



Relatività, Energia ed Ambiente

Vincenzo Vagnoni

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e
Fondazione Giuseppe Occhialini

Fossombrone, 25 Marzo 2009



Metodo Sperimentale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Introdotta da Galileo Galilei rivoluziona l'approccio scientifico e produce un salto epocale nella scienza moderna.

È basato su tre fasi:

- 1) Osservazione del fenomeno naturale
- 2) Riflessione ed enunciazione della legge fisica
- 3) **Verifica sperimentale in diverse condizioni**

Nel caso la verifica sperimentale fallisca la legge fisica **non** ha validità generale e deve essere riformulata/completata.

→ Esempio: la caduta di un corpo sulla terra

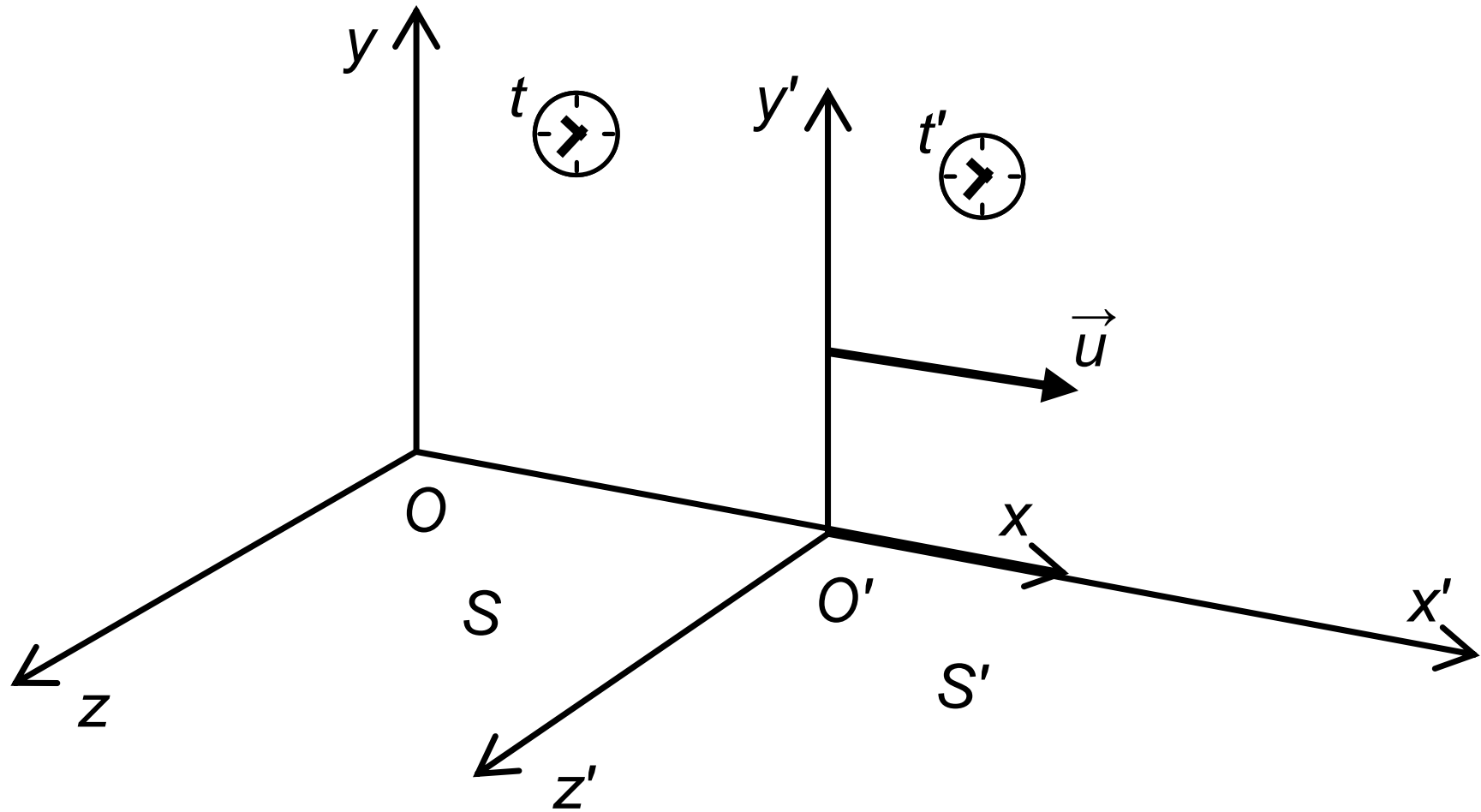
I principi della meccanica classica

- Lo studio della dinamica può basarsi sulle tre leggi fondamentali, o principî, che il grande Isaac Newton (1642-1727) enunciò nel suo celebre trattato "Philosophiæ naturalis principia mathematica" pubblicato nel 1687. I primi due principî della dinamica erano già stati chiaramente compresi da Galileo Galilei, tuttavia il merito di Newton non consiste soltanto nell'aver formulato il terzo, ma anche nell'aver sviluppato su questi tre fondamenti uno studio coerente e sistematico della dinamica.
- In questa lezione partiremo dalle seguenti libere traduzioni degli enunciati di Newton.
- **① Un qualunque punto materiale che non sia sottoposto ad alcuna forza o rimane in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme.**
- **② Un qualunque punto materiale che sia sottoposto a una o più forze ha un'accelerazione vettorialmente proporzionale alla risultante di tali forze.**
