Capitolo 1

ASSIOMI DELLA FISICA CLASSICA

cap1

1.1 SPAZIO E TEMPO NELLA FISICA CLASSICA

sec:1.1

Non abbiamo certamente la pretesa di svolgere un'indagine storica e critica esauriente ed approfondita dell'evoluzione subita dai concetti fondamentali di **spazio, tempo e movimento (o moto)** da Galileo e Newton fino ad Einstein che sarebbe, per i nostri scopi, fuori luogo; per questo ci sono moltissimi trattati interamente dedicati a tali problematiche.[1] Il nostro scopo è quello di mettere in luce alcune idee fondamentali riguardo a tali concetti che possano interessare soprattutto gli studenti di Fisica e di Matematica che si accingono a seguire il corso di Relatività Speciale, se non altro per far acquisire loro coscienza e consapevolezza che proprio sui concetti basilari riguardanti i fondamenti dell'intera fisica ci sono stati nel passato, e ci sono ancora a tutt'oggi, dibattiti accesi su questioni concettuali e su problemi, non del tutto risolti, che investono non solo la fisica, ma anche la matematica, la filosofia della scienza e l'intero pensiero umano. E lo faremo attraverso citazioni tratte da alcuni tra i fondatori della fisica moderna a partire da Newton (la maggior parte di queste citazioni è riportata in una Appendice nell'ultima sezione (1.5) di questo capitolo). Spesso i trattati di fisica, anche i migliori, non si soffermano quasi mai su quello che, con Bridgman, si può chiamare *"l'aspetto interpretativo della fisica"*, definendo tali speculazioni *"metafisiche"*. Per esempio, riguardo ai concetti di cui ci stiamo occupando, molti autori dichiarano che **nella Meccanica Newtoniana "lo spazio ed il tempo sono assoluti"** ma non spiegano quasi mai dettagliatamente che cosa si deve intendere con tale affermazione e meno che mai si soffermano sull'evoluzione storica e critica di tali concetti fondamentali.

[1] Per esempio, oltre i libri già citati di Bridgman, possiamo tener presente: Max Jammer, *Storia del concetto di spazio*, Feltrinelli Editore, Milano (1963); Steven Hawking, *Dal Big Bang ai buchi neri. Breve storia del tempo*, Rizzoli, Milano (1988); Paul Davies, *I misteri del tempo*, Oscar Saggi Mondadori, Milano (1997); Ilya Prigogine, *La fine delle certezze. Il tempo, il caos e le leggi della natura*, Bollati Boringhieri (1997); Giuliano Toraldo di Francia, *L'indagine del mondo fisico*, Giulio Einaudi Editore, Torino (1976).

1.1.1 Spazio, tempo e movimento secondo Newton

sec:1.1.1

Nella Premessa scritta da Albert Einstein ad un interessante libro di Max Jammer,[2] il fondatore della Teoria della Relatività, presentando il libro, fa alcune considerazioni sul concetto di spazio nella prospettiva della sua evoluzione storica. Fra le altre cose, egli si sofferma soprattutto su due concezioni di spazio particolarmente rilevanti per la storia del pensiero fisico.
Dice Einstein: *Questi due concetti di spazio possono essere contrapposti come segue:*
(a) *lo spazio come una qualità relativa alla posizione del mondo degli oggetti materiali;*
(b) *lo spazio come contenitore di tutti gli oggetti materiali.*
Nel caso **(a)**, *lo spazio senza un oggetto materiale è inconcepibile. Nel caso* **(b)**, *un oggetto materiale può essere concepito solo come esistente nello spazio; lo spazio appare, allora, come una realtà che in certo senso è superiore al mondo materiale. Entrambi i concetti di spazio sono libere creazioni dell'immaginazione umana, mezzi progettati per una più facile comprensione della nostra esperienza sensibile.*

Noi adotteremo la concezione **(b)** dello spazio, come contenitore di tutti gli oggetti materiali, ed aggiungiamo una semplice osservazione:
È esperienza comune che ogni fenomeno fisico si svolge nello "spazio" e nel "tempo", perciò "spazio" e "tempo" sono gli ingredienti fondamentali di ogni teoria fisica. Da questa semplice constatazione ne segue che ogni legge fisica comporta esplicitamente o implicitamente delle **"relazioni spazio-temporali"** cioè delle distanze e degli intervalli di tempo.
Sentiamo, a tal proposito, che cosa dice Newton, del tempo e dello spazio nella prima parte della sua opera immortale **"Philosophiae Naturalis Principia Mathematica"** (Londra, 1687; trad. italiana a cura di Alberto Pala, Utet, Torino, 1965).
Definizioni - Scolio, pag.101-102:
"Fin qui è stato indicato in quale senso siano da intendere, nel seguito, parole non comunemente note. Non definisco, invece, **tempo, spazio, luogo e moto**, *in quanto notissimi a tutti. Va notato, tuttavia, come comunemente non si concepiscano queste quantità che in relazione a cose sensibili.* **Di qui nascono i vari pregiudizi, per eliminare i quali bisogna distinguere le medesime quantità in assolute e relative, vere e apparenti, matematiche e volgari.**
I. **"Il tempo assoluto", vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunchè di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata**: *quello relativo, apparente e volgare, è una misura (esatta o inesatta) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, l'anno.*
Pag. 102-103:
II. **"Lo spazio assoluto", per sua natura senza relazione ad alcunchè di esterno, rimane sempre uguale ed immobile;** *lo spazio relativo è una misura o dimensione mobile dello spazio assoluto, che i nostri sensi definiscono in relazione alla sua posizione rispetto ai corpi, ed è comunemente preso al posto dello spazio immobile;. . . . . .*
Pag. 105-106:
IV. . . . . *I giorni naturali, che di consueto sono ritenuti uguali, e sono usati come misura*

