

# **Riflessioni sul tema del Tempo**

**Prof. Maurizio Bellatreccia (m.bellatreccia@mclink.it)**

**Liceo scientifico statale “A. Righi”, Roma**

Queste note sono il risultato di un seminario tenuto dal prof. M. Bellatreccia presso il Liceo “A. Righi” nel dicembre 2001.

## **I Presentazione**

*La lunghezza di un minuto dipende dal lato della porta del bagno in cui ti trovi*  
(Ballance)

Queste note sul tema del tempo non hanno alcuna pretesa di completezza: sono semplici spunti sui quali riflettere e dai quali, eventualmente, far partire ulteriori ricerche ed approfondimenti.

## II I valori del tempo

*Cos'è il Tempo? Se nessuno me lo chiede lo so; se dovessi spiegarlo a chi me lo chiede, non lo so.* (S. Agostino)

Per iniziare a discutere il concetto di tempo è opportuno elencare alcuni valori interessanti di questa grandezza.

<b>Tabella dei Valori del Tempo</b>	
Il più piccolo intervallo di tempo fisicamente apprezzabile	$10^{-44}$ s
Il più piccolo intervallo di tempo finora misurato	$10^{-23}$ s
Tempo necessario alla luce per attraversare un atomo	$10^{-18}$ s
Vita media mesone $\pi^0$	$10^{-16}$ s
Tempo necessario alla luce per attraversare un Personal Computer	$10^{-9}$ s
Vita media mesone $K^-$	$10^{-8}$ s
Tempo necessario per un'addizione su un IBM 7090	$4,4 \cdot 10^{-6}$ s
Periodo delle onde sonore udibili da un essere umano	$5 \cdot 10^{-5}$ - $6 \cdot 10^{-2}$ s
Tempo di decadimento dell'isotopo 214 del Polonio	$10^{-4}$ s
Periodo della corrente alternata a 50 Hz	$2 \cdot 10^{-2}$ s
Tempo di reazione di un essere umano	$5 \cdot 10^{-2}$ - $10^{-1}$ s
Tempo di propagazione di un impulso nervoso per metro	1.5 s
Tempo necessario alla luce del sole per arrivare sulla Terra	$5 \cdot 10^2$ s
Tempo di vita più breve di un essere vivente	$2.8 \cdot 10^4$ s
Durata di un giorno solare medio	$8.64 \cdot 10^4$ s
Durata di un anno solare medio	$3.1 \cdot 10^7$ s
Vita media di un uomo	$2 \cdot 10^9$ s
Vita media di una tartaruga gigante	$3 \cdot 10^9$ s
Durata di un "anno" su Plutone	$7.8 \cdot 10^9$ s
Tempo di decadimento dell'isotopo 226 del Radio	$5.2 \cdot 10^{10}$ s
Tempo di decadimento del Radiocarbonio	$1.7 \cdot 10^{11}$ s
Periodo di precessione dell'asse terrestre	$8.2 \cdot 10^{11}$ s
Tempo evolutivo dalla scimmia all'uomo	$1.5 \cdot 10^{14}$ s
Periodo di rotazione della Via Lattea	$6 \cdot 10^{15}$ s
Età stimata della Terra	$1.4 \cdot 10^{17}$ s
Tempo di decadimento dell'isotopo 238 dell'Uranio	$1.4 \cdot 10^{17}$ s
Età stimata della stella più vecchia	$3.6 \cdot 10^{17}$ s
Età dei protoni contenuti nelle cose e negli esseri viventi	$3.7 \cdot 10^{17}$ s

Per chi non ha paura dei numeri già la sola tabella è fonte di numerosi spunti di riflessione:

- 1) I valori del tempo spaziano ordini di grandezza che vanno da circa  $10^{-44}$ s a  $10^{17}$ s. Il fatto che in Natura esistano processi che avvengono su scale di tempi così diverse

consente di trattare i fenomeni separatamente l'uno dall'altro. Se, ad esempio, studiamo il moto di un pendolo sulla Terra possiamo trascurare gli effetti della rotazione degli altri pianeti del sistema solare. Il loro periodo di rotazione, infatti, è diversi ordini di grandezza superiore al periodo del pendolo stesso. In altri termini, durante il moto del pendolo, è come se i pianeti fossero "fermi". Del resto, noi umani, ci preoccupiamo dei movimenti della crosta terrestre solo quando questi avvengono su scale di tempi confrontabili con la nostra (Conoscete il concetto di potenza?)

