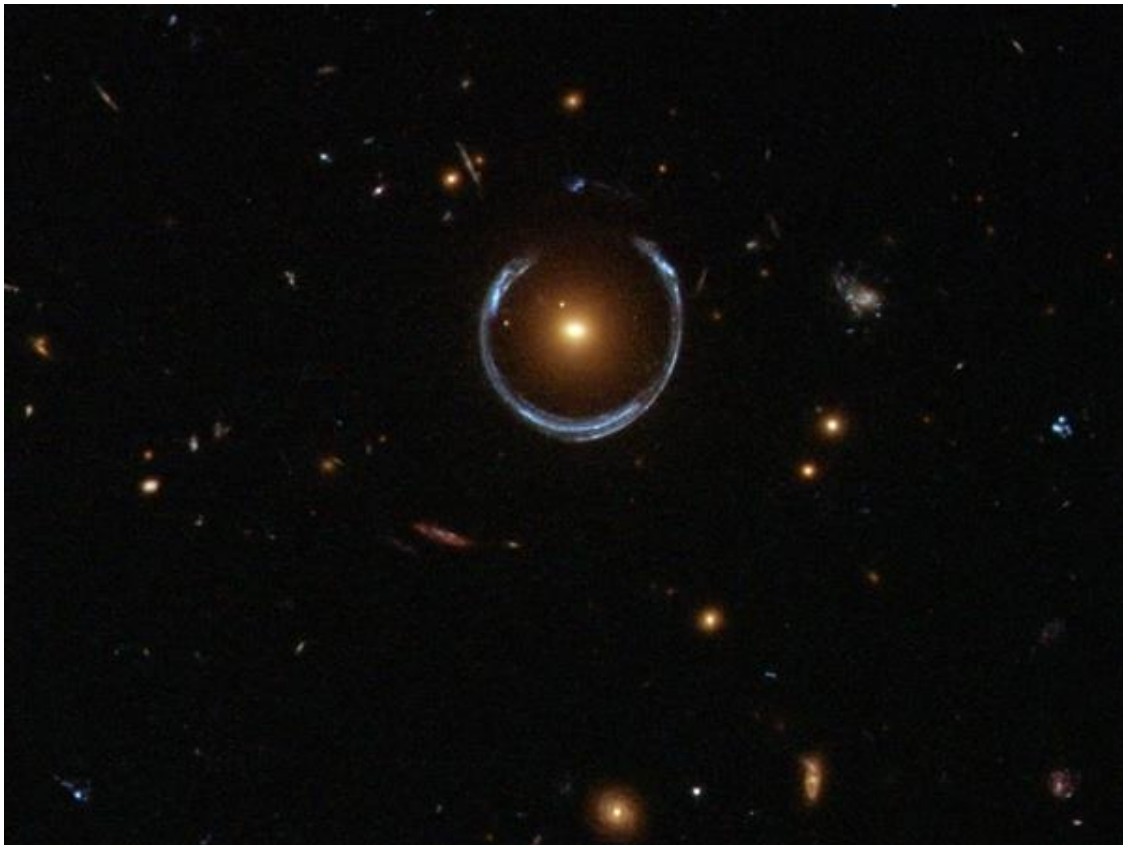


# Naviglio Piccolo

Oggi i mezzi tecnici per vedere la curvatura dei raggi luminosi attorno alle masse gravitazionali sono enormemente migliorati, ad esempio, in questa splendida foto registrata dal telescopio spaziale Hubble, vediamo l'effetto delle cosiddette lenti



gravitazionali, che sono le immagini di alcune galassie la cui luce è pervenuta a noi deviata dalle galassie fraposte, che si sono comportate come se fossero una lente. Le immagini delle galassie lontane sono quei piccoli sottili archi che si vedono un po'



dappertutto. Sono ben visibili: uno al centro leggermente a sinistra e un altro sempre a sinistra in basso. In questa seconda immagine, l'allineamento quasi perfetto tra la galassia



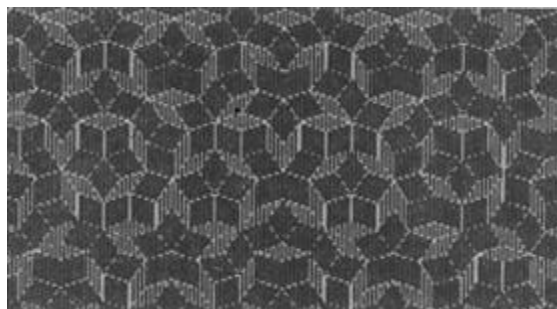
# Naviglio Piccolo

blu sorgente lontana e la galassia rossa che funge da lente, ha consentito di avere come immagine un anello quasi completo.