[2] Max Jammer, *Storia del concetto di spazio*, Feltrinelli Editore, Milano (1963), pag. 7.

del tempo, sono ineguali. Gli astronomi corregono questa ineguaglianza affinchè, con un tempo più vero, possano misurare i moti celesti. **È possibile che non vi sia movimento talmente uniforme per mezzo del quale si possa misurare accuratamente il tempo.** *Tutti i movimenti possono essere accelerati e ritardati, ma* **il flusso del tempo assoluto non può essere mutato.** *Identica è la durata o la persistenza delle cose, sia che i moti vengano accelerati, sia che vengano ritardati, sia che vengano annullati;.....*
Pag. 106-107
.....Così, invece dei luoghi e dei moti assoluti usiamo i relativi; né ciò riesce scomodo nelle cose umane: ma nella Filosofia occorre astrarre dai sensi. **Potrebbe anche darsi che non vi sia alcun corpo in quiete al quale possano venire riferiti sia i luoghi che i moti".**

Riguardo le precedenti citazioni dai Principia di Newton, osserva giustamente il Bridgman:[3]
"*....* **Ora nulla ci garantisce che in Natura esista qualcosa avente proprietà simili a quelle indicate nelle precedenti definizioni newtoniane, e la fisica, ridotta a concetti di questo genere, diventa una scienza astratta e lontana dalla realtà quanto la geometria astratta dei matematici, costruita su postulati.** *È compito dell'esperienza stabilire se concetti così definiti corrispondono a qualcosa di esistente in Natura; noi dobbiamo essere sempre preparati à constatare che questi concetti non corrispondono a nulla, o solo in parte corrispondono a qualcosa. In particolare, se esaminiamo la definizione di* **"tempo assoluto"** *alla luce dell'esperienza, non troviamo in Natura nulla che abbia tali proprietà".*
Noi aggiungiamo che la stessa osservazione vale per il concetto di **"spazio assoluto". Non ha senso parlare della posizione o del moto di oggetti nello spazio assoluto, o di proprietà dello spazio assoluto, ma ci si deve sempre riferire ad un ben determinato "sistema di coordinate legato ad un corpo rigido"**, come è chiarito in un meraviglioso brano di Albert Einstein che abbiamo riportato nella lettura del paragrafo 1.5.1 e che consigliamo vivamente allo studente di leggere.
Ed il grande fisico teorico Max Born osserva:[4] **"L'affermazione in base alla quale "lo spazio e il tempo assoluti" esistono "indipendentemente da ogni oggetto esterno" sembra strana da parte di Newton, in quanto egli spesso dà risalto al fatto che intende indagare soltanto su ciò che è reale, che può cioè essere rilevato dall'osservazione.** *Il suo motto, definito e conciso, è* **"hypotheses non fingo"** *("non formulo ipotesi"). Tuttavia* **ciò che esiste "indipendentemente da ogni oggetto esterno" non è osservabile, e non costituisce un fatto reale.** *Ci troviamo qui evidentemente di fronte ad un caso in cui sono state applicate, al mondo oggettivo,* **"idee preconcette" sulla cui veridicità non era stato fatto alcun esame approfondito".**
Infine i fisici teorici Landau e Lifschitz - contrariamente a ciò che molti autori affermano, ripetendo con Newton, che lo spazio è assoluto - dicono chiaramente, senza mezzi termini, che: **"già in Meccanica Classica "lo spazio è relativo"**, cioè le relazioni spaziali tra differenti eventi dipendono soltanto dal sistema di riferimento nel quale vengono descritti. L'asserzione che due eventi avvengono ad istanti differenti in uno stesso punto dello spazio

[3] P.W. Bridgman, *La logica della fisica moderna*, Edizioni scientifiche Einaudi, Torino (1957), pag. 24.
[4] Max Born, *La sintesi Einsteiniana*, Boringhieri, Torino (1969), pag. 80.

o, in generale, ad una determinata distanza l'uno dall'altro, acquista un senso soltanto se è indicato il sistema di riferimento al quale questa asserzione si riferisce.
"Il tempo in Meccanica Classica è invece assoluto"; in altri termini, si suppone che le proprietà del tempo non dipendano dal sistema di riferimento; il tempo è identico per tutti i sistemi di riferimento. Ciò significa che **se due eventi arbitrari sono "simultanei"[5] per un osservatore, essi sono "ugualmente simultanei" per ogni altro osservatore**. In generale, l'intervallo di tempo tra due eventi dati deve essere identico in tutti i sistemi di riferimento".