2) Il valore riportato come "l'intervallo di tempo più piccolo fisicamente misurabile" è il cosiddetto tempo di Planck ottenuto dalla combinazione dimensionale di costanti fisiche fondamentali e non va preso come limite tecnologico quanto piuttosto come limite al disotto del quale, per le nostre conoscenze fisiche attuali, non ha più alcun senso parlare di tempo.

3) I valori riportati per le misure di tempo effettivamente effettuate fanno pensare che ogni dominio della fisica utilizza un proprio "orologio" che può essere anche molto diverso da quello che noi usiamo quotidianamente. Il tempo necessario alla luce per attraversare un atomo, ad esempio, potrebbe essere preso come unità di misura della scala dei tempi relativa ai fenomeni atomici. Analogamente, il tempo necessario alla luce per attraversare un PC può essere preso come tempo caratteristico del funzionamento di queste macchine (guarda "caso" a tempi dell'ordine di  $10^{-9}$ s corrispondono frequenze dell'ordine del gigaHertz proprie dei processori attualmente in commercio)

4) La "finestra" dei tempi umani va da pochi centesimi di secondo a circa un miliardo di secondi e tutti i fenomeni compresi entro tale scala sono quelli che più facilmente influenzano direttamente il corso della nostra esistenza. Il tempo "umano" ha, ovviamente, anche una dimensione soggettiva (vedi frase di Ballance) e tuttavia esso è scandito proprio dai fenomeni che avvengono su questa scala (battito cardiaco, alternanza giorno notte, fasi lunari, ecc.)

5) I valori più alti contenuti nella tabella riguardano eventi che influenzano la sfera evolutiva e cosmologica. Potremmo definirli i tempi dell'Universo osservabile. Curioso è il dato riguardante l'età dei protoni contenuti nell'Universo: noi e tutte le cose che ci circondano siamo fatti degli stessi protoni da miliardi e miliardi di anni. Questo fa pensare ad un continuo movimento di ricombinazione di mattoni preesistenti...Una sorta di reincarnazione, insomma!

### III La misura del Tempo

*Il concetto di Tempo è determinato dalle operazioni con cui misuriamo il Tempo stesso (P.W.Bridgmann)*

Qui di seguito vedete elencati i metodi utilizzati nel corso dei secoli per la misura del tempo.

Unità di misura	"Orologio"	Parti in movimento
Giorno	Sistema Sole-Terra	Terra
Mese lunare	Sistema Terra-Luna	Luna
Clessidra	Clessidra	Sabbia o acqua
Battito cardiaco	Cuore	Muscolo cardiaco
Secondo	Meccanico	Bilanciere, molla, pendolo
Secondo	Al quarzo, cesio, ammoniaca	Atomi ed elettroni nel cristallo
Secondo	Ottico	Fotoni

Questa tabella focalizza l'attenzione sul fatto che, quale che sia il tipo di "orologio" utilizzato, c'è sempre un moto (periodico) associato. Non ha importanza cosa si sposti, l'importante è che qualcosa si sposta e come vedremo, questa semplice osservazione sarà di fondamentale importanza.

### IV Il Tempo dai tempi di Galileo fino a Newton

*La cosa bella del Tempo è che scorre (A. Eddington)*

La fisica cosiddetta classica (quella della caduta dei "gravi" e del moto dei pianeti, per intenderci) si basa sui seguenti postulati:

- 1) La materia si muove ed è impenetrabile
- 2) Il tempo è assoluto ed è fatto di istanti
- 3) Lo spazio è fatto di punti

Questi postulati, apparentemente innocui, tracciano i confini di una descrizione dell'Universo che è ancora a misura d'uomo. Da Galileo a Newton l'uomo ha studiato i corpi in movimento traendone leggi che sono evidentemente fondate su tali postulati. Se lo spazio è fatto di punti, la posizione di un corpo sarà identificata dai punti dello spazio occupato dal

corpo stesso. Il movimento del corpo sarà identificato col *cambiamento di posizione al passare del tempo*. Il tempo è assoluto, cioè è identico per tutti i punti dello spazio, indipendentemente dal moto relativo dei corpi.

L'osservazione di un fenomeno fisico, quindi, è la registrazione di una sequenza di *eventi* che accadono in determinati *istanti* segnalati da un "orologio universale". Questo "orologio universale" fornisce una sequenza di *eventi* che hanno una *durata* (il famoso istante) e una *periodicità* ben determinate.

Dunque *il moto è cambiamento della posizione con lo scorrere del tempo*. La cinematica e la dinamica poggiano su questa "definizione" di moto.

