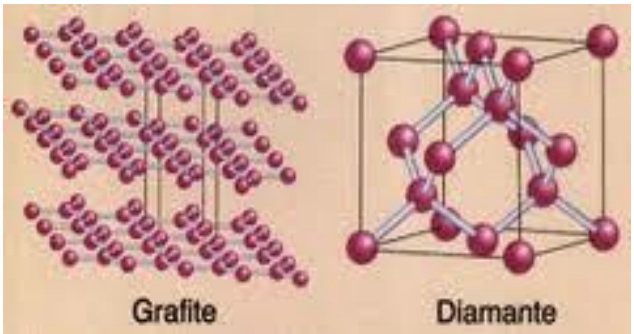
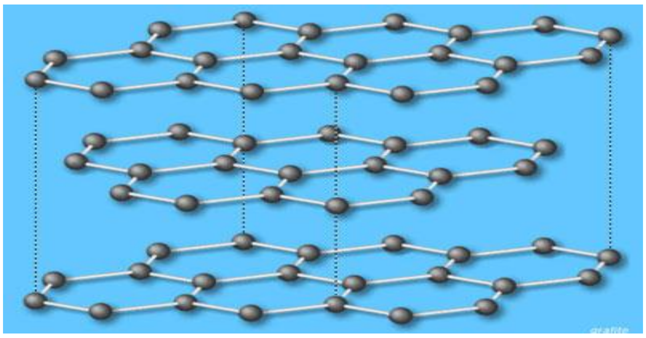
Nanostrutture a base di Carbonio

Dal primo transistor ad oggi, la tecnologia ha consentito di miniaturizzare sempre più i componenti elettronici a base di silicio e conseguentemente di migliorare enormemente le velocità di calcolo delle CPU, ma questo processo è ormai prossimo alla fine. Il silicio cristallino non è stabile quando si trova in cristalli più piccoli di circa 10nm, trasformandosi in un materiale amorfo, inutilizzabile. La soluzione naturale a questo problema è quella di passare ad un altro elemento dello stesso gruppo chimico: il **carbonio**, l'elemento più piccolo del gruppo.

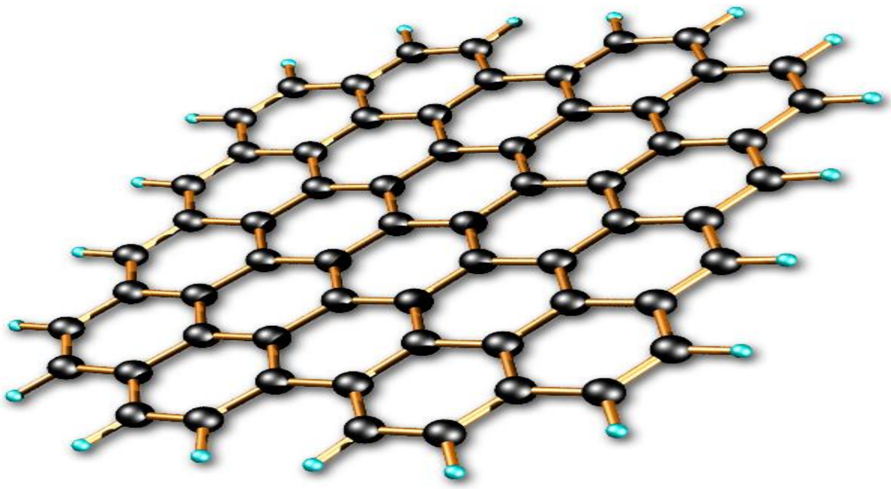
Le diverse facce del carbonio

Il carbonio ha 4 elettroni di valenza quindi forma sempre 4 legami con i suoi vicini. Le strutture elementari che esso forma differiscono per la disposizione geometrica. Nel diamante gli atomi si trovano ai vertici di un tetraedro, con un atomo al centro. Nella grafite gli atomi sono organizzati in piani che interagiscono solo debolmente fra loro. Su ogni piano ogni atomo di carbonio ha tre vicini disposti ai vertici di un triangolo equilatero, coi quali forma due legami semplici e un legame doppio.