1.2 GLI ASSIOMI DELLA FISICA CLASSICA

sec:1.2

Per renderci conto di quali fossero le difficoltà che si presentarono nella Fisica Classica verso la fine del XIX° secolo, converrà richiamare esplicitamente gli assiomi fondamentali sui quali essa si fondava. In essi possiamo distinguere **un gruppo di assiomi generali**, implicanti concetti comuni a tutti i fenomeni fisici, e **due gruppi di assiomi più specifici attinenti l'uno ai fenomeni meccanici, l'altro ai fenomeni elettromagnetici.** Nell'una o nell'altra di queste due classi si pensava allora potersi inquadrare qualsiasi fenomeno fisico. **Gli assiomi generali introducono come "concetti primitivi" "lo spazio" ed il "tempo"** come vennero sostanzialmente concepiti dai fondatori della Meccanica, Galileo e Newton, con l'aggiunta di alcune precisazioni maturate successivamente. Si osservi che essi contengono implicitamente gli assiomi della geometria euclidea ed il concetto di corpo rigido.
L'esposizione che segue degli assiomi fondamentali non pretende minimamente di essere rigorosa ed esaustiva: si raccolgono semplicemente molte delle proprietà che vengono effettivamente usate nella Fisica Classica.

1.2.1 I° Gruppo - ASSIOMI GENERALI

sec:1.2.1

Nella Meccanica Classica, **"spazio e tempo"**, vengono assunti come **"enti primitivi"** e le loro proprietà salienti possono essere sintetizzate nei seguenti assiomi dei quali il primo afferma che **"lo spazio non è assoluto"**, contrariamente a quanto dice Newton, ma, come mettono in luce più concretamente Landau e Lifschitz, **"lo spazio è relativo"** (cfr. fine paragrafo ??).

1.2.2 LO SPAZIO È RELATIVO

sec:1.2.2

ASSIOMA I:
1) *Esiste in Natura uno* **spazio fisico** Σ *i cui elementi P diconsi* **punti (o luoghi)**, *contenente oggetti materiali di svariata natura, sede di tutti i possibili fenomeni fisici (ma anche chimici, biologici, ecc.), al quale sono perciò subordinate, non solo tutte le leggi fisiche, ma anche tutte le possibili leggi della Natura.*
2) *In tale spazio esiste una classe particolare di oggetti chiamati* **solidi** *dai quali,*

[5] In Meccanica Classica si intende tacitamente che due eventi sono simultanei se accadono nello stesso istante, senza però dare nessuna definizione operativa di "simultaneità".

per astrazione, si deduce il concetto di "**corpo rigido**".[6]
Questo concetto è necessario - almeno nell'impostazione tradizionale della Fisica Classica - per definire le lunghezze e le distanze fra i punti di Σ.

3) Lo spazio fisico Σ è euclideo tridimensionale (omeomorfo ad $\mathbb{R}^3$)
Con ciò si vuol dire che esso è rappresentabile con uno spazio euclideo a 3 dimesioni E^3, *vale cioè in esso l'ordinaria Geometria Euclidea.*[7]
In Σ *esistono* ∞^6 *terne cartesiane ortonormali distinte* ("**sistemi di coordinate**" **o** "**riferimenti cartesiani**") $\mathcal{T} = Oxyz$, *solidali a corpi rigidi,* **rispetto alle quali è possibile reperire i suoi punti**, *munite di un osservatore* $\mathcal{O}$, *che possiamo identificare con l'origine della terna cartesiana di riferimento, e di un regolo rigido (***regolo campione***) per la misura delle distanze spaziali ovvero per la determinazione delle coordinate* x, y, z *dei punti di* Σ.