## V Il Tempo e il moto

*Anche il tempo non esiste di per sé, ma dalle stesse cose deriva l'avvertimento di ciò che è trascorso nel passato. Non si può dire che qualcuno avverta lo scorrere del Tempo separato dal movimento delle cose o da una placida quiete. (Lucrezio)*

*Non possiamo confrontare un processo con lo scorrere del Tempo, una tal cosa non è possibile. Possiamo solo confrontarlo con un altro processo. (L. Wittgenstein)*

Le ultime virgolette del precedente paragrafo sono dovute al fatto che una definizione, per definizione (scusate il gioco di parole...), *deve contenere tutte le informazioni necessarie a descrivere l'oggetto da definire ma NON riferimenti all'oggetto stesso*, altrimenti si ha una semplice *descrizione* o tautologia. Vediamo perché siamo in presenza di una *descrizione* del moto e non di una definizione. Dire che il moto è cambiamento di posizione con lo scorrere del tempo ha valore se e solo se è stato definito il concetto di tempo.

Riflettiamo su questo punto: in un universo completamente immobile avrebbe ancora senso parlare di tempo? Si potrebbe ancora parlare di un prima o di un poi? Evidentemente no. Dunque il concetto stesso di tempo è direttamente collegato al concetto di moto. Effettivamente la misura del tempo viene effettuata con orologi i quali hanno il compito di fornire moti periodici di riferimento. Misurare il tempo, insomma, significa confrontare il moto analizzato con un moto di riferimento.

E' interessante notare che una descrizione *diversa* dell'Universo è possibile. E' possibile cioè descrivere il moto dei corpi *senza* partire dai concetti di spazio e tempo. Tale descrizione si chiama *principio di minima azione* e si basa sostanzialmente sul fatto che un

sistema soggetto a "forze" si muoverà in una sorta di continuo compromesso fra quello che farebbe se fosse *libero* (cioè nulla, o meglio, quello che faceva prima) e ciò che è costretto a fare in presenza della "forza". Il tutto avviene mantenendo minimo il "costo" (in termini di azione) di tale compromesso. Bello no? E funziona egregiamente. Tanto egregiamente da essere, oggi, la descrizione più accreditata.

## VI La descrizione del mondo fisico alla fine dell'800

Verso la fine dell'800 la descrizione fisica dell'Universo ha raggiunto risultati molto significativi nei seguenti campi:

- 1) Dinamica grazie alle leggi di Newton (moto dei corpi celesti e non, possibilità di prevedere eclissi, passaggi di comete, collisioni fra corpi, statica degli edifici, traiettorie di proiettili, proprietà elastiche dei materiali, ecc.)
- 2) Elettromagnetismo grazie alle leggi di Maxwell (equilibrio e moto delle cariche elettriche, correnti e campi magnetici, la luce, la chimica degli elementi, ecc.)

Sarebbe un trionfo totale se "qualche" fatto sperimentale non sfuggisse in modo più o meno grave alla descrizione offerta da tali leggi. Pur peccando di un eccessivo schematismo, si può tracciare il percorso storico scientifico di quegli anni che hanno portato alla nascita di nuovi modi di descrivere l'Universo nei seguenti punti:

- 1) Le leggi di Newton sono *time reversal*, cioè ammettono sia l'esistenza di questo mondo, sia l'esistenza di un mondo che *giri esattamente al contrario*. Di contro, i fenomeni naturali sono *evidentemente* irreversibili. La funzione di stato Entropia è una misura di questa irreversibilità e trova una sua ragion d'essere solo nell'analisi di un sistema fisico che è formato da un numero straordinariamente grande (almeno  $10^{23}$  ...) di elementi più o meno interagenti (gli atomi, per l'appunto).
- 2) Il successo della meccanica statistica applicata ai problemi della scienza del calore spinge gli scienziati a rivolgere tali strumenti verso quello che era uno dei problemi irrisolti della meccanica classica: la teoria della radiazione. Fino a quel momento le leggi classiche riproducevano solo in parte il comportamento sperimentale di un corpo che emette radiazioni. Verso la fine dell'800 M. Planck propone una nuova visione del mondo: non solo la materia è quantizzata in atomi, ma anche la radiazione lo è (in fotoni, aggiungerà poi Einstein). La legge che deriva da questa "semplice" ipotesi è in perfetto accordo con i dati sperimentali e

questo nuovo trionfo della meccanica statistica segna la nascita della Meccanica quantistica che sostituirà la meccanica newtoniana.