## Dimensioni dello spaziotempo

La visione straordinaria della gravità, come deformazione dello spaziotempo suggerita dalla relatività generale, non ha ancora finito di stupire che subito si affacciano altre considerazioni. Cominciamo con il definire accuratamente il concetto familiare di dimensioni dello spazio. Esso è il numero di parametri che permettono di determinare la posizione di un punto. Nella nostra esperienza quotidiana, sappiamo che lo spazio ha tre dimensioni, lunghezza, larghezza, profondità. Dovremmo però aggiungere che per individuare precisamente una posizione bisognerebbe definire anche la posizione nel tempo. Se dicessi “incontriamoci nella tal via al tal numero e al quinto piano”, definiremmo sì una posizione, ma non saremmo necessariamente in condizioni di incontrarci, se non fissiamo anche il momento temporale in cui trovarci in quella posizione.

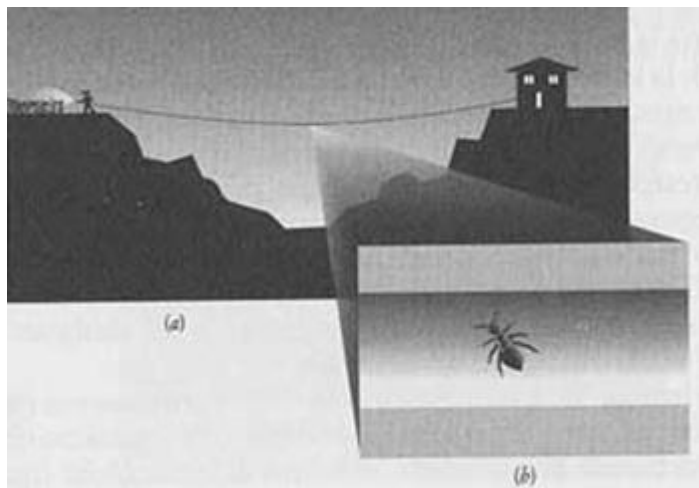
D'altra parte abbiamo visto che la teoria di Einstein già aveva intrecciato così profondamente lo spazio e il tempo che è assai conveniente considerarle come dimensioni di uno spazio a quattro dimensioni, tre spaziali e una temporale. Alcuni fatti inspiegabili sulle particelle elementari e ragioni di convivenza della teoria della relatività generale e della meccanica quantistica sembrano suggerire che la struttura dello spaziotempo abbia più di tre dimensioni spaziali. Forse sareste stupiti nell'apprendere che nell'armadio di



cucina ci potrebbe essere l'indizio di dimensioni spaziali extra nascoste: più precisamente, l'indizio si trova nel rivestimento delle padelle antiaderenti. Un rivestimento antiaderente si può ottenere utilizzando dei quasicristalli.

Questi sono strutture affascinanti caratterizzate da un ordine che appare solo se si assume l'esistenza di dimensioni extra dello spazio.

Sappiamo che possono esistere solamente 32 gruppi di simmetrie cristalline, ma nei quasi-cristalli la disposizione degli atomi e delle molecole non si conforma a nessuno di questi. Però la loro struttura che sembra una regolarità imperfetta senza spiegazione nell'ordinario spazio tridimensionale, è il riflesso di



una struttura ordinata in un mondo a più dimensioni. In questa figura vediamo una possibile struttura quasicristallina che acquista una precisa architettura ordinata in un mondo a cinque dimensioni.