---

[6]Per la nozione di corpo rigido consigliamo di consultare il libro di Piero Giorgio Bordoni, *Lezioni di Meccanica Razionale*, Libreria Eredi Virgiglio Veschi, Roma (1972), pag.3.
Def.: Si dicono **solidi** i corpi che godono della proprietà che, comunque si prendano due loro spigoli o facce, se esse coincidono in un confronto per sovrapposizione, ciò deve accadere in qualunque confronto successivo (effettuato nell'ipotesi di identiche circostanze locali); i metalli, i marmi, le rocce, le pietre, i legni, ecc., forniscono altrettanti esempi di corpi di questo tipo.
La precedente definizione ha un diretto significato operativo e non presuppone l'introduzione delle nozioni metriche di lunghezza, area, volume: sono invece queste ultime che traggono la loro origine dal comportamento sperimentale dei solidi, o meglio dal comportamento di un ideale **corpo rigido**.
Def.: *Dicesi* **corpo rigido** *un corpo al quale si attribuiscono in maniera completa le proprietà sensibilmente possedute dai diversi solidi.*
Per indicare che due o più spigoli rettilinei appartenenti a solidi diversi sono totalmente sovrapponibili si dice che essi hanno la medesima **lunghezza**, o meglio si attribuisce la stessa lunghezza ai corrispondenti segmenti dei corpi rigidi che rappresentano idealmente i solidi.
Def.: Una **lunghezza** è quindi la classe di equivalenza costituita da tutti i segmenti, tracciati su corpi rigidi, totalmente sovrapponibili tra loro.
Tale concetto di **lunghezza** si identifica ovviamente col concetto di **distanza** fra i punti estremi di tutti i segmenti, tracciati su corpi rigidi, totalmente sovrapponibili tra loro. Per misurare le lunghezze o le distanze generalmente si fissa l'attenzione su di un cosìdetto **regolo campione** scelto arbitrariamente nella classe dei solidi.
Def.: Dicesi **regolo campione** una **sbarra solida rettilinea** la cui proprietà essenziale è che: se gli spigoli di due regoli campione coincidono in un confronto per sovrapposizione, ciò accada in ogni successivo confronto.
Dal 1983 in poi, la precedente definizione di regolo campione è diventata anacronistica perché, per una convenzione internazionale, *l'unità di lunghezza (***il metro***) viene definita come lo spazio percorso dalla luce nel vuoto nell'unità di tempo, cioè in un secondo.* In quest'ottica è la definizione dell'unità di tempo (il secondo) che acquista importanza primaria e conseguentemente anche la velocità della luce nel vuoto che è una costante universale. Ad ogni modo è necessario precisare che la vecchia definizione del metro campione come la lunghezza della sbarra di platino-iridio conservata nei musei di Sèvres (presso Parigi) uguale alla 40-milionesima parte del meridiano terrestre, è approssimativamente uguale alla più precisa definizione moderna.

[7]Nell'assioma 1° sono quindi implicitamente inclusi tutti gli assiomi della Geometria Euclidea. A questo proposito è bene riflettere su ciò che dice P. W. Bridgman della Geometria Euclidea: "....dal punto di vista operativo il sistema di riferimento della geometria cartesiana, spesso immaginato in senso matematico ideale, è di fatto un sistema fisico, e che con proprietà spaziali non intendiamo altro che le proprietà di questo sistema di riferimento. Dicendo che lo spazio è euclideo, intendiamo che lo spazio fisico dei regoli misuratori è euclideo: non ha senso chiedersi se lo spazio vuoto è euclideo. *La geometria in quanto si vogliano applicare i suoi risultati al mondo fisico esterno e in quanto non la si consideri un sistema logico costruito sulla base di postulati, risulta pertanto una scienza sperimentale*" (P. W. Bridgman, *La logica della fisica moderna*, ed. Scient. Einaudi, Torino (1957), pag. 74).

4) Proprietà d'invarianza degli intervalli spaziali
In sistemi di coordinate arbitrari e distinti $Oxyz$, $O'x'y'z'$ in quiete fra di loro, o in moto relativo - con la convenzione che in essi venga scelta la stessa unità di misura per le lunghezze - la distanza tra due punti ben determinati (o, equivalentemente, la lunghezza di un corpo lineare rigido) misurata in un riferimento cartesiano è la stessa misurata in qualsiasi altro sistema (pur avendo i due punti coordinate diverse rispetto ai diversi sistemi di coordinate).

5) Lo spazio fisico Σ è relativo
Con ciò - contrariamente a quanto spesso si afferma dicendo che **"lo spazio è assoluto"** *- si vuole intendere, seguendo Landau e Lifschitz, che: le relazioni spaziali tra differenti eventi dipendono soltanto dal sistema di riferimento nel quale vengono descritti. L'asserzione che due eventi avvengono ad istanti differenti in uno stesso punto dello spazio (***eventi equilocati***) o, in generale, ad una determinata distanza l'uno dall'altro, acquista un senso soltanto se è indicato il sistema di riferimento al quale questa asserzione si riferisce.*

La fisica classica ha ritenuto di poter, almeno approssimativamente, identificare lo spazio fisico Σ con lo spazio Σ^* solidale alle cosiddette **"stelle fisse"**, pur senza assumere questa identificazione come definitiva. In altre parole, per reperire i punti di Σ, ci si può avvalere di una terna cartesiana $\mathcal{T}^* = (O^*x^*y^*z^*)$ fissandone l'origine O^* su di una arbitraria stella fissa e gli assi x^*, y^*, z^* in direzione di altre tre stelle fisse. La fisica classica permette anche di definire altri sistemi di coordinate nello spazio Σ, mobili l'uno rispetto all'altro di moto rigido.

