

# **ESPERIMENTI SCIENTIFICI MENTALI: DA PROVE DI VALIDAZIONE AD ELEMENTI DI FALSIFICAZIONE.**

dr.ing. **Alberto Sacchi**  
ing.sacchi@alice.it

Sviluppo Progetti Avanzati srl – R&S dept.

## **1)Abstract**

Gli esperimenti scientifici mentali, inizialmente e storicamente volti alla validazione di ipotesi o teorie scientifiche, sotto differenti interpretazioni ed in assenza di una conferma sperimentale reale e concreta, possono comportare sia la validazione che la falsificazione della teoria in esame. In alcuni casi portano alla indecidibilità tra interpretazioni divergenti.

Vengono analizzati in tale ottica i più noti esperimenti scientifici mentali in campo fisico.

Mental scientific experiments, initially and historically proposed for scientific hypotheses or theories validation, under different interpretations and in the absence of a real and concrete experimental confirmation, may involve both the validation and falsification of the theory in question. In some cases generate undecidability between divergent interpretations.

Are analyzed in this perspective, the most famous scientific experiments in the science field.

## **2)Introduction**

Sono innumerevoli gli esempi di esperimenti mentali in ogni area della scienza; nel seguito verranno analizzati solo i più famosi e storicamente significativi in campo fisico .

Già con Galileo si hanno esempi di esperimenti mentali, ma è con Einstein che tale metodologia viene ampiamente utilizzata benché anche Newton e Maxwell vi avessero fatto ricorso.

Dopo una sintetica illustrazione degli esperimenti considerati, viene analizzata la possibilità che una diversa interpretazione degli stessi comporti la falsificazione della teoria che essi intendevano validare e ciò indipendentemente dal fatto che la teoria stessa risulti essere ampiamente confermata da risultati sperimentali reali effettuati successivamente.

In alcuni casi la interpretazione di risultati logici dell'esperimento mentale comporta la indecidibilità tra teorie diverse o divergenti.

Viene anche considerato lo stato dell'arte tecnologica dell'epoca in cui l'esperimento fu proposto, in ordine alla impossibilità di trasformare lo stesso da mentale ad esperimento fisico reale.

### 3) Analysis of famous mental experiments

#### (A) Dinamica Galileiana

L'esperimento mentale più noto è forse quello riportato da Vincenzo Viviani e condotto da Galileo tra 1589 ed il 1592.

La Dinamica aristotelica, paradigma ufficiale sino al 1500, prevedeva l'esistenza di 4 elementi: Aria, Fuoco, Terra ed Acqua.

Quelli Leggeri (Aria e Fuoco) si muovevano verso l'alto, cioè verso il proprio "Luogo Naturale", mentre quelli Pesanti (Terra ed Acqua) erano naturalmente portati a muoversi verso il Centro della Terra.

Nel "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze", pubblicato a Leida nel 1638, Galileo, in netto contrasto con la tesi aristotelica, scrive: ".... vi assicuro che una palla d'artiglieria, che pesi cento, dugento e anco più libbre, non anticiperà d'un palmo solamente l'arrivo in terra della palla d'un moschetto, che ne pesi una mezza, venendo anco dall'altezza di dugento braccia..."

Ed ancora "...la velocità dei mobili della stessa materia, disegualmente gravi, movendosi per un istesso mezzo, non conservano altrimenti la proporzione della gravità loro, assegnatali da Aristotele..."

A validazione della propria tesi, Galileo propone il noto esperimento mentale: "Ma se questo è, ed è insieme vero che una pietra grande si muove, per esempio, con otto gradi di velocità, ed una minore con quattro, adunque congiungendole ambedue insieme, il composto di loro si muoverà con velocità minore di otto gradi: ma le due pietre, congiunte insieme, fanno una pietra maggiore che quella prima, che si muoveva con otto gradi di velocità; adunque questa maggiore si muove meno velocemente che la minore; che è contro vostra supposizione."

L'esperimento proposto da Galileo, condotto fisicamente, non avrebbe confermato la sua tesi poiché "..... solo uno spazio del tutto voto d'aria e di ogni altro corpo, ancorché tenue e cedente, sarebbe atto a sensatamente mostrarci quello che cerchiamo....."; ciò giustifica pienamente, per l'epoca, la sperimentazione esclusivamente mentale.

Lo stato dell'arte della strumentazione disponibile nel XVI secolo non avrebbe comunque consentito una precisa valutazione dei tempi di caduta anche ipotizzando di poter astrarre dalla resistenza aerodinamica.

D'altra parte il medesimo esperimento interpretato secondo il paradigma aristotelico, risulterebbe falsificare la tesi galileiana, validando contestualmente quella aristotelica.

Infatti, sia il grave di minor massa che quello di massa maggiore “tendono al loro luogo naturale” cioè il “centro della terra” né è previsto che tale tendenza possa invertirsi per il grave minore, al fine di rallentare la caduta dell’insieme dei due corpi. Definendo, con terminologia moderna, “forza” tale tendenza otteniamo che l’insieme dei due corpi vede la componente (somma dei vettori) produrre una accelerazione maggiore rispetto a quella del grave maggiore.

In altri termini la linearità della relazione tra forza e massa consente l’applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti cosicché il sistema dei due corpi congiunti vede la somma vettoriale delle loro accelerazioni.

Questa la dimostrazione “inversa” secondo Aristotele: più elevata è la massa più elevata è l’accelerazione e tanto minore il tempo di caduta.

Se oggi appare evidente la tesi per cui “l’accelerazione gravitazionale è indipendente dalla massa dei gravi” la sperimentazione mentale galileiana non è decisiva in tale senso.

## **(B) Dinamica Newtoniana**

Tale situazione viene ugualmente a verificarsi per altri importanti esperimenti mentali, quali quello newtoniano noto come: “del secchio rotante” riportato allo Scolio I - Paragrafo IV dei *Principia Mathematica*.

Esso venne riproposto da Einstein nello scritto “*Die Grundlagen der allgemeine Relativitätstheorie*” in forma formalmente diversa ma sostanzialmente equivalente: “*Nella meccanica classica vi è un innato difetto epistemologico, che fu chiaramente precisato (forse per la prima volta) da E. Mach.....Lo illustreremo con il seguente esempio. Supponiamo che due corpi fluidi, S1 e S2, stessa natura fisica, stiano volteggiando liberamente nello spazio a distanza così grande l’uno dall’altro e da tutte le altre masse, che le sole forze gravitazionali di cui abbia senso tenere conto siano quelle che insorgono dall’interazione delle diverse parti dello stesso corpo. Supponiamo che la distanza tra le due masse fluide sia invariabile, ed in nessuna delle due masse abbia luogo qualche movimento relativo di una parte rispetto all’altra.*

*Ogni massa, rispetto ad un osservatore solidale con l’altra, ruoti con velocità angolare costante attorno alla retta congiungente le due masse.*

*Questo è un moto relativo controllabile dei due corpi.*

*Ora immaginiamo che ciascuno dei due corpi sia stato misurato a mezzo di campioni di lunghezza fissa rispetto al copro stesso e supponiamo che la superficie di S1 sia una sfera mentre quella di S2 sia un ellissoide di rotazione.....*

*La Meccanica newtoniana non dà una risposta soddisfacente alla domanda di quale sia la ragione della differenza geometrica dei due corpi.*

*Essa afferma che le leggi della dinamica si applicano allo spazio R1 rispetto al quale il corpo S1 è a riposo.*

Newton ritiene, sostanzialmente, che tale differenza tra le due masse, sia da attribuire alle forze sorgenti dalla rotazione (forze centrifughe) di S2 rispetto allo Spazio Assoluto R1.

Egli ritiene, quindi, che tale esperimento costituisca una validazione della ipotesi dell'esistenza dello Spazio Assoluto.

Una attenta valutazione dell'esperimento newtoniano dimostra come esso dia luogo ad una spiegazione indimostrabile.

Infatti si possono presentare tre situazioni:

- L'osservazione delle due masse rotanti viene eseguita da un Osservatore esterno al sistema, quindi solidale con lo Spazio Assoluto di cui si vuole dimostrare l'esistenza. Questa è una evidente tautologia e quindi non può essere considerata una prova di validazione della Teoria newtoniana dello Spazio Assoluto.

- L'osservatore si trova, indifferentemente a bordo di una delle due masse rotanti, ma l'inizio dell'osservazione avviene a posteriori rispetto all'inizio della rotazione. Cioè al tempo  $t_0$ , inizio dell'esperimento osservativo, le due masse si trovano già in rotazione. In tale caso quale sia la causa della differenza dimensionale tra S1 ed S2 è del tutto indimostrabile; addirittura i due corpi rotanti avrebbero potuto avere forma geometrica differente originariamente oppure una causa esterna ignota (non lo Spazio Assoluto) avrebbe potuto provocare la deformazione.

- L'osservazione avviene anteriormente l'inizio rotazione. L'osservatore, posto su S1 o su S2 indifferentemente, constata che i due corpi sono reciprocamente fermi ed hanno forma geometrica sferica. Successivamente i corpi entrano in rotazione ed S2 (visto da S1) viene deformato. Quale sia la causa di tale deformazione non è dimostrabile; si tratta della rotazione di S2 rispetto allo Spazio Assoluto (R2) oppure la causa della deformazione è la medesima (ignota) che ha generato la rotazione?

Molto più interessante la critica sviluppata da E. Mach nello scritto del 1883 "La meccanica nel suo sviluppo storico critico": *"Secondo me, tutto sommato, non esiste che un moto relativo e non scorgo a questo riguardo alcuna distinzione fra la rotazione e la traslazione. Una rotazione relativa alle stelle fisse dà origine in un corpo a delle forze di allontanamento dall'asse. Se la rotazione non è relativa alle stelle fisse, queste forze di allontanamento non esistono. Io non mi oppongo al fatto che si dia alla prima rotazione il nome di assoluta, però non si deve dimenticare che essa non è altro che una rotazione relativa rispetto alle stelle fisse. Possiamo fissare il vaso d'acqua di Newton, poi fare girare il cielo delle stelle fisse e provare allora che queste forze di allontanamento non esistono? Questa esperienza è irrealizzabile; questa idea è priva di senso, poiché i due casi sono indiscernibili fra loro nella percezione sensibile. Dunque io considero questi due casi come ne formassero uno solo e la distinzione che ne fa Newton come illusoria"*.

Ecco quindi che la Teoria dinamica newtoniana non trova nell'esperimento ideato una validazione accettabile. Addirittura tale indimostrabilità potrebbe esser intesa quale falsificazione della ipotesi dell'esistenza di uno Spazio Assoluto.

### **(C) Termodinamica Maxwelliana**

Nel 1964 James Clerk Maxwell presentò alla Royal Society il saggio “ *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*” saggio fondamentale per l'elettromagnetismo e per la scienza moderna in generale, ma fu nel 1873 che con il celebre articolo *On the Final State of a System of Molecules in Motion Subject to Forces of Any Kind* pubblicato su Nature, Maxwell pone le fondamenta per una generalizzazione della termodinamica su basi statistiche.

In particolare Maxwell riteneva che il Secondo Principio non fosse una Legge deterministica bensì, sulla scorta dei suoi studi sulla distribuzione di velocità delle molecole di un gas in equilibrio termico, una legge puramente probabilistica.

A validazione della sua ipotesi, egli propone l'esperimento mentale noto come “il diavoleto di Maxwell”

Due camere indicate con A e B sono interconnesse attraverso un foro dotato di otturatore privo di massa. Entrambe le camere contengono un gas alla medesima temperatura e pressione e, nel loro insieme, costituiscono un sistema isolato ( dal mondo esterno).

L'otturatore è comandato da un “diavoleto” che apre il passaggio ogni qualvolta vede avvicinarsi una molecola diretta da A verso B.

Dopo un tempo finito la pressione in B risulta maggiore rispetto ad A.

Oggi sappiamo che un sistema dinamico isolato avente volume finito può ripresentarsi in condizioni arbitrariamente prossime a quelle iniziali dopo un tempo finito ( teorema di ricorrenza di Henri Poincaré).

Tale tempo è, comunque, estremamente lungo tanto che, per una grammo mole di gas, può essere anche superiore alla vita residua stimata dell'Universo.

Per Maxwell l'esperimento mentale del “diavoleto” doveva evidenziare la valenza non strettamente deterministica del Secondo Principio della Termodinamica.

In realtà, da un esame dettagliato del suo funzionamento, ne deriva l'opposto; cioè l'esperimento mentale falsifica la tesi maxwelliana.

Infatti per decidere se aprire o meno l'otturatore, il “diavoleto” deve poter “vedere” la molecola in arrivo; ciò è ottenibile illuminandola con un fotone di lunghezza d'onda adeguatamente bassa per una precisa localizzazione. La creazione di tale fotone genera un aumento di entropia paragonabile alla riduzione generata dal trasferimento della molecola da A a B. (Brillouin)

L'entropia del sistema non diminuisce ed il Secondo Principio non viene falsificato.

Peraltro è possibile anche una controdimostrazione puramente termodinamica: “Una semplice spiegazione termodinamica concerne il calore trasferito per conduzione e convezione da A a B attraverso il setto separatore. Dopo un eventuale transitorio iniziale il passaggio controllato di molecole veloci da B ad A comporta che:

$$T_A > T_B$$

Dalla Teoria Cinetica dei gas si ricava la relazione:

$$\overline{v_A^2} = \text{velocità quadratica media molecole in A} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (01)$$

con : R = costante gas

M = massa molare

$T_A$  = temperatura assoluta gas in A

t = tempo

Sia  $N_A$  = numero molecole in A ante apertura diaframma

$N_{VA}$  = numero molecole veloci presenti in A:

$$\frac{\partial V^2_A}{\partial t} = \frac{\partial N_{VA}}{\partial t} = \frac{\partial N_A}{\partial t} \quad (0.2) \quad \text{da cui:}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \eta \left( \frac{\partial V^2_A}{\partial t} \right)^2 = \left( \frac{\partial N_{VA}}{\partial t} \right)^2 \quad (0.3)$$

La variazione di temperatura nel tempo per il settore A è funzione del quadrato del numero medio di molecole ( veloci) transitante attraverso il diaframma nello stesso intervallo temporale.

Se  $C_{SMI}$  = calore specifico molare isocoro del gas, il calore trasferito da B ad A a volume costante è :

$$dQ = C_{SMI} \frac{\partial T}{\partial t} N_{VA} \quad (0.4)$$

Parallelamente, per conduzione, attraverso la parete divisoria verrà trasferito calore dalla zona calda A a quella fredda B secondo la:

$$dQ' = \frac{\lambda S}{L} N_{VA} \left( \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \right) \quad (0.5)$$

sino a che:

$$dQ = dQ'$$

cioè sino al raggiungimento dell'equilibrio termico tra la zona A e la zona B.

Quindi, a parte un eventuale ed ipotetico transitorio iniziale, il Diavoleto di Maxwell non sarà in grado di trasferire stabilmente calore dalla zona fredda (B) alla zona calda (A).”

Da [www.fisicamente.net](http://www.fisicamente.net) – *Dal diavoleto di Maxwell al cricchetto di Feynman*)

Un esperimento mentale sostanzialmente equivalente al diavoleto di Maxwell venne proposto da Richard Feynman nel corso di una lezione di fisica all'Istituto Californiano di Tecnologia l' 11 maggio 1962 e riproposto nel testo *Le Lezioni di Feynman su Fisica*.

Una ventola immersa in un fluido a temperatura  $T$ , è collegata ad una ruota dentata dotata di rotazione monodirezionale mediante un arpionismo.

Le dimensioni dell'apparato sono di tipo molecolare in guisa tale l'urto di una sola molecola di fluido sulla ventola possa generare la rotazione della ruota dentata.

Gli urti casuali sulla ventola danno comunque luogo ad una rotazione monodirezionale della ruota dentata in forza dell'arpionismo di cui è dotata..

L'albero di calettamento ventola/ruota è in grado di produrre lavoro utile da fluttuazioni molecolari casuali di un sistema in equilibrio termico estraendolo dalla energia cinetica delle molecole di fluido..

In realtà l'esperimento mentale (immaginario in forza delle dimensioni stesse del sistema) non costituisce una falsificazione del Secondo Principio nella formulazione di Kelvin-Planck “ *È impossibile realizzare una trasformazione ciclica il cui unico risultato sia la trasformazione in lavoro di tutto il calore assorbito da una sorgente omogenea* “.

Infatti il processo non può considerarsi ciclico dato che l'energia cinetica degli urti molecolari sulla ventola, bloccati dall'arpionismo, vengono convertiti in calore con relativo aumento termico sino al completo blocco del meccanismo.

La falsificazione del II Principio non è realizzata ne dall'esperimento di Feynman ne dal diavoleto di Maxwell che, al contrario, contribuiscono a confermarne la validità.

#### **(D) Cinematica Einsteiniana**

Con la pubblicazione della memoria “ *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*” avvenuta sulla rivista scientifica *Annalen der Physik* nel 1905, Albert Einstein propone la propria teoria cinematica dei sistemi inerziali: la Teoria della Relatività Ristretta.

Ne è assioma fondamentale la costanza della velocità della luce rispetto ad ogni sistema inerziale.

Tale assioma comporta inevitabilmente l'assunzione di una precisa scelta sulla natura della luce: fenomeno emissivo in cui la velocità di propagazione è costante rispetto alla sorgente oppure fenomeno radiante in cui la velocità di propagazione è costante rispetto ad ogni sistema di riferimento inerziale? (Relatività Ristretta).

Ed ancora, la costanza di  $c$  genera una diversa valutazione delle simultaneità dei fenomeni elettromagnetici per osservatori in moto relativo.

A conferma della validità dell'Assioma di costanza di  $c$  rispetto ad ogni sistema di riferimento, Einstein propose l'esperimento mentale (peraltro fisicamente realizzabile) noto come esperimento del treno.

In un convoglio ferroviario in moto inerziale a velocità  $v$ , un osservatore  $O$  si pone al centro di un vagone ed illumina simultaneamente gli specchi posti rispettivamente sulla parete frontale e sulla parete opposta del vagone stesso.

I raggi riflessi percorrono entrambi, da un estremo della vagone ad  $O$ , la medesima distanza ed in forza della costanza di  $c$  giungono simultaneamente all'osservatore.

Egli, in tale modo, è in grado di affermare che essi sono stati emessi simultaneamente (dai due specchi).

Per contro un osservatore  $O'$  fermo sulla banchina, vedrà i due raggi riflessi percorrere distanze diverse (Fig 1-  $b > a$ )

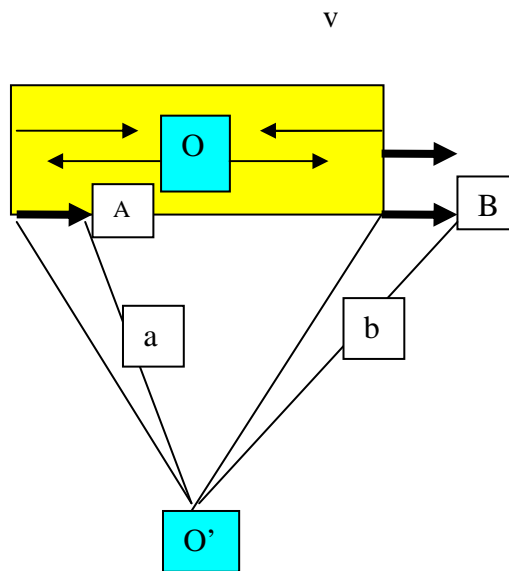


Fig1

Conseguentemente ed in forza della costanza di  $c$  i due raggi gli giungeranno in tempi diversi ed egli giudicherà le due riflessioni non simultanee.

Si supponga ora che le velocità di propagazione delle radiazioni elettromagnetiche risulti, rispetto alla sorgente,  $C^* = K/l^2$  dove  $l$  sia la distanza dalla sorgente e  $K$  un parametro avente le dimensioni  $L^3/t$  ( $t =$  tempo). Sinteticamente si suppone che la luce rallenti il proprio moto in modo inversamente proporzionale al quadrato spazio percorso.

Per l'osservatore  $O$ , a bordo del convoglio, si ha che la distanza specchio-osservatore è identica per entrambi gli specchi e poiché la velocità di propagazione viene riferita alle due sorgenti la cui distanza da  $O$  è identica egli giudicherà i fenomeni riflessivi simultanei.



Per O' la situazione è tale per cui la percorrenza dei tratti a e b di Fig 1 è effettuata a velocità di propagazione  $C^* = K/l^2$ ; ne segue che  $C_a^* = K/a^2$  mentre  $C_b^* = K/b^2$  cui corrispondono i tempi:

$$T_a = a/C_a^* = \frac{a}{Ka^2} = \frac{1}{ka} \neq T_b = \frac{1}{kb} \text{ in perfetta aderenza alle conclusioni einsteiniane.}$$

Ovviamente, allo stato attuale delle conoscenze scientifiche, tale ipotesi (la dipendenza di c dall'inverso del quadrato della distanza) è inaccettabile, ma essa dimostra come sia possibile una diversa interpretazione dei risultati di un esperimento mentale.

### (E) Gravitazione relativistica

L'equivalenza tra massa inerziale (retta dalla I legge della dinamica  $F = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$ ) e

massa gravitazionale (retta dalla legge di gravitazione  $F = G \frac{mM}{r^3} \vec{r}$ ) costituisce il

Principio di Equivalenza Relativistico che recita (nella sua versione ristretta): la massa inerziale, e la massa gravitazionale, sono numericamente uguali.

La equivalenza quantitativa è stata, nel tempo, verificata con diversi livelli di approssimazione.

<b>Autore</b>	<b>Anno</b>	<b>Tecnica</b>	<b>Sensibilità</b>
<u>Giovanni Filopono</u>	500 d.C.?	<u>Caduta libera</u>	"piccola"
<u>Simone Stevino</u>	1585	Caduta libera	$5 \times 10^{-2}$
<u>Galileo Galilei</u>	1590?	<u>Pendolo</u> , Caduta libera	$2 \times 10^{-2}$
<u>Isaac Newton</u>	1686	Pendolo	$10^{-3}$
<u>Friedrich Wilhelm Bessel</u>	1832	Pendolo	$2 \times 10^{-5}$
Southerns	1910	Pendolo	$5 \times 10^{-6}$
Zeeman	1918	<u>Bilancia di torsione</u>	$3 \times 10^{-8}$
<u>Loránd Eötvös</u>	1922	Bilancia di torsione	$5 \times 10^{-9}$
Potter	1923	Pendolo	$3 \times 10^{-6}$
Renner	1935	Bilancia di torsione	$2 \times 10^{-9}$
Dicke, Roll, Krotkov	1964	Bilancia di torsione	$3 \times 10^{-11}$
Braginsky, Panov	1972	Bilancia di torsione	$10^{-12}$
Shapiro	1976	Lunar Laser Ranging	$10^{-12}$
Keiser, Faller	1981	Fluid Support	$4 \times 10^{-11}$
Niebauer, et al.	1987	Caduta libera	$10^{-10}$
Heckel, et al.	1989	Bilancia di torsione	$10^{-11}$
Adelberger, et al.	1990	Bilancia di torsione	$10^{-12}$
Baeßler, et al. <sup>[1]</sup>	1999	Bilancia di torsione	$5 \times 10^{-13}$
Adelberger, et al. <sup>[2]</sup>	2006	Bilancia di torsione	$10^{-13}$

Adelberger, et al. <sup>[3]</sup>	2008	Bilancia di torsione	$3 \times 10^{-14}$
MiniSTEP, MICROSCOPE, Galileo Galilei	2010?	Orbita di un satellite	$10^{-17}?$

Da Wikipedia

Oltre l'equivalenza numerica appare di rilevante interesse verificare l'equivalenza sostanziale (ontologica) ed è su tale presupposto che si basa l'esperimento mentale einsteiniano.