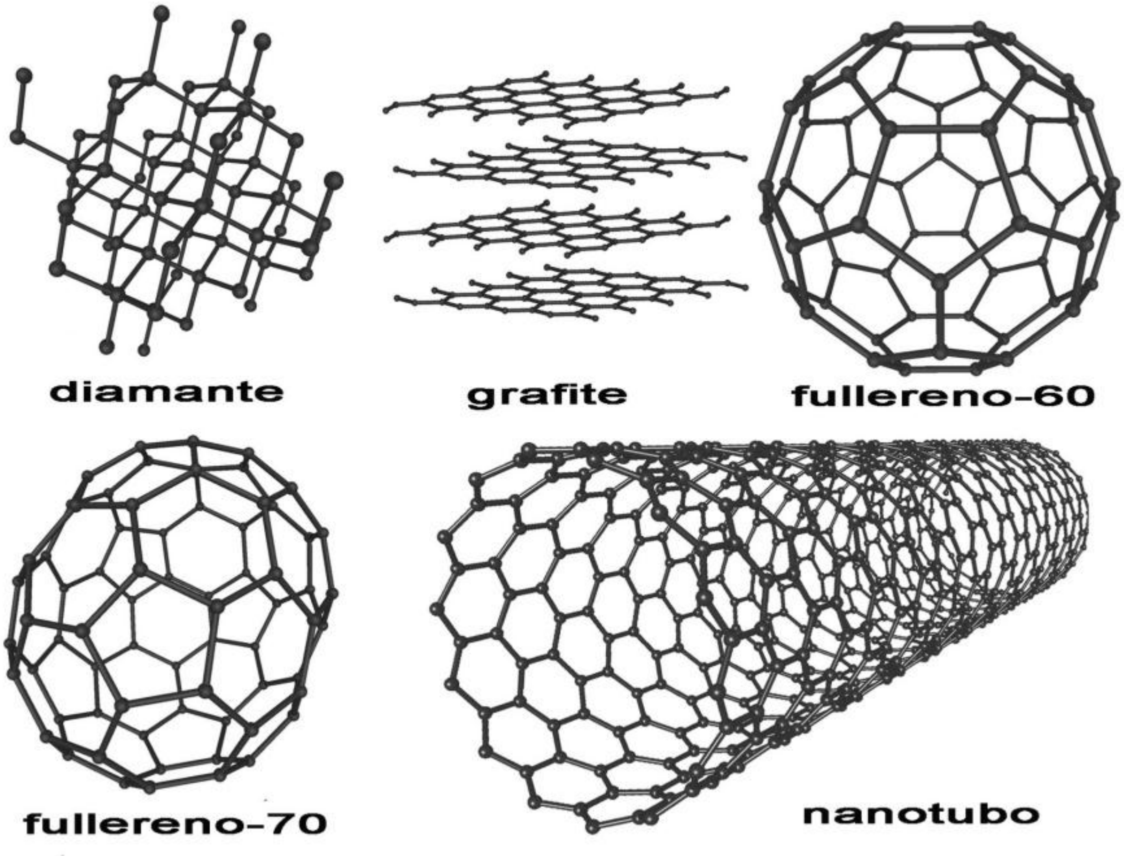
La struttura ad esagoni si viene a creare, insieme alla libertà di scelta del partner per il doppio legame, è un tema dominante in chimica. Il più semplice esempio di tale struttura è il singolo anello, noto come benzene.



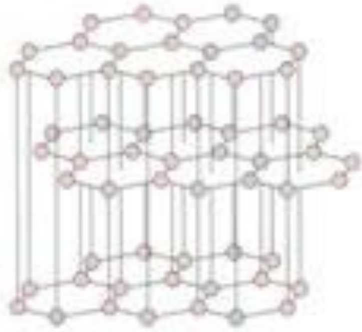
GRAFENE

Visto che il grafene opportunamente tagliato e reincollato può essere trasformato in un fullerene o in un nanotubo. Il benzene può essere considerato il padre tutte queste strutture. La teoria della risonanza del benzene (che lo descrive come sovrapposizione di più strutture chimiche che differiscono per l’arrangiamento dei doppi legami) spiega le straordinarie proprietà del grafene.

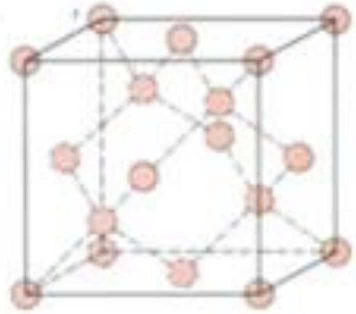
GRAFITE



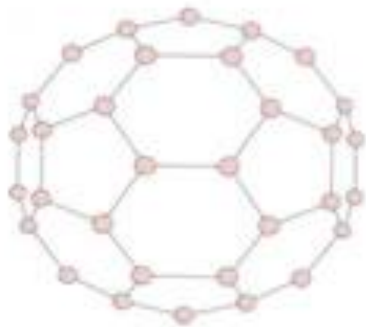
Non sorprende quindi che tra le molteplici nanostrutture in studio e le loro possibili applicazioni, quelle a base di atomi di carbonio abbiano giocato il ruolo più importante nell'ultimo decennio di ricerche in nanotecnologie. Il carbonio è un elemento chimico assai versatile, che esiste in diverse forme allotropiche.