1.2.3 IL TEMPO È ASSOLUTO

sec:1.2.3

ASSIOMA II:
1) *Si postula l'esistenza di un* **tempo assoluto (pantopico)** Θ, *i cui elementi t diconsi* **istanti**, *del tutto indipendente dalla nozione di spazio, cioè indipendente sia dalla posizione dell'osservatore sia dalle sue condizioni di quiete o di moto, rispetto ad una data terna cartesiana di riferimento $\mathcal{T} = Oxyz$. Inoltre, deve potersi dire senza incertezza se due avvenimenti sono simultanei* **(nozione di simultaneità o contemporaneità)**[8] *ovvero se l'uno precede l'altro* **(nozione di ordine temporale)**.
La valutazione numerica di una durata temporale è naturalmente subordinata alla scelta di una **unità di misura temporale**, completamente disponibile, così come deve essere disponibile **l'origine dei tempi**.
2) Dal punto di vista matematico *il tempo viene dunque considerato come un insieme ordinato Θ di infiniti elementi t (istanti) omeomorfo allo spazio numerico* $\mathbb{R}$.
3) Dal punto di vista fisico *l'identificazione e la misura dei tempi presuppone*

[8] Si deve esplicitamente avvertire che la nozione di **simultaneità** viene assunta, nella fisica classica, come un **pregiudizio** senza darne alcuna definizione precisa e senza verifica sperimentale; ed in ciò si deve ravvisare la sua intrinseca debolezza.

la disponibilità di opportuni dispositivi come **meridiane, clessidre ed orologi** *opportunamente costruiti ed in opportune condizioni di funzionamento.*
4) Si ritiene inoltre che sia possibile regolare gli orologi, che nei vari sistemi cartesiani misurano il tempo, in modo tale che il valore di questo, riferito ad un determinato "avvenimento", sia lo stesso in ogni sistema di coordinate

$$t = t'.$$

Parte integrante del concetto di tempo assoluto è anche la seguente
5) Proprietà d'invarianza degli intervalli temporali:
È determinata in modo unico e completamente autonomo la **durata** *di un certo fenomeno, o* **l'intervallo temporale** *tra due avvenimenti, nel senso che la durata di un avvenimento è la medesima in ogni sistema di coordinate.*

Nella Meccanica ed in tutta la Fisica Classica, per quanto concerne lo spazio ed il tempo, ci si attiene sistematicamente agli Assiomi I e II.

La fisica classica attribuisce allo spazio Σ *e al tempo* Θ *un'esistenza a priori, indipendente l'uno dall'altro e indipendente dai fenomeni che in èssi si svolgono.*
Una terna di assi metrizzati $\mathcal{T} = Oxyz$, e il tempo metrizzato t costituiscono un **riferimento fisico spazio-temporale completo** $\mathcal{R} \equiv (Oxyz, t) \equiv (\mathcal{T}, t)$ per lo studio di tutti i fenomeni fisici, nel senso che **ad ogni avvenimento** si associano tre coordinate spaziali x, y, z ed una coordinata temporale t, atte a individuare l'avvenimento stesso nella storia dell'universo, precisandone il **luogo** e la **data**. Alla quaterna numerica spazio-temporale (x, y, z, t), associata ad un dato avvenimento, si dà il nome di **"evento puntiforme"** o semplicemente **"evento"**.
Gli assiomi generali **I** e **II** permettono di costruire la teoria descrittiva dei fenomeni di moto, cioè **la Cinematica nel riferimento** $\mathcal{R} \equiv (Oxyz, t)$: *Cinematica del punto, Cinematica dei sistemi di punti,* in particolare *Cinematica dei corpi rigidi.*
Le nozioni cinematiche si applicano a tutti i fenomeni fisici che ad ogni istante siano ben localizzabili nello spazio; esse si adattano quindi sia al moto di un punto materiale, sia alla propagazione di un impulso elettromagnetico, in particolare luminoso.
La cinematica dei moti rigidi istituita in un determinato riferimento $\mathcal{R} \equiv (Oxyz, t)$ può ugualmente stabilirsi in qualunque altro riferimento $\mathcal{R}' \equiv (O'x'y'z', t')$, generalmente mobile rispetto ad $\mathcal{R} \equiv (Oxyz, t)$, in cui è da intendersi che si possa ritenere $t = t'$ essendo il tempo assoluto.
Gli assiomi generali **I** e **II** permettono anche di *confrontare* i moti simultanei di un medesimo punto o sistema rispetto a due riferimenti diversi $\mathcal{R}$ ed $\mathcal{R}'$, di stabilire cioè *la Cinematica dei moti relativi* con le note:
a) - legge di composizione delle velocità (o teorema dei moti relativi)

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{v}_\tau, \tag{1.1}$$ eq.1.5

b) - legge di composizione delle accelerazioni (o teorema di Coriolis)