## VII La crisi del concetto di Tempo nell'*infinitamente piccolo*

*Questa dottrina (che il suo più recente inventore chiama dell'Eterno Ritorno) si può formulare così: - il numero di atomi che compongono l'Universo è finito benché incommensurabile, e come tale ammette solo un numero finito (benché ugualmente incommensurabile) di variazioni. In un Tempo finito, il numero di variazioni deve essere esaurito, e l'Universo dovrà necessariamente ripetersi. Di nuovo tu nascerai da un ventre, di nuovo crescerà il tuo scheletro, di nuovo questa pagina finirà nelle tue mani uguali, di nuovo consumerai le tue ore fino all'impensabile morte... (J.L.Borges)*

### Prima parte: la meccanica del calore o Termodinamica

Uno dei problemi fondamentali della fisica di fine '800 era quello della teoria meccanica del calore (quella che oggi si chiama termodinamica). Abbandonata l'ipotesi del *calorico* i lavori di Carnot, Clausius, Kelvin, Helmholtz, Gibbs portano ad una descrizione dei fenomeni termici di elevata efficacia. Assodato che il calore è uno dei modi in cui un sistema può scambiare energia e che tali scambi avvengono secondo la direzione indicata dalla funzione di stato entropia, la termodinamica acquisisce a pieno titolo il ruolo di disciplina *fondamentale* nel campo della fisica. Ad essa si rivolgono intere generazioni di scienziati con l'intento di trovare nel secondo principio la radice dell'irreversibilità dei fenomeni naturali. Il problema è come coniugare la reversibilità temporale delle leggi della meccanica con la irreversibilità dei fenomeni naturali.

Già tempo addietro il fisico matematico J. Fourier aveva fornito una efficace descrizione della propagazione del calore abbandonando i rigidi schemi della meccanica classica. Su un altro versante si afferma sempre più l'idea che tutta la materia dell'Universo sia formata da mattoni fondamentali (atomi) e che le proprietà dei sistemi fisici possano essere ricavate studiando il modo in cui questi mattoni interagiscono e scambiano energia. La *Meccanica statistica* si occupa appunto di questo: spiegare le proprietà macroscopiche di un sistema fisico partendo dallo studio dei suoi costituenti microscopici. Per la prima volta, al rigido determinismo della meccanica classica si affiancano le leggi della statistica e, contestualmente, entra in crisi il concetto di *traiettoria determinata* di una particella.

Nonostante il disappunto dei più fervidi sostenitori della meccanica, il nuovo approccio consente di descrivere e interpretare fatti sperimentali fino ad allora inspiegabili.

L. Boltzmann mostra come la meccanica statistica sia in grado di interpretare il comportamento di un gas sottoposto a sollecitazioni meccaniche e termiche e giunge a fornire una interpretazione probabilistica del *secondo principio della termodinamica*. La funzione di stato entropia, fino ad allora poco compresa dai non addetti ai lavori, diventa la grandezza che *misura* il grado di irreversibilità dei fenomeni naturali. Per essere più precisi, diventa una misura della *probabilità* che un sistema evolva spontaneamente verso un certo stato.

Il Tempo, quindi, *deve* scorrere nella direzione indicata dall'Entropia.

### Seconda parte: la meccanica quantistica

*Il giardino dei sentieri che si biforcano è un'immagine incompleta, ma non falsa, dell'Universo quale lo concepiva Ts'ui Pen. A differenza di Newton e di Schopenauer, il suo antenato non credeva in un tempo uniforme e assoluto. Credeva in infinite serie di Tempi, in una rete crescente e vertiginosa di Tempi divergenti, convergenti, paralleli.*

*Questa trama di Tempi che si accostano si biforcano, si tagliano o si ignorano per secoli, comprende tutte le possibilità. Nella maggior parte di questi Tempi noi non esistiamo, in alcuni esiste lei ed io no; in altri io e non lei; in altri ancora entrambi.*

*In questo, che un caso favorevole mi concede, lei è venuto a casa mia; in un altro traversando il mio giardino, lei mi ha trovato cadavere; in un altro io dico le stesse parole ma sono un errore, un fantasma... (J.L.Borges)*

La meccanica quantistica è innanzi tutto una profonda rivoluzione del modo di intendere concetti come *sistema fisico, misura, apparato di misura*. Tale rivoluzione porterà al definitivo abbandono del concetto di traiettoria (intesa in senso classico cioè *l'esatta* posizione in un *preciso* istante di tempo) e sarà fonte di accessissime dispute scientifiche.

Abbastanza curiosamente quasi tutti i libri di testo (soprattutto quelli delle scuole superiori) che mirano ad una divulgazione dei fondamenti della meccanica quantistica si concentrano sul fatto che le nuove leggi parlano di *probabilità* anziché di certezza deterministica. Questo tipo di approccio è, a mio avviso, fortemente fuorviante perché non chiarisce, a monte, cosa c'è di *veramente nuovo* nella meccanica quantistica rispetto alla meccanica classica. Inoltre, produce in molti studenti l'errata convinzione che le leggi della meccanica quantistica *non* siano deterministiche. In realtà esse lo sono nel prevedere con



elevata precisione la *probabilità* che si verifichi un determinato evento. In altri termini, l'equazione di Schroedinger è deterministica nel predire probabilità tanto quanto lo è l'equazione di Newton nel predire le traiettorie.

La differenza fondamentale fra le due descrizioni dell'Universo sta in questo: la meccanica classica con le sue leggi afferma in sostanza che un corpo materiale può trovarsi *qui* oppure (oppure!) *lì*; la meccanica quantistica, al contrario, ammette che il corpo possa trovarsi *qui e contemporaneamente* in un altro posto in una sorta di *sovrapposizione di stati*. Questo *principio di sovrapposizione degli stati fisici di un sistema* è il vero (e forse unico) pilastro della meccanica quantistica e da esso derivano tutti i risultati più strabilianti di questa nuova descrizione: il famoso principio di indeterminazione, il principio di Pauli, le leggi probabilistiche che descrivono l'evoluzione fisica di un sistema.

Ma se un sistema fisico può trovarsi *contemporaneamente* nella sovrapposizione di più stati, come si fa a parlare di *evoluzione temporale* del sistema nel senso usuale del termine? Per esempio, se un oggetto può trovarsi *contemporaneamente* in due posti diversi, che senso ha usare termini come *prima e dopo*?

Va detto che a livello macroscopico (quando il numero di atomi in gioco è superiore a  $10^{23}$ ) la sovrapposizione di due stati non è praticamente osservabile. Detto in termini tecnici, la funzione d'onda che descrive l'oggetto nelle due diverse posizioni *collassa* in tempi straordinariamente brevi verso una nuova funzione d'onda che descrive l'oggetto macroscopico in una sola della due posizioni. Insomma la meccanica quantistica diventa indispensabile per descrivere il comportamento di oggetti microscopici, mentre per quelli macroscopici si riottengono i risultati già visti con la meccanica classica.

Quanto detto sopra lascia riflettere sul ruolo del tempo nel mondo microscopico. Quando si ha che fare con atomi e particelle ha ancora senso parlare di tempo? O piuttosto il concetto di tempo è legato al fatto che il mondo macroscopico, il *nostro* mondo, è fatto di piccolissimi atomi?

### **VIII La crisi del concetto di Tempo nell'*infinitamente grande***

*La distinzione fra passato presente e futuro è solo un'illusione, anche se ostinata*  
(A. Einstein)

Nessuna rivoluzione scientifica è tanto famosa quanto la teoria della relatività. Ciò è probabilmente dovuto in gran parte alla singolare figura di A. Einstein, ma anche alla fantasia popolare che ha sempre sognato, un giorno, di *viaggiare nel tempo*. Effettivamente la teoria

della relatività mette in seria discussione il ruolo del tempo come grandezza fondamentale nella descrizione fisica dell'Universo. I risultati più noti (e, finora, tutti sperimentalmente verificati) vanno dalla dilatazione dei tempi alla modifica del concetto di simultaneità. Anche in questo caso la teoria prende le mosse da due postulati:

- 1) Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Questo primo postulato di invarianza non è dovuto ad Einstein essendo già stato introdotto da Galileo e raffinato da Newton. Ad Einstein va il merito di averlo esteso ai fenomeni elettromagnetici. Il senso più profondo di questo postulato è questo: non è possibile effettuare alcun esperimento (meccanico, elettromagnetico o altro) per rivelare se il nostro sistema di riferimento è *fermo* o se si muove di *moto rettilineo uniforme*. E' un modo come un altro per dire (e a scuola non si dice quasi mai...) che una velocità costante non può essere una grandezza fisicamente rilevante nella descrizione di un fenomeno fisico.
- 2) La velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento. Ciò equivale a dire che un fronte d'onda sferico di luce emessa da una sorgente puntiforme in un sistema inerziale, apparirà sferico a un osservatore che si trovi in qualsiasi altro sistema inerziale. Se di misteri dobbiamo parlare, questo è il vero "mistero" della relatività. La dilatazione dei tempi, la contrazione delle lunghezze e tutte le altre *stranezze* descritte dalla relatività sono una conseguenza di questo postulato.

E' interessante notare che questo postulato è in qualche modo collegato al primo. Tutti i sistemi fisici, infatti, sono tenuti insieme da *forze* o, per essere più precisi, da interazioni. Attualmente la fisica descrive i fenomeni naturali alla luce di tre interazioni *fondamentali*: quella gravitazionale, quella elettrodebole e quella nucleare forte. La più moderna descrizione di queste interazioni suppone che i corpi interagiscano scambiandosi particelle, dette *bosoni vettori intermedi*. Due corpi carichi, ad esempio, interagiscono scambiandosi *fotoni* (che appartengono alla classe dei bosoni). Ora ci sono due possibilità. La prima è che tale scambio avvenga *istantaneamente* quale che sia la distanza fra i due corpi interagenti. Tanto per essere precisi, questo è il punto di vista della meccanica classica. L'istantaneità dell'interazione si traduce nel fatto che dire *adesso* in un certo sistema di riferimento equivale a dirlo in tutti i sistemi di riferimento: basta sincronizzare *istantaneamente* tutti gli orologi. L'esperienza, tuttavia, mostra che se avviene qualche cambiamento in una parte dell'Universo la restante parte dell'Universo risente di tale cambiamento dopo un tempo finito. Se il sole si spegnesse

ora, noi lo sapremmo fra otto minuti. Ciò indica che la velocità con cui si propagano le interazioni è *finita*.

AmMESSO che sia finita, tale velocità *deve essere la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali*, altrimenti non sarebbe garantita l'invarianza delle leggi della fisica che sono basate su tali interazioni. Infatti, ripensando all'esempio della sorgente luminosa puntiforme, se i due viaggiatori inerziali osservassero due fronti d'onda diversi, potrebbero ricavare informazioni sul loro stato di moto rettilineo uniforme, il che violerebbe il primo postulato.

La costanza della velocità della luce modifica anche la misura del tempo. Un orologio, infatti, in qualsiasi modo sia concepito e realizzato *non può misurare intervalli di tempo inferiori a quelli necessari alla luce ad attraversare i suoi componenti*.

Se tale orologio è in movimento, è pensabile che il tempo necessario a viaggiare fra i suoi componenti risulti alterato e quindi, in definitiva, risulti alterata anche la *misura del tempo*. Perché sia garantita l'invarianza, è necessario che l'osservatore in moto inerziale non osservi alcuna alterazione della misura del tempo, altrimenti potrebbe usare tale informazione per definire il suo stato di moto rettilineo uniforme e ciò è in contrasto con il primo postulato. In effetti, poiché *ogni* tipo di dispositivo (anche gli organismi biologici) si basa su una delle interazioni fondamentali, *tutto* ciò che è in movimento subisce lo stesso tipo di modifiche: anche gli organismi viventi evolvono più lentamente rispetto ad un osservatore "fermo". E' questa osservazione che conduce al famoso *paradosso dei gemelli* secondo il quale, per rimanere giovani, occorre viaggiare molto (bella scoperta!). E' importante sottolineare che, fintanto che i due gemelli si mantengono inerziali l'uno rispetto all'altro, non sono in grado di notare differenze nello scorrere del tempo *neanche inviandosi segnali di sincronizzazione*.

### **IX Riassunto breve...**

Riassumiamo le idee esposte sul tempo cercando di evidenziare gli aspetti che di solito non vengono discussi:

- 1) Il concetto di tempo è intimamente legato a quello di movimento
- 2) Per capire meglio il significato del tempo è necessario riflettere sul modo di misurarlo
- 3) Il concetto usuale di tempo si modifica profondamente nei due domini al di fuori delle possibilità percettive umane: quello microscopico e quello cosmologico.

- 4) Forse, una descrizione *globale* dei fenomeni naturali dovrebbe prescindere dal concetto di tempo.

### **X Bibliografia**

La fisica di Feynman, vol. 1 parte 1, Zanichelli ed.

La fisica di Berkeley, Zanichelli ed.

Christoph Schiller in [www.dse.nl/motionmountain.html](http://www.dse.nl/motionmountain.html)

I misteri del Tempo, P. Davies, Mondadori ed.