- **③ Ogni volta che un corpo esercita una forza su un altro corpo, il secondo esercita sul primo una forza vettorialmente opposta e con la stessa retta d'azione.**
- Per ciascuno di questi principî poi discuteremo il significato fisico e la base sperimentale, pervenendo anche ad un enunciato alternativo, inoltre esamineremo alcune loro conseguenze e applicazioni.

I principi della meccanica classica

- Il **primo principio** della dinamica (principio d'inerzia) postula l'esistenza dei cosiddetti *sistemi di riferimento inerziali*, nei quali un punto materiale abbastanza lontano da tutti gli altri corpi da non risentire di alcuna influenza esterna o rimane in quiete o si muove di moto rettilineo e uniforme. Viene dunque istituita una differenza sostanziale tra due categorie di sistemi di riferimento, quelli inerziali e quelli non inerziali.
- La relatività ristretta eredita dalla meccanica classica il concetto di sistema di riferimento inerziale come luogo "privilegiato" in cui osservare i fenomeni fisici. In un riferimento inerziale, da un lato, la misura dell'accelerazione di un corpo è indicazione della presenza di forze "reali" (cioè dovute all'interazione con altri corpi) agenti su di esso. Viceversa, un osservatore può in linea di principio stabilire, misurando l'accelerazione di un corpo su cui non agiscano forze reali, se il riferimento in cui egli si trova è o non è inerziale: se il corpo possiede un'accelerazione, egli ne attribuirà la causa all'effetto delle cosiddette forze "apparenti" (o "fittizie"), provocate dal moto *accelerato* del sistema di riferimento. Il capitolo centrale della meccanica, quello in cui il moto viene studiato in tutti i suoi aspetti, tenendo conto delle cause fisiche (le forze) che lo determinano, si chiama *dinamica*.

Sistemi di riferimento inerziali



La prima grande unificazione: il peso dei corpi ed il moto dei corpi celesti

- Il nostro viaggio nell'evoluzione del pensiero scientifico moderno comincia da due fenomeni a tutti familiari: il moto, rettilineo ed accelerato, con cui un corpo lasciato libero di cadere da una certa altezza raggiunge il suolo e la rivoluzione dei pianeti attorno al Sole.
- L'uomo di ogni civiltà, sin dai primordi, è stato incuriosito ed ispirato dal moto degli oggetti sulla Terra e da quello dei corpi celesti. Millenni di osservazioni, dettate da interesse scientifico, da stimoli spirituali e persino religiosi, culminarono nelle dettagliate misurazioni compiute da Tycho Brahe (1546-1601) e Galileo Galilei (1564-1642) e nella rigorosa descrizione che Johannes Kepler (1571-1630) fece delle "celesti armonie" in cui si realizza il disegno divino dell'universo.
- Utilizzando i risultati di questi studi, Isaac Newton (1642-1727) formulò la prima grande teoria fisica "unificata", capace di spiegare con grande precisione la modalità di caduta dei gravi sulla Terra e la forma delle orbite dei pianeti del sistema solare sulla base di un solo meccanismo d'interazione fondamentale: l'attrazione gravitazionale tra i corpi, esercitata, nel primo caso, tra la Terra e gli oggetti che si trovano in prossimità della sua superficie e, nel secondo caso, tra il Sole e i pianeti.

La prima grande unificazione: il peso dei corpi ed il moto dei corpi celesti

- La teoria di Newton si basava sulla famosa relazione secondo cui la forza gravitazionale ha un'intensità proporzionale al prodotto della massa attraiante e di quella attratta e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Come ogni teoria "fondamentale", essa rappresentava un'astrazione dai casi specifici in esame (la caduta dei corpi e il moto dei pianeti).
- La sua formulazione forniva una spiegazione della causa di questi fenomeni (la presenza di oggetti dotati di massa che si attraggono), non limitandosi alla descrizione della loro apparenza esteriore: essa assumeva quindi un carattere di completa generalità, che lasciava aperta la strada alla possibilità di prevedere e descrivere nuovi fenomeni eventualmente originati dallo stesso tipo d'interazione.
- Un secolo dopo Henry Cavendish (1731-1810) verificò direttamente, nel suo laboratorio di Cambridge, la generalità della legge di gravitazione di Newton, dimostrando che essa è valida non solo per la Terra ed i pianeti, ma per qualsiasi oggetto tra quelli che ci circondano. Egli rese visibile, con uno strumento appositamente progettato, un fenomeno di entità per noi impercettibile, ma che fa parte della nostra vita di tutti i giorni: due corpi qualsiasi, indipendentemente dalle loro dimensioni, si attraggono; e l'intensità della forza – seppur molto piccola, fintantoché le masse dei due oggetti sono molto minori di quelle dei pianeti – è proprio quella predetta dalla teoria della gravitazione.

La prima grande unificazione: il peso dei corpi ed il moto dei corpi celesti

- Le conseguenze della nuova teoria erano sbalorditive: la formula di Newton rendeva possibile per la prima volta ricavare indirettamente i valori della massa totale della Terra e degli altri pianeti senza conoscerne la densità e la composizione interna, utilizzando solo le misure del raggio terrestre e delle distanze tra i pianeti.
- L'immenso patrimonio di misurazioni astronomiche che secoli di osservazioni avevano reso disponibile veniva per la prima volta correttamente interpretato e pienamente sfruttato. Era finalmente possibile spiegare tutti i fenomeni celesti, calcolarne le caratteristiche fin nei minimi dettagli e prevederne l'evoluzione, con un'accuratezza che sarebbe stata superata solo dalla teoria della relatività generale formulata da Einstein nel XX secolo – e solo, per la verità, nella descrizione di fenomeni molto specifici.
- Basti menzionare che l'applicazione della legge di Newton rese possibile la realizzazione di uno degli eventi più emozionanti della nostra storia: su di essa, quasi trecento anni dopo la sua formulazione, si basavano i calcoli che guidarono nel 1969 la prima discesa dell'uomo sulla Luna.

La comune essenza dei fenomeni elettrici, magnetici e luminosi

- Ci siamo soffermati su quello che è il primo e più semplice esempio di come i più rivoluzionari progressi della fisica derivino dall'unificazione e generalizzazione delle conoscenze precedenti.
- La successiva tappa fondamentale di questo processo fu l'unificazione di elettricità e magnetismo compiuta da James Clerk Maxwell (1831-1879), che racchiuse nella sintesi di poche fondamentali equazioni tutte le conoscenze sui fenomeni generati da cariche, correnti elettriche e magneti. Gli effetti e le proprietà note del campo elettrico e di quello magnetico avevano già trovato la forma di leggi espresse matematicamente, principalmente per opera di Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), André-Marie Ampère (1775-1836) e Michael Faraday (1791-1867).
- Ma nella nuova teoria di Maxwell campo elettrico e campo magnetico risultavano legati in una stretta connessione che non era ravvisabile nelle singole leggi. Anche in questo caso, la sintesi comportava un progresso di conoscenza. Nella forma unificata data da Maxwell alla spiegazione dei fenomeni elettrici e magnetici era immediato riconoscere un'analogia con le tipiche equazioni con cui già da tempo veniva descritta la propagazione delle onde (la vibrazione di una corda, le onde sonore, la luce, ecc.): il campo elettromagnetico era, in realtà, costituito da onde.

La comune essenza dei fenomeni elettrici, magnetici e luminosi

- La velocità di propagazione di tali onde risultava inoltre essere esattamente uguale alla velocità della luce: si scopriva così che la luce non è nient'altro che un tipo particolare di onda elettromagnetica. Le equazioni di Maxwell fornivano quindi una descrizione unificata non solo di elettricità e magnetismo, ma anche dei fenomeni ottici.
- Onde elettromagnetiche "invisibili" (le onde radio, di frequenza molto inferiore a quella delle onde luminose) furono ben presto riprodotte, captate e studiate da Heinrich Hertz (1857-1894) in esperimenti in cui egli applicò e verificò la validità delle equazioni di Maxwell. Cominciava così l'era delle telecomunicazioni: pochi anni dopo Guglielmo Marconi (1874-1937) faceva viaggiare segnali radio su una distanza di oltre tremila chilometri attraverso l'Atlantico.
- Ed oggi noi viviamo in un mondo che è suddito delle equazioni di Maxwell in maniera clamorosa: l'elettromagnetismo è infatti protagonista di tutte le principali tecnologie delle quali ci gioviamo, consciamente o incosciamente, nel corso della nostra giornata. Dall'illuminazione al riscaldamento, dalla radio alla televisione e al computer, non vi è ritrovato che non sfrutti le proprietà della interazione elettromagnetica.

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- La stessa opera di Maxwell poneva già le premesse di un'ulteriore rivoluzione concettuale, quella con cui Albert Einstein avrebbe ridefinito i concetti di spazio e tempo.
- La natura ondulatoria del campo elettromagnetico sembrava presupporre l'esistenza di un proprio mezzo di propagazione, in analogia con le altre forme conosciute di onda: il suono si propaga attraverso l'aria (in assenza di atmosfera, nello spazio, non esistono suoni); l'acqua stessa è il mezzo che, fluttuando, propaga le onde del mare. Tuttavia, nessun esperimento fu mai in grado di dimostrare l'esistenza del presunto, invisibile mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche, il cosiddetto "etere".
- Esisteva poi un grave problema concettuale. Era noto sin dai tempi di Galileo che le leggi che descrivono il moto dei corpi sono indipendenti dal "punto di osservazione", a patto di utilizzare certe semplici equazioni di trasformazione delle coordinate (le cosiddette "trasformazioni di Galileo") quando ci si sposta da un sistema di riferimento ad un altro in moto rispetto al primo. Le leggi dell'elettromagnetismo, invece, sembravano non godere della stessa proprietà: cambiando sistema di riferimento e applicando le trasformazioni di Galileo, le equazioni di Maxwell cambiavano completamente forma, implicando che esperimenti compiuti su cariche elettriche o magneti posti, ad esempio, in luoghi diversi della superficie terrestre avrebbero dovuto dare risultati diversi.

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- Il mondo scientifico dovette confrontarsi con una situazione paradossale:
 - da un lato la teoria dell'elettromagnetismo, che stava ottenendo spettacolari successi, sembrava essere valida così come era stata formulata da Maxwell solo in un particolare sistema di riferimento – era naturale pensare che tale sistema di riferimento privilegiato fosse proprio l'etere, presunto mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche
 - d'altra parte gli esperimenti dimostravano che, al contrario, i fenomeni elettromagnetici erano esattamente identici in qualunque laboratorio venissero studiati. Difficile da accettare era la stessa apparente diversità di comportamento di elettromagnetismo e meccanica dei corpi agli occhi di uno spettatore che cambiasse la propria prospettiva di osservazione: com'era possibile che coesistessero geometrie spaziali di natura diversa a seconda del tipo di fenomeno osservato?
- Fu proprio l'idea che l'indipendenza delle leggi fisiche dal punto di vista dell'osservatore dovesse valere per tutti i fenomeni lo stimolo da cui partì Einstein (1879-1955) per formulare nel 1905 la teoria della relatività "speciale" (così detta per distinguerla dalla ancora più generale teoria formulata dallo scienziato tedesco undici anni più tardi).

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- La teoria risolveva ogni apparente contraddizione concettuale abbandonando definitivamente il concetto di etere (sappiamo da allora che le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto, cioè senza bisogno di alcun mezzo materiale) e sostituendolo con un postulato di notevole audacia intellettuale, oggi diventato uno dei fondamenti della scienza
 - contrariamente alla velocità di un oggetto ordinario, che, come sappiamo, può apparire minore o maggiore per un osservatore che si muova rispetto ad esso rispettivamente nella stessa direzione o in direzione opposta, la velocità della luce nel vuoto ha la particolarità di essere costante e uguale per qualsiasi osservatore.
 - Da questa ipotesi derivavano nuove equazioni di trasformazione delle coordinate che, sostituendo quelle di Galileo, rendevano le leggi dell'elettromagnetismo, al pari di quelle della meccanica dei corpi, indipendenti dal punto di osservazione.
- La teoria di Einstein operava allo stesso tempo tre grandi unificazioni di preesistenti concetti fisici. Da un lato, come abbiamo detto, essa riconciliava tra di loro due mondi fino ad allora distinti, quello in cui si muovono i corpi "ordinari" e quello in cui hanno luogo i fenomeni elettromagnetici, dimostrando che entrambi potevano essere descritti nell'ambito di una comune geometria e prospettiva dello spazio.

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- Allo stesso tempo, il nuovo concetto di spazio risultava indissolubilmente legato a quello di tempo: ad essi si sostituiva la nozione unica di spazio-tempo quadridimensionale, che diventava la sede naturale di osservazione e descrizione dei fenomeni fisici.
- Infine, il concetto di massa di un corpo veniva reinterpretato come una delle possibili manifestazioni di un'entità più generale, l'energia.
 - L'equivalenza di massa ed energia – sintetizzata dall'equazione più famosa della storia della scienza: $E = mc^2$ – implicava inoltre che il principio di conservazione della massa, usato quotidianamente nello studio delle reazioni chimiche, era da considerarsi non più come una legge rigorosa della natura, ma come un'approssimazione valida in specifici ambiti di utilizzo: più in generale, essendo possibili trasformazioni di energia in massa e viceversa, diventavano ammissibili i fenomeni di creazione e distruzione di quantità di materia.
- Non tutte le conseguenze di questa molteplice rivoluzione concettuale riguardano fenomeni che fanno parte direttamente e in modo evidente della realtà di tutti i giorni.

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- Alcune delle peculiarità della nuova concezione dello spazio-tempo potrebbero rivelarsi in modo evidente ai nostri occhi solo se ci muovessimo a velocità prossima o uguale a quella della luce (limite invalicabile per qualsiasi fenomeno fisico).
- Nessun essere umano ha mai avuto esperienza di tale estrema condizione: la velocità della luce, pari a circa 300 000 chilometri al secondo, è un milione di volte più grande della velocità di crociera di un moderno aereo di linea.
- Ma, qualora diventasse per noi possibile raggiungere simili velocità, assisteremmo ad avvenimenti che oggi sfuggono alla capacità di raffigurazione della mente umana: vedremmo contrarsi rispetto a noi gli oggetti che rimangono fermi a terra; e all'interno del nostro mezzo di trasporto il tempo scorrerebbe più lentamente che a terra.
 - Può capitare di sentir parlare di questi fenomeni usando il termine "paradosso". Tuttavia, anche gli aspetti meno intuitivi della relatività di Einstein sono ormai il pane quotidiano degli scienziati che si occupano della fisica fondamentale. La luce, le onde elettromagnetiche e le particelle del mondo atomico e subatomico possiedono velocità uguali o prossime a quella limite: tali entità hanno quindi, per natura, il privilegio di sperimentare direttamente aspetti dello spazio-tempo a noi inaccessibili.

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- Per osservare e descrivere le loro proprietà, tutti i giorni i fisici che operano nei laboratori della fisica subnucleare utilizzano le equazioni della relatività speciale. La dimostrazione più evidente della validità della teoria di Einstein è proprio il ruolo che essa ha acquisito come strumento di lavoro sperimentalmente verificato e irrinunciabile per i ricercatori di tutto il mondo.
- Il progresso apportato dalla nuova visione del mondo ha poi anche conseguenze spettacolari.
 - La già citata equazione di equivalenza tra massa ed energia ($E = mc^2$) stabilisce che una piccola porzione di materia (m) può essere convertita in un'immensa quantità di energia (E), essendo c , la velocità della luce, rappresentata da un numero enorme
 - ad esempio, un grammo di materia contiene una quantità di energia pari a quella prodotta in un giorno da una centrale elettrica da un Gigawatt.
 - Questa nozione fornisce la chiave per la comprensione dei più fondamentali processi dell'universo, dal big bang al risplendere del Sole.
 - Ma, soprattutto, le sue implicazioni hanno condizionato l'evoluzione della scienza e della tecnologia del ventesimo secolo, facendo compiere un salto evolutivo alle tecniche di produzione di energia (reattori nucleari) e arrivando a dare all'uomo il potere di cambiare drammaticamente il corso della storia: l'esplosione atomica su Hiroshima costituisce la più sconvolgente manifestazione delle potenzialità della nuova fisica.

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- La relatività ristretta descrive l'influenza del moto relativo degli osservatori sulle loro misure di lunghezza e tempo, estendendo e generalizzando il principio classico della relatività galileiana, incompleto perché non adatto, ad esempio, a descrivere i fenomeni elettromagnetici. Essa pone le basi di una nuova visione della fisica, in cui spazio e tempo sono unificati in un continuo quadridimensionale. Questa nuova concezione dello spazio-tempo costituisce il fondamento della più complessa teoria della relatività "generale", essenzialmente una teoria della gravitazione, basata sul principio di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale.
- Seguiremo come filo conduttore l'evoluzione storica dei concetti della fisica classica verso la loro moderna riformulazione relativistica, cercando di dare un'idea di quale straordinaria rivoluzione concettuale fu rappresentata dall'avvento della teoria di Einstein.
- Dopo l'enunciazione dei principi della relatività ristretta, mostreremo in dettaglio come da queste nuove idee fondamentali si ricavano le equazioni di trasformazione che, dato un *qualsiasi* fenomeno fisico, mettono tra loro in relazione le diverse prospettive con cui tale fenomeno è percepito da osservatori in moto.

La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia

- Nell'illustrare le principali conseguenze della teoria, metteremo in luce il suo ruolo nella soluzione dei gravi problemi concettuali che provocarono la crisi della fisica classica alla fine del diciannovesimo secolo e quello, attuale, di fondamento indiscusso della fisica contemporanea. Ci soffermeremo inoltre su quegli aspetti che, discostandosi in maniera significativa dalle previsioni della meccanica classica e sfuggendo alla possibilità di un nostro personale riscontro nella vita quotidiana, costituiscono una sorta di paradosso per il nostro intuito.
- Cominciamo col richiamare i principi fondamentali della meccanica classica.