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{a}_\tau + \boldsymbol{a}_{cor}, \tag{1.2}$$ eq.1.6

dove $\boldsymbol{v}$, è la velocità di un arbitrario punto P rispetto al riferimento $\mathcal{R}$ (la cosiddetta **velocità assoluta**), $\boldsymbol{v}'$, l'analoga velocità di P rispetto al riferimento $\mathcal{R}'$ (la cosiddetta **velocità relativa**), mentre $\boldsymbol{v}_\tau$, è la cosiddetta **velocità di trascinamento** di $\mathcal{R}'$ rispetto ad $\mathcal{R}$; $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{a}', \boldsymbol{a}_\tau$ le analoghe accelerazioni, mentre $\boldsymbol{a}_{cor} = 2\boldsymbol{\omega}_\tau \wedge \boldsymbol{v}'$ è **l'accelerazione di Coriolis**, con $\boldsymbol{\omega}_\tau$ **velocità angolare di trascinamento** di $\mathcal{R}'$ rispetto ad $\mathcal{R}$.
Osserviamo che questi due teoremi cinematici sono una conseguenza diretta dell'assioma **I** del tempo assoluto: questa osservazione sarà essenziale, soprattutto nei riguardi della legge di composizione delle velocità, nel momento in cui dovremo costruire la Teoria della Relatività Ristretta!

1.2.4 ALTRE PROPRIETÀ DELLO SPAZIO E DEL TEMPO

Le proprietà dello spazio e del tempo non si esauriscono certamente nel contenuto dei due assiomi generali visti in precedenza in maniera separata ed indipendente l'uno dall'altro. Nonostante Newton presenta lo spazio ed il tempo, appunto come concetti indipendenti l'uno dall'altro, ciò non è del tutto vero anche nell'ambito della Meccanica Classica. Per esempio l'unità di misura del tempo, **il secondo**, com'è noto, è attualmente definito, in base ad una convenzione internazionale del 1967, **come l'intervallo di tempo durante il quale avvengono 9.192.631.770 vibrazioni (di specificata lunghezza d'onda) della radiazione emessa da un atomo di cesio**. Utilizzando poi la proprietà della *costanza della velocità della luce nel vuoto*, nel 1983 la 17ª Conferenza Generale dei Pesi e Misure stabilì che: **il metro è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di** 1/299.792.458**-esimo di secondo**. Così facendo, la velocità della luce nel vuoto viene ad assumere il valore esatto $c = 299.792.458\, m/sec$.
Se si fa un'analisi critica rigorosa di queste definizioni ci si rende conto che i concetti di *spazio, tempo, velocità, moto, e moto uniforme*, sono legati fra di loro, come afferma il Bridgman, in maniera pressoché inestricabile.
Un altro esempio in cui risulta difficile, se non impossibile, separare lo spazio dal tempo è la nozione di **sistema di riferimento inerziale**, che vedremo fra breve, nella cui definizione tali concetti fondamentali sono entrambi coinvolti.
Perciò esamineremo ora brevemente altre notevoli proprietà dello spazio e del tempo, in relazione ai sistemi di riferimento, non incluse in ciò che già abbiamo detto.
1) Rispetto ad un riferimento arbitrario, lo spazio Σ appare "non uniforme o eterogeneo" ed "anisotropo" ed il tempo "non omogeneo".[9]
Ciò vuol dire che per un generico corpo le sue differenti posizioni nello spazio e le sue differenti orientazioni non sono equivalenti dal punto di vista meccanico.
Ed inoltre per quanto riguarda il tempo, si può dire che in generale, esso "non è omogeneo" (non è uniforme), cioè i diversi istanti non sono equivalenti.
La complicazione che queste proprietà dello spazio e del tempo porterebbero nella descrizione dei fenomeni meccanici è evidente, per esempio un **corpo isolato** *(cioè non sollecitato da alcuna azione esterna) non potrebbe perseverare nello stato di quiete: pur essendo nulla la velocità del corpo in un dato istante, il corpo comincerebbe a muoversi nell'istante successivo in una determinata direzione" (Non sarebbe valido il principio d'inerzia!).*

[9] Cfr. le considerazioni di Landau-Lifschitz in *Fisica Teorica 1, Meccanica*, Editori Riuniti, Roma, 1976, pp. 31-33e che noi abbiamo riportato, per comodità del lettore, nel paragrafo ?? come Appendice a questo capitolo.

Ciò succede, per esempio, se il corpo è posto con velocità nulla in un punto arbitrario, non appartenente all'asse di rotazione, di una piattaforma ruotante priva di attrito, oppure su di un treno in fase di accelerazione o durante una frenata.

Tra gli infiniti sistemi di riferimento reperibili in Σ, particolare rilevanza assume una classe di ∞^3 riferimenti privilegiati $\mathcal{R} \equiv (Oxyz, t)$, chiamati **riferimenti inerziali o galileiani.**[10]

1^a **Definizione di sistema inerziale**:
Dicesi **sistema inerziale o galileiano** *una terna di assi cartesiani* $\mathcal{T} \equiv (Oxyz)$ *munita di un regolo rigido per la misura delle lunghezze e di un orologio per la misura del tempo, tale che rispetto ad essa* **lo spazio sia omogeneo ed isotropo ed il tempo omogeneo** (Def. di Landau-Lifschitz).