Tralasciando al momento le padelle di cucina, ricordiamo che le prime ipotesi di dimensioni extra dello spazio risalgono a Kaluza, un matematico polacco la cui idea originaria risale al 1919. In un lavoro spedito da Kaluza a Einstein nel 1919, veniva avanzata un'ipotesi sorprendente: la struttura



# Naviglio Piccolo

spaziale dell'universo potrebbe avere più delle tre dimensioni spaziali che comunemente conosciamo. Ma come la mettiamo con il fatto assodato che le dimensioni spaziali sembrano essere proprio tre?

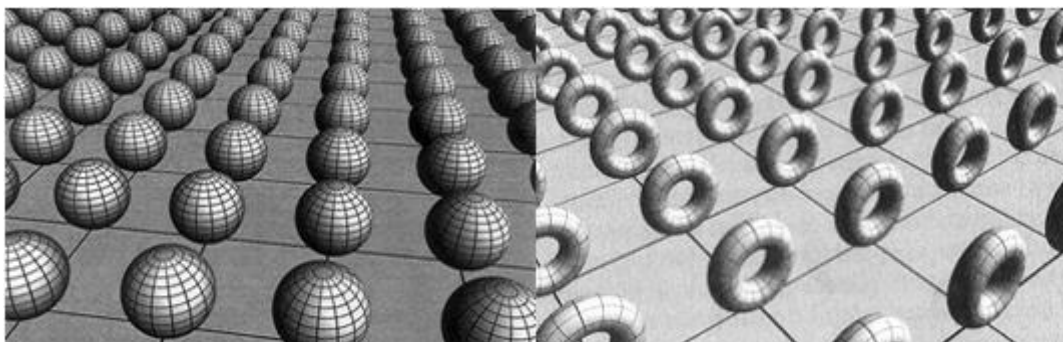
La risposta è che nell'universo possono esserci dimensioni estese e altre arrotolate. Per aiutare l'intuizione a comprendere questa straordinaria ipotesi osserviamo la figura. Si vede in lontananza un tubo, che può sembrare a una dimensione, ma per una formica che ci cammina sopra di dimensioni chiaramente ne ha due. Anche noi, guardando l'immagine con un binocolo sufficientemente potente ne vedremmo due. Questo può voler dire che viste ad alti ingrandimenti le dimensioni dell'universo possono essere più di quelle che vediamo ordinariamente.

L'idea originaria di Kaluza era senz'altro interessante, ma qualcosa la rendeva addirittura strabiliante: con una dimensione spaziale in più, succedeva che le equazioni che si riferivano alle tre dimensioni ordinarie erano proprio le equazioni di Einstein, ma la dimensione extra dava luogo ad altre equazioni che si rivelarono essere le equazioni di Maxwell per la descrizione del campo elettromagnetico! Le dimensioni extra avevano unificato la teoria della gravità di Einstein e la teoria della luce di Maxwell!

Kaluza inviò il suo lavoro a Einstein, che in un primo tempo ne fu assai incuriosito. Il 21 aprile 1919 gli rispose con una lettera, in cui diceva di non aver mai pensato al fatto che l'unificazione sarebbe potuta avvenire "in un mondo cilindrico a cinque dimensioni (4 spaziali e una temporale)... a prima vista la sua idea mi piace immensamente". Una settimana dopo, però, Einstein scrisse un'altra lettera a Kaluza in cui si mostrava più scettico: "Ho letto con attenzione il Suo articolo e lo trovo davvero interessante, non mi pare di scorgervi impossibilità logiche, d'altro canto, devo ammettere che i Suoi argomenti non mi sembrano per ora abbastanza convincenti". Due anni dopo il 14 ottobre 1921, Einstein scrisse ancora al collega "Sto ripensando al fatto di averLe sconsigliato di rendere pubblica la Sua idea circa l'unificazione di gravitazione ed elettricità, due anni orsono.... Se lo desidera, presenterò il Suo articolo all'Accademia". Evidentemente aveva avuto il tempo di digerire la novità. Anche se l'idea di Kaluza era molto elegante, a uno studio più accurato si mostrò in contrasto con alcuni dati sperimentali. Poiché non si trovava modo di risolvere questi problemi, l'ipotesi divenne marginale. I fisici teorici poi furono presi dalla novità della teoria quantistica. Kaluza era veramente troppo avanti per i tempi. Verso gli anni ottanta il tempo era maturo per ritornare al problema dei problemi: l'enigmatico conflitto tra la meccanica quantistica e la relatività generale.

Secondo alcuni la teoria di Kaluza si era dimostrata sbagliata perché non conosceva l'esistenza delle forze nucleari forte e debole; più forze hanno bisogno di più dimensioni, una sola aggiuntiva non bastava.

A titolo di esempio, nelle due figure possiamo osservare uno spazio, con solo due dimensioni per poterlo rappresentare, ma con due dimensioni extra arrotolate: a sinistra, in forma di sfera e a destra, in forma di toro.





# *Naviglio Piccolo*

Qui siamo arrivati ai nostri giorni, queste teorie sono solo ipotesi per cercare di conciliare la meccanica quantistica con la relatività generale, e dare un quadro coerente della realtà dello spazio tempo, per il momento ancora senza riscontri sperimentali

*... ma la storia va avanti...*



# Naviglio Piccolo

## Maria Cristina Fighetti

Mi presento: sono laureata in Fisica (qui a Milano, meglio non dire quando), ho insegnato matematica e fisica nei Licei Scientifici milanesi fino al 1999, sono socia dell'AIF (Associazione per l'Insegnamento della Fisica).

Sono profondamente convinta che una visione generale della Fisica moderna debba essere un patrimonio della conoscenza comune e non solo un argomento da addetti ai lavori, per il buon motivo che il nostro modo di vivere ne è totalmente condizionato, nel bene e nel male.

L'informazione scientifica nel nostro Bel Paese è mediamente assopita sull'800, sia a livello scolastico sia a livello divulgativo.

Anche per questo, una volta in pensione, ho proposto un progetto di diffusione della cultura della fisica moderna nei Licei, che è stato recepito dalla cattedra di Storia della Fisica dell'Università di Milano.

Ho quindi collaborato con l'università per la realizzazione di appositi seminari multimediali per le scuole medie superiori e inferiori, che sono stati tenuti sia presso l'Università (con prestigiosa sede a Brera) che, a richiesta, presso le singole scuole.

Gli argomenti proposti (relatività speciale e generale, quantizzazione della materia e della radiazione, meccanica quantistica, grandi personaggi della Fisica moderna,...) venivano scelti da gruppi di studenti e/o docenti interessati e presentati con il supporto di animazioni computerizzate per agevolarne la comprensione attraverso l'uso delle immagini. Per un paio di anni è stato possibile perfino mostrare applicazioni sperimentali della teoria nello stesso contesto.

Da qualche anno collaboro allo svolgimento delle Olimpiadi Italiane della Fisica sia a livello regionale che nazionale, con corsi di supporto per gli studenti di Milano e hinterland e con partecipazione alla realizzazione delle prove.





# *Naviglio Piccolo*

## **Pierluigi Boschetti**

Laureato in Fisica Teorica ... qualche anno fa (1969). Dopo un breve periodo di insegnamento e di ricerca all'Università, durante il quale ha pubblicato diversi articoli su giornali internazionali di Fisica, ha lavorato nell'informatica fino al 1994. Da piccolo aveva la passione della scultura; qualche anno dopo la laurea, in una giornata piovosa sul lago, per passare il tempo, ha ripreso l'antica passione e lasciata l'informatica si è dedicato nuovamente alla scultura e alla pittura, che ha poi praticato professionalmente. Da pensionato coltiva anche lo studio della musica suonando il flauto traverso e delle lingue antiche, greco ed ebraico biblico. Continua privatamente lo studio della matematica e della fisica.

**Quota di partecipazione € 3,00**

**Viale Monza 140 (M1 Gorla - Turro)**

Informazioni: [www.navigliopiccolo.it](http://www.navigliopiccolo.it) email [naviglio.piccolo@navigliopiccolo.it](mailto:naviglio.piccolo@navigliopiccolo.it)