Grafite

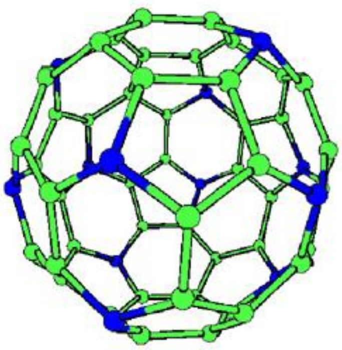


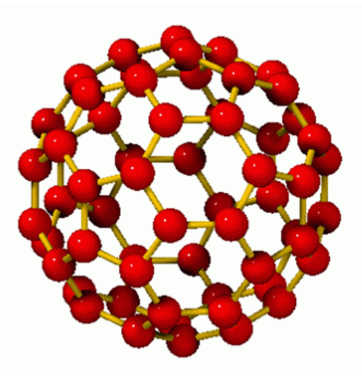
Diamante

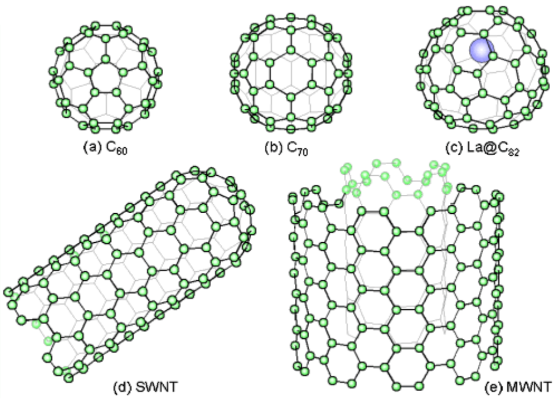


Fulereno

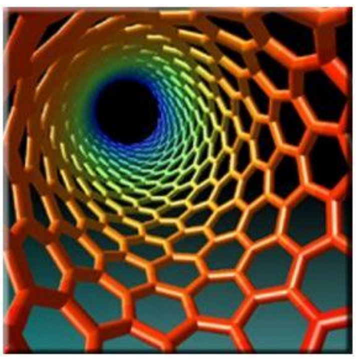
Altre, più interessanti per le applicazioni nano tecnologiche, hanno invece dimensionalità ridotta. Strutture sferiche di carbonio in cui gli atomi di carbonio occupano i vertici di un **icosaedro** troncato (struttura simile ad un pallone da calcio) sono note come fullereni.

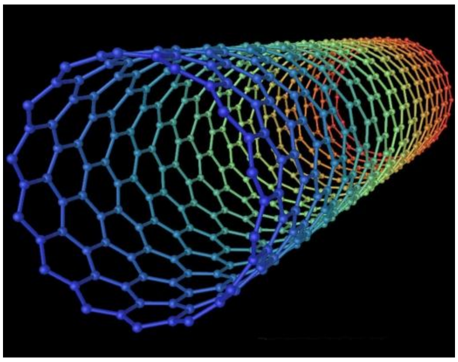


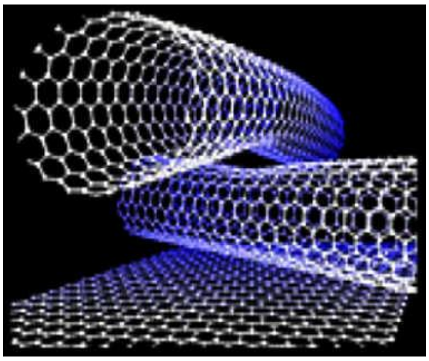




Esse hanno diverse applicazioni e in particolare come **superconduttori.** Se invece gli atomi di carbonio sono legati tra loro in modo da formare un **tubo** si parla di **nanotubo**.







Sono particolari strutture con proprietà (elasticità, resistenza) che le rendono adatte alla costruzione di materiali compositi (la bici del vincitore del tour de france 2006 era fatte con un telaio in resina composita contenente nanotubi). Queste caratteristiche determinano le proprietà elettriche dei nanotubi, rendendoli metallici o semiconduttori, quindi adatti alla fabbricazione dei transistor. I nanotubi sono estremamente flessibili e trasparenti al punto da suggerire una loro prossima applicazione nella tecnologia dei touch-screen e delle celle fotovoltaiche. Salendo di dimensioni si arriva al singolo foglio di grafite, di un atomo di spessore noto come grafene, materiale bidimensionale perfettamente ordinato con effetto di campo elettrico.

Grafene: il materiale del nuovo millennio.

L'alta simmetria della struttura, porta ad avere elettroni che viaggiano come se non avessero massa: è come se il grafene fosse percorso da dei fotoni carichi, che possono trasportare corrente come gli elettroni, ma che mantengono tutte le proprietà tipiche delle particelle soggette alla teoria della **relatività ristretta**. Grazie a questa caratteristica unica si osservano nel grafene effetti fisici che possono essere sfruttati per realizzare nuovi componenti per la nano elettronica. Tra l'altro il materiale è bidimensionale e quindi tali proprietà sono fortemente sensibili all'ambiente chimico fisico circostante. Le prime trattazioni si sono basate su il modello TIGHT BINDING (TB) che descrive l'interazione dell'unico elettrone (per atomo di carbonio) libero di muoversi come sé saltasse da un atomo all'altro lungo tutta la struttura. In particolare l'energia elettronica dipende dal momento e quindi gli elettroni si muovono con velocità costante (non dipendente dalla loro energia) come succede per i fotoni. Nei semiconduttori tradizionali l'energia è funzione quadrica del momento. Il grafene invece basta sottoporlo ad un potenziale esterno (GATE) o appoggiarlo su un substrato elettron-ricco o elettron-povero che si osserva vera conduzione. La corrente è trasportata tanto dagli elettroni quanto dalle lacune con le stesse peculiarità descritte; vedi il trasporto balistico della corrente elettrica su scala micrometrica e quindi la relativa insensibilità del moto degli elettroni agli ostacoli che trovano lungo il percorso (impurezze, difetti della struttura atomica del grafene ecc..), che quindi viaggiano velocissimi circa 1/100 la velocità della luce, quasi indisturbati lungo il reticolo cristallino. Questo permette la realizzazione di transistor e microprocessori ad altissime prestazioni. Quanto detto sarebbe poco utile se non fosse possibile modificare le proprietà a secondo delle applicazioni, cioè disegnare strutture grafeniche che enfatizzano un aspetto o l'altro a secondo dell'interesse. Fra le tante opportunità, la più semplice, consiste nel tagliare il foglio di grafene in strisce sottili di qualche nm di larghezza (nanoribbon) inducendo così l'elettrone a muoversi solo entro la larghezza del ribbon e quindi la direzione di taglio del foglio di grafene è fondamentale per la struttura elettronica. Tra le alternative la decorazione del grafene che si ottiene adsorbendo atomi o molecole sulla sua superficie, oppure rimuovendo atomi di carbonio; le tecniche nano litografiche che consentono di creare nella trama del grafene buchi di diametro controllato (fino a 1nm). Le teorie e i calcoli mostrano che le proprietà elettroniche del grafene possono cambiare in funzione del tipo di decorazione. Le possibilità applicative del grafene appaiono innumerevoli, questo è realizzabile grazie alla facilità con la quale si riesce a studiare "in silicio" tante nuove nanostrutture e compensa abbondantemente le difficoltà intrinseche nella loro realizzazione. In pratica il silicio sta giocando un ruolo chiave anche nella ricerca che lo vuole sostituire.

Relatività ristretta (RR) (sintesi introduttiva)

01 - **Campo elettromagnetico.**

Maxwell, circa a metà '800, sintetizzò la descrizione dei fenomeni elettromagnetici in sole 4 equazioni. Da esse si deducono alcuni fatti estremamente importanti :
I fenomeni elettrici e quelli magnetici sono le manifestazioni apparentemente diverse di una unica forza: la forza elettromagnetica che si distribuisce nello spazio come un campo elettromagnetico. Un campo elettromagnetico si propaga nello spazio con velocità finita, c = 300.000 km/sec circa, la velocità della luce. Se nel punto **A** una carica elettrica subisce una accelerazione, "l'informazione" di quella modificazione viene percepita nel punto **B** (distante s da A) dopo un tempo finito, **t = s/c**. Questo avviene perché un'onda elettromagnetica parte da A ed arriva in B nel tempo t = s/c. Il campo elettromagnetico, quindi, si propaga attraverso onde elettromagnetiche di diversa frequenza (o lunghezza d'onda (frequenza * lunghezza d'onda = c)). Lo spettro elettromagnetico (in ordine crescente di frequenza od in ordine decrescente di lunghezza d'onda) è composto da : onde radio lunghe, medie, corte, ultracorte, raggi infrarossi, luce (dal rosso al violetto), raggi ultravioletti, raggi X, raggi gamma.

02 - **Etere.**

Le equazioni di Maxwell portano alla conclusione che il campo elettromagnetico si propaga attraverso onde con velocità **c**. Ma rispetto a quale sistema di riferimento esso si propaga con tale velocità ? Pensando che un'onda elettromagnetica per oscillare avesse bisogno di una sorta di mezzo (così come le onde acustiche hanno bisogno per esempio dell'aria), si ipotizzò l'esistenza di una "sostanza" particolare permeante l'universo rispetto alla quale le onde si propagassero con velocità **c**.

Tale sostanza fu chiamata **etere** e, in quiete rispetto ad esso, fu ipotizzata l'esistenza di un sistema di riferimento inerziale assoluto, privilegiato, rispetto al quale riferire ogni altro sistema di riferimento.

A causa del principio di relatività **galileiana** (RGal), allora, la luce (d'ora in poi spesso chiameremo così ogni tipo di campo elettromagnetico) dovrebbe essere vista arrivare in ogni sistema di riferimento inerziale con una velocità pari a **c** più (o meno) la velocità del sistema di riferimento inerziale rispetto all'etere.

Furono fatti diversi esperimenti molto accurati per rilevare queste differenze di velocità della luce (fra tutti menzioniamo quello di Michelson e Morley del 1881) ma tutti non rilevarono alcuna differenza.

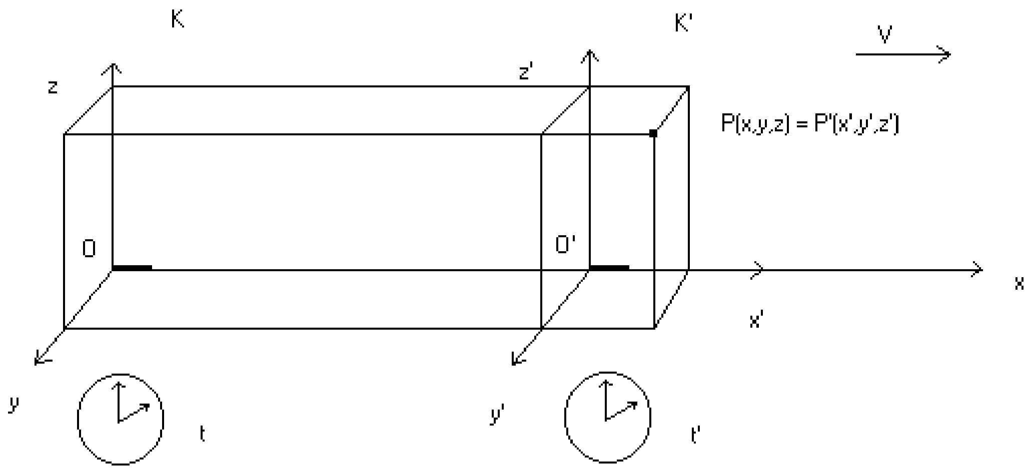
03 - **Principio di costanza della velocità della luce.**

I risultati sperimentali portavano ad un assurdo dal punto di vista della RGal perché contraddicevano la regola di sommabilità delle velocità.

Per risolvere il problema si ipotizzò che la velocità della luce fosse la stessa in ogni sistema di riferimento inerziale (così come mostravano tutti gli esperimenti) e che la RGal fosse valida solo per velocità piccole rispetto a c, come sono del resto le velocità rilevabili nell'esperienza quotidiana.
Si abbandonò quindi il concetto di etere e nessun fisico se ne occupò più, anche se nel linguaggio comune la parola è rimasta legata al gergo delle telecomunicazioni.
Si cercarono allora nuove trasformate per esprimere le relazioni fra le coordinate ed i tempi in due diversi sistema di riferimento inerziali che soddisfacessero il principio di costanza di **c** ed avessero come caso limite, per velocità piccole rispetto a **c**, le trasformate di Galileo.

- 03 - **Trasformate di Lorentz.**

Consideriamo due sistemi di riferimento inerziali (K e K') di cui K' si muove di velocità costante V rispetto a K, gli stessi utilizzati nella RGal :



Dovendo essere c = costante, le leggi di trasformazione di spazio e tempo non potranno più seguire le regole dettate dall'esperienza quotidiana. Dobbiamo abbandonare i concetti di spazio e tempo come di entità assolute, separate.
Dobbiamo addirittura modificare il concetto stesso di simultaneità.
Le trasformate che soddisfano le condizioni suddette furono trovate fra '800 e '900 da Poincarè e da Lorentz (ma vengono universalmente attribuite a Lorentz) e formano la base matematica della teoria della relatività ristretta (RR).
Esse legano matematicamente le misure di spazio e tempo relativi a due sistemi di riferimento inerziali partendo dal presupposto che la velocità della luce sia costante nei due sistemi.

Le trasformate di Lorentz sono :

$$\begin{cases} x = \dfrac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \dfrac{t' + \dfrac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}} \end{cases}$$

Sviluppando le trasformate di Lorentz in serie di potenze di Taylor per velocità v << c (v/c piccole) esse diventano identiche alle trasformate di Galileo così come previsto.
Analizzando le trasformate di Lorentz si deduce immediatamente un risultato fisico fondamentale. Se **V = c**, i denominatori si annullano. Ciò significa che la velocità della luce non è fisicamente raggiungibile da nessun sistema di riferimento inerziale rispetto ad un altro. Nessun corpo può raggiungere la velocità della luce che rappresenta quindi un limite naturale invalicabile.
Un altro fatto fondamentale balza all'evidenza ed esprime matematicamente quanto sopra affermato concettualmente riguardo al tempo. t è diverso da t', ovvero il tempo viene visto scorrere nell'altro sistema in modo diverso dal proprio. Questa conseguenza rivoluzionaria determina una totale diversità "filosofica" fra la RGal e la RR.

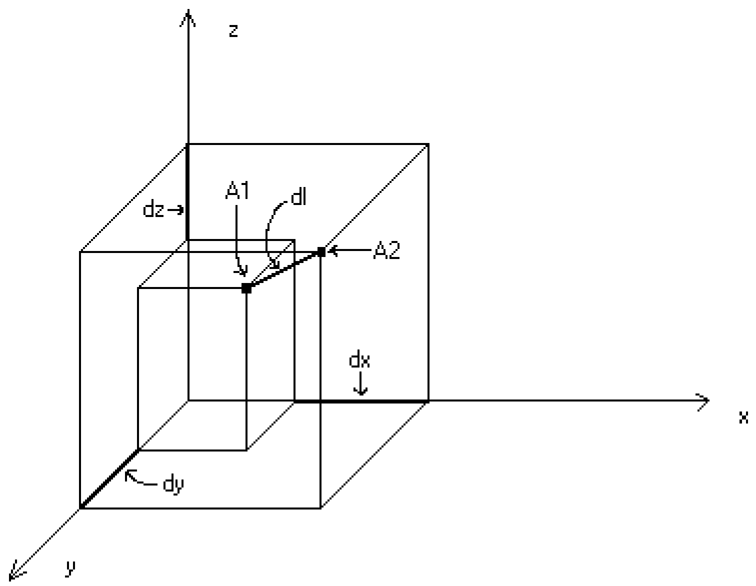
- 04 - **Spazio-tempo 4-dimensionale.**

Come risulta dalle trasformate di Lorentz lo spazio ed il tempo sono legati matematicamente fra loro e possono essere considerati come facenti parte di una unica entità fisica, lo spazio-tempo.
Si può allora definire lo spazio-tempo come una varietà geometrica a 4 dimensioni. Un evento è in esso rappresentato dalle 4 coordinate **x, y, z, t** prese rispetto ad un sistema di riferimento inerziale scelto a priori. Un corpo che si muove nello spazio-tempo descrive in esso una linea che è chiamata linea di universo.
Due eventi diversi corrispondono a due punti diversi dello spazio-tempo 4-dimensionale. Fra di essi si può definire un concetto di distanza in modo che, se due eventi sono collegati fra loro da un raggio di luce, questa distanza sia nulla.

Lo spazio-tempo 4-dimensionale (detto anche spazio-tempo di Minkowski) possiede quindi una struttura metrica. E' uno spazio metrico. La metrica è definita dalla formula :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

dove ds rappresenta la distanza fra i due eventi molto vicini P1(x1,y1,z1,t1) e P2(x2,y2,z2,t2) relativi ad un dato sistema di riferimento inerziale. dt rappresenta l'intervallo di tempo fra i due eventi, ovvero t2 - t1. dx, dy, dz rappresentano le differenze fra le coordinate spaziali di P1 e P2 come illustrato di seguito :



A1(x1,y1,z1) ed A2(x2,y2,z2) sono i corrispondenti spaziali (dello spazio ordinario 3-dimensionale) dei punti P1(x1,y1,z1,t1) e P2(x2,y2,z2,t2) dello spazio-tempo 4-dimensionale..

La distanza spaziale ordinaria dl (al quadrato) fra i due eventi si ricava applicando il teorema di Pitagora ed è :

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Se i due eventi sono collegati da un raggio di luce (il raggio parte da A1 al tempo t1 e giunge in A2 al tempo t2) allora ds2 = 0.

Se ds2 >0 l'intervallo si dice di tipo tempo. Se ds2 < 0 l'intervallo si dice di tipo spazio.

La formula della metrica può essere scritta in un modo da ricordare direttamente il teorema di Pitagora (a parte i segni meno) :

$$ds^2 = dx_0^2 - dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2$$

dove

$$dx_0 = cdt$$
$$dx_1 = dx$$
$$dx_2 = dy$$
$$dx_3 = dz$$

La metrica così definita è una metrica euclidea e rappresenta uno spazio-tempo piatto (cioè con le usuali proprietà dello spazio euclideo della nostra esperienza quotidiana). Il fatto che lo spazio fisico reale non sia a metrica euclidea (piatta), bensì sia curvo, è il principale risultato della teoria della relatività generale.

- 05 - **Principio di relatività ristretta (RR).**

Nel 1905 Einstein pubblicò un articolo che rappresenta una delle pietre miliari della fisica moderna. In esso egli espose ed ordinò tutte le idee riguardo a spazio e tempo alla luce delle caratteristiche del campo elettromagnetico organizzando tutta la vasta materia in una teoria completa, semplice e dalle implicazioni assolutamente innovative.
Egli enunciò in quell'articolo il principio di RR estendendo di fatto la RGal ai fenomeni elettromagnetici.
La RR, quindi, non è altro che la RGal con l'aggiunta del principio di costanza della velocità della luce (che per Galileo era infinita) riformulata matematicamente in uno scenario quadridimensionale con il tempo assurto a dimensione propria.
La RR si può riassumere nel fatto che le leggi della fisica devono essere le stesse in ogni sistema di riferimento inerziale cioè, matematicamente, devono essere invarianti rispetto alle trasformate di Lorentz.
La 2' legge della dinamica F = ma non è invariante rispetto alle trasformate di Lorentz (lo è rispetto alle trasformate di Galileo).
Le equazioni di Maxwell, ovviamente, lo sono.

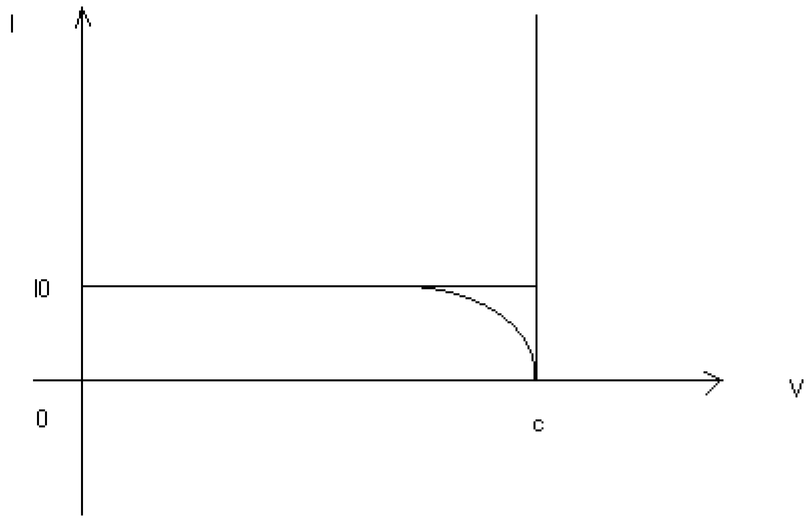
- 06 - **Contrazione delle lunghezze e dilatazione dei tempi.**

Alcune conseguenze dalla RR sono del tutto contrarie al senso comune e fin dalla loro scoperta furono sottoposte ad innumerevoli verifiche sperimentali. Nonostante tale (giusto) "accanimento", a tutt'oggi non vi è nessuna evidenza sperimentale che rilevi una contraddizione al principio di RR ed alle trasformate di Lorentz che ne sono la veste matematica.

Anzi, ogni giorno esse vengono verificate nel lavoro quotidiano del fisico. Naturalmente, col progresso scientifico, aumentando di pari passo la precisione degli strumenti di misura, verrà il giorno in cui anche la RR, così come ogni altra teoria, dovrà essere corretta. In fisica non si può mai affermare che una teoria è vera in assoluto, si può solo dire che è "vera" (verificata) entro i limiti di misura e la verifica o il superamento di essa dipende dall'aumentare delle conoscenze teoriche e delle realizzazioni tecnologiche.
Consideriamo i nostri soliti sistemi di riferimento inerziali (K e K'). Supponiamo che in K' vi sia un segmento rigido immobile rispetto ad esso ed adagiato sull'asse delle x. La sua lunghezza rispetto a K' sia l0. Quale sarà la lunghezza l dello stesso segmento rispetto a K ? Secondo il senso comune e le trasformate di Galileo (che ne sono la forma matematica) la risposta sarebbe l = l0, ovvero il segmento viene visto della stessa lunghezza rispetto ad entrambi i sistemi di riferimento inerziali. Invece, semplici calcoli applicati alle trasformate di Lorentz portano ad un risultato sorprendente. l risulta minore di l0 secondo la relazione :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

il cui grafico è :

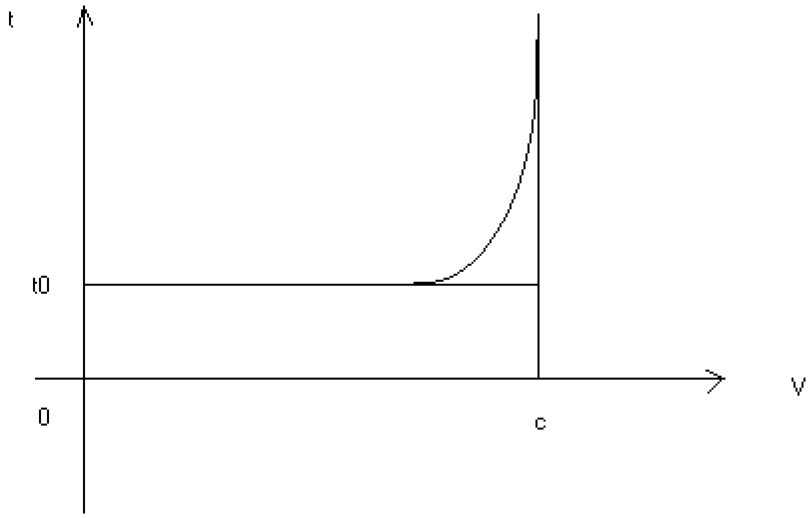


Da questo si deduce che solo a velocità prossime a quella della luce si ha una deviazione apprezzabile dal valore l0. Se la velocità di K' tende a c il segmento viene visto da K con una lunghezza sempre minore, tendente a 0. Se V = c, il segmento diventa (rispetto a K) di lunghezza nulla.

Consideriamo ora due eventi che avvengono in un punto fisso rispetto a K' ma in due istanti diversi. Consideriamo che la distanza temporale fra questi due eventi sia t0. Quanto dura il medesimo intervallo di tempo visto da K ? Semplici calcoli a partire dalle trasformate di Lorentz portano al seguente risultato:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

Il grafico che visualizza la formula mostra chiaramente che a velocità piccole rispetto a c le durate praticamente coincidono. A velocità via via maggiori l'intervallo temporale viene visto da K durare sempre di più. Per V = c la durata (sempre vista da K) diviene infinita.



Questi sorprendenti risultati ribadiscono il fatto che a velocità piccole rispetto a c le trasformate di Lorentz coincidono con le trasformate di Galileo. Solo a velocità altissime, prossime a quella dalla luce, avvengono le cosiddette contrazioni e dilatazioni relativistiche.
Gli intervalli spaziali in movimento vengono visti dal sistema di riferimento inerziale "fermo" accorciarsi. Gli intervalli temporali, invece, vengono visti allungarsi, cioè il cosiddetto tempo proprio che si misura in un sistema di riferimento inerziale in moto viene visto allungarsi dal sistema di riferimento inerziale "fermo", ovvero l'orologio che misura il tempo proprio (solidale con il sistema in movimento) viene visto rallentare.

- 07 - **Paradosso dei gemelli.**

Il rallentamento degli orologi è un fenomeno relativo. Il fenomeno si può riassumere affermando che K vede l'orologio in quiete su K' rallentare mentre vede il proprio orologio segnare il tempo normalmente. Analogamente K' vede rallentare l'orologio

solidale con K (e ciò nella stessa misura) e vede il proprio segnare il tempo normalmente. Questo perché K e K' sono assolutamente equivalenti.
Se con un esperimento si potesse verificare che K e K' non sono equivalenti cadrebbe l'intera RR.
Consideriamo allora un semplice esperimento ideale. Ci sono due gemelli (li chiameremo K e K'). Un giorno K' intraprende un viaggio spaziale a velocità prossima a quella della luce. Supponiamo che per K' il viaggio duri un anno. Per K, invece, a causa della dilatazione dei tempi (che per velocità vicine a **c** diventa sempre più elevata) il viaggio di K' viene visto durare supponiamo dieci anni. Quando K' ritorna da K, lo vedrà invecchiato di nove anni rispetto a sé stesso.
Questo risultato potrebbe allora portare ad un paradosso, il cosiddetto paradosso dei gemelli, perché, come abbiamo affermato sopra, il ragionamento potrebbe essere capovolto (K e K' sono equivalenti in quanto sistemi di riferimento inerziali) per cui, alla fine del viaggio, K dovrebbe vedere K' invecchiato e nello stesso modo K' dovrebbe vedere K invecchiato dello stesso numero di anni.
Il paradosso potrebbe essere usato (nella sua prima parte, cioè relativamente al viaggio di K' rispetto a K) per constatare che K e K' non sono equivalenti, in quanto i due gemelli non sono invecchiati nello stesso modo, per cui la RR verrebbe contraddetta.
Analizzando meglio questo esperimento ideale si vede però che esso è mal posto, contiene un errore fondamentale di impostazione. K e K' non possono essere entrambi sistemi di riferimento inerziali, dovendo K' subire forti accelerazioni per partire e poi per tornare. Considerando K inerziale, K' non lo è.
Non avendo a che fare con sistemi di riferimento inerziali il paradosso dei gemelli non può mettere in crisi la RR che si occupa esclusivamente di sistemi di riferimento inerziali.
Questo esperimento ideale, invece, è di competenza della teoria della relatività generale che si occupa appunto di sistemi di riferimento qualunque, in generale accelerati.

- 08 - **Composizione delle velocità.**

Consideriamo i soliti sistemi di riferimento inerziali K e K' in moto rettilineo uniforme con velocità relativa V. Supponiamo che un punto si muova rispetto a K' con velocità v' e per semplicità parallela all'asse delle x. Secondo la RGal il punto verrà visto da K muoversi con velocità v pari alla somma V + v'. Questo risultato è ovviamente errato dal punto di vista della RR.
Con semplici calcoli sulle trasformate di Lorentz si perviene alla formula corretta :

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}$$

Da essa si deduce che se v' è nulla, cioè il punto è in quiete rispetto a K', v risulta uguale V come è ovvio che sia. Aumentando v' e tendendo a c, si nota, invece, che v tende a c. Questo è una ulteriore conferma del fatto che c è una velocità fisicamente insuperabile. Se un corpo raggiunge la velocità della luce rispetto ad un sistema di riferimento inerziale, sarà visto andare alla stessa velocità c da qualunque altro sistema di riferimento inerziale in moto relativo uniforme rispetto al primo.

- 09 - **Equivalenza massa energia.**

Secondo la meccanica classica (MC) un corpo di massa m che si muove con velocità v rispetto ad un sistema di riferimento inerziale possiede una energia cinetica E data dalla formula :

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

da cui si deduce che se il corpo è in quiete (v = 0) l'energia cinetica di quel corpo è nulla.
Apportando le correzioni relativistiche alla MC si ottiene la cosiddetta meccanica relativistica (MR) le cui leggi sono invarianti rispetto alle trasformate di Lorentz (mentre quelle della MC lo sono rispetto alle trasformate di Galileo).
L'energia di un corpo di massa m in moto con velocità v in un sistema di riferimento inerziale assume in MR la forma :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Le conseguenze fisiche di questa formula sono rivoluzionarie rispetto alla MC. Dalla formula si deduce che se v aumenta e diviene prossima alla velocità della luce c allora l'energia del corpo tende all'infinito. Al contrario, se v diventa nulla, ovvero il corpo è in quiete, l'energia diventa :

$$E = mc^2$$

Questa formula famosissima esprime un fatto fisico del tutto nuovo rispetto alla MC e cioè afferma che un corpo in quiete possiede una energia di riposo non nulla.
La formula esprime anche un concetto "filosofico" completamente nuovo e ricco di conseguenze inaspettate (rispetto alla MC) : esso afferma la

totale equivalenza di massa ed energia (a meno della costante moltiplicativa c2). Afferma cioè che massa ed energia sono due aspetti apparentemente diversi di una medesima realtà. La massa può di conseguenza trasformarsi in energia e viceversa e la quantità di energia che si produce trasformando la massa è enorme perché m viene moltiplicato per il numero grandissimo 90.000.000.000.000.000.
Simili energie si ottengono nelle reazioni atomiche di fissione (in cui nuclei pesanti tipo l'uranio si rompono generando parti più leggere ed energia dal difetto di massa (reattori nucleari, bombe atomiche)) e di fusione (in cui nuclei leggeri come per esempio il deuterio si fondono formando elio con trasformazione del difetto di massa in energia (stelle, bombe H)).