Possiamo perciò aggiungere le seguenti proprietà dello spazio e del tempo in riferimento alla classe dei sistemi inerziali.

2) Σ è omogeneo o uniforme rispetto ad un qualunque sistema di riferimento inerziale $\mathcal{R} = (Oxyz, t)$:
a) *dal punto di vista fisico* ciò significa che nell'ambito di un riferimento inerziale $\mathcal{R} = (Oxyz, t)$ tutti i punti di Σ sono equivalenti, ovvero che il risultato di qualunque esperienza svolta in un laboratorio $\mathcal{L}$ in quiete in $\mathcal{R}$ non dipende - a parità di modalità sperimentali - dall'ubicazione di $\mathcal{L}$ in $\mathcal{R}$ ovvero di $\mathcal{R}$ in Σ;
b) *dal punto di vista matematico* ciò significa che le leggi della fisica classica pensate formulate in un determinato sistema inerziale, sono formalmente invarianti per qualunque traslazione di assi (trasformazioni lineari di coordinate non involgenti il tempo).
Conseguenza fondamentale dell'omogeneità dello spazio, rispetto ai sistemi di riferimento inerziali, è la *legge di conservazione della quantità di moto per sistemi isolati* (cfr. Landau-Lifschitz, vol. 1, pag. 44).

3) Σ è isotropo rispetto ad un qualunque sistema di riferimento galileiano:
il che significa che non esistono, rispetto a tali riferimenti, direzioni privilegiate. Più precisamente si vuol dire che:
a) *dal punto di vista fisico* il risultato di qualunque esperienza fisica svolta in un laboratorio $\mathcal{L}$, solidale con un sistema di riferimento inerziale, non dipende - a parità di modalità sperimentali - dall'orientamento di $\mathcal{L}$ in Σ;
b) *dal punto di vista matematico* si vuol dire che le leggi della fisica classica, pensate formulate in un qualunque sistema inerziale sono formalmente invarianti per rotazioni degli assi (trasformazioni lineari omogeneee di coordinate non involgenti il tempo).
Conseguenza fondamentale dell'isotropia dello spazio, rispetto ad un riferimento inerziale, è la *legge di conservazione del momento angolare per sistemi isolati* (Landau-Lifschitz, vol. 1, pag. 49).

4) Il tempo è omogeneo o uniforme rispetto ad un qualsiasi riferimento inerziale:

[10] L'appellativo di **sistemi galileiani**, fu proposto da Einstein in onore di Galileo, ed esso appare non solo giustificato, ma per così dire doveroso, in quanto nelle opere di Galileo si trova espresso, in termini mirabilmente limpidi e precisi, il riconoscimento che i fenomeni meccanici si svolgono con le stesse leggi per due oservatori, animati l'uno rispetto all'altro di un moto traslatorio uniforme (**Principio di Relatività di Galileo**).

a) *dal punto di vista fisico* ciò significa che il risultato di qualsiasi esperienza eseguita entro un riferimento inerziale $\mathcal{R} = (Oxyz, t)$ è indipendente dall'istante in cui l'esperienza ha inizio;
b) *dal punto di vista matematico* ciò significa che tutte le leggi della fisica sono formalmente invarianti per una traslazione dei tempi, cioè per un cambiamento dell'origine temporale $\tau = t - t_0$ e dell'unità di misura.
Conseguenza fondamentale dell'uniformità del tempo, nei sistemi inerziali, è la *legge di conservazione dell'energia per sistemi isolati* (Landau-Lifschitz, vol. 1, pag. 43).

1.2.5 Il Principio di Relatività Galileiano

:c:1.2.4a

In virtù di ciò che è stato detto nel paragrafo precedente, se consideriamo in particolare: **un "corpo isolato"("corpo libero")[11] che ad un dato istante si trovi, in un tal sistema, in uno stato di quiete o di moto rettilineo uniforme vi resterà per un periodo di tempo illimitato.**
Arriviamo così alla conclusione che, **in un sistema di riferimento inerziale, il moto di un corpo isolato avviene con velocità costante e in grandezza e in direzione.** Questa asserzione costituisce il contenuto della così detta **legge d'inerzia (o di Galileo) ovvero 1° Principio della Dinamica secondo Newton.**
Se accanto a un dato sistema inerziale introduciamo un altro sistema, animato da moto traslatorio rettilineo uniforme (moto TRU) rispetto al primo, le leggi del moto di un corpo isolato rispetto a questo nuovo sistema saranno le stesse che rispetto al sistema originario: il moto del corpo sarà ancora un moto a velocità costante.
Tuttavia, **l'esperienza mostra** *non solo che le leggi del moto di un corpo isolato coincidono in questi due sistemi, ma che essi sono meccanicamente del tutto equivalenti sotto tutti gli aspetti.*
Esiste quindi non uno, ma una molteplicità infinita di sistemi di riferimento, mobili l'uno rispetto all'altro con moto traslatorio rettilineo ed uniforme. In tutti questi sistemi le proprietà dello spazio e del tempo sono identiche, come pure sono identiche tutte le leggi della Meccanica. Questa asserzione costituisce il contenuto del cosiddetto "Principio di Relatività di Galilei", uno dei principi fondamentali della Meccanica.
Tutto quanto abbiamo detto mette in evidenza la peculiarità delle proprietà dei sistemi di riferimento inerziali, in forza delle quali l'uso di questi sistemi si impone, di regola, nello studio dei fenomeni meccanici. Nel seguito, ove non si dica esplicitamente il contrario, considereremo esclusivamente sistemi di riferimento inerziali.
La completa equivalenza meccanica di tutta l'infinità di questi sistemi dimostra, al tempo stesso, che **"non esiste nessun sistema assoluto"** *che possa essere preferito agli altri, cioè* **"non esiste nessun sistema galileiano privilegiato!"**
I vettori di posizione $\mathbf{r}$ ed $\mathbf{r}'$ di uno stesso punto rispetto a sistemi di riferimento inerziali differenti $\mathcal{R}$ ed $\mathcal{R}'$, dei quali il secondo si muove rispetto al primo con velocità costante

[11] Landau ed i fisici in genere, per **"corpo libero"** intendono **un corpo non soggetto ad alcuna forza**. Nell'ambito della Meccanica Razionale, invece per "corpo libero" si intende un corpo "non vincolato" quindi non soggetto a "forze reattive" (o reazioni vincolari), ma sul quale possono agire delle "forze attive"; per es. sono corpi liberi i pianeti che gravitano attorno al sole, le stelle ed i corpi celesti in generale, sui quali agiscono le interazioni gravitazionali. Un corpo sottratto all'azione di qualsiasi forza si può chiamare, più opportunamente, **"corpo isolato"**.

$\mathbf{V}$ sono legati dalla relazione

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{V}t, \tag{1.3}$$ eq.1.1

in cui si sottintende che il trascorrere del tempo in ambedue i sistemi di riferimento avviene in modo identico, cioè

$$t = t'. \tag{1.4}$$ eq.1.2

L'ipotesi di un tempo assoluto sta alla base stessa dei concetti della Meccanica Classica.
Le formule precedenti, prese assieme,

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{V}t \\ t' = t \end{cases} \tag{1.5}$$ eq.1.3

sono dette **trasformazioni di Galileo.**
Il Principio di Relatività galileiano può essere formulato come requisito d'invarianza delle equazioni del moto della Meccanica rispetto a queste trasformazioni.
Possiamo dunque concludere dicendo che **un'opportuna scelta del sistema di riferimento** è fondamentale per la Meccanica per due motivi essenziali:
a) affinchè ogni affermazione riguardo ai movimenti abbia senso;
b) per avere leggi le più semplici possibili.

Tenuto conto delle considerazioni precedenti è possibile dare anche la seguente definizione alternativa di sistema inerziale.
2^a **Definizione di sistema inerziale**:
Dicesi **sistema di riferimento inerziale o galileiano** *una terna di assi cartesiani* $\mathcal{T} \equiv (Oxyz)$ *in cui le relazioni spaziali, determinate da regoli rigidi in quiete rispetto al sistema, sono euclidee, ed in cui esiste un* **tempo universale** t *in funzione del quale le* **particelle isolate** *rimangono in quiete o si muovono di moto rettilineo uniforme.*

L'esperienza ci insegna che con, buonissima approssimazione, sono galileiane tutte le terne cartesiane solidali con **"il sistema delle stelle fisse"**. Ma anche tutti i sistemi di riferimento mobili di moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro - com'è facile riconoscere con considerazioni cinematiche basate sulla teoria dei moti relativi ed in particolare sul teorema di Coriolis - in ciascuno dei quali risulta ancora valida la geometria euclidea ed è possibile effettuare la scelta oltre che di un'unità di misura per le lunghezze anche di una origine e di una unità di misura per il tempo che siano le stesse per tutti i sistemi di riferimento.

Concludiamo questo paragrafo osservando che dai postulati ammessi, e cioè dalle proprietà di isotropia ed omogeneità spaziale ed omogeneità temporale dei riferimenti galileiani e dal principio di relatività si può dedurre rigorosamente una proprietà di reciprocità tra $\mathcal{R}$ ed $\mathcal{R}'$ che per il suo carattere intuitivo viene generalmente accettata senza dimostrazione, oppure viene assunta come postulato aggiuntivo.[12] Si tratta del seguente:

[12]Per una dimostrazione di questa prprietà si veda: Carlo Cattaneo, *Appunti di Meccanica Relativistica*, La Goliardica Editrice, Roma, 1972, pagg. 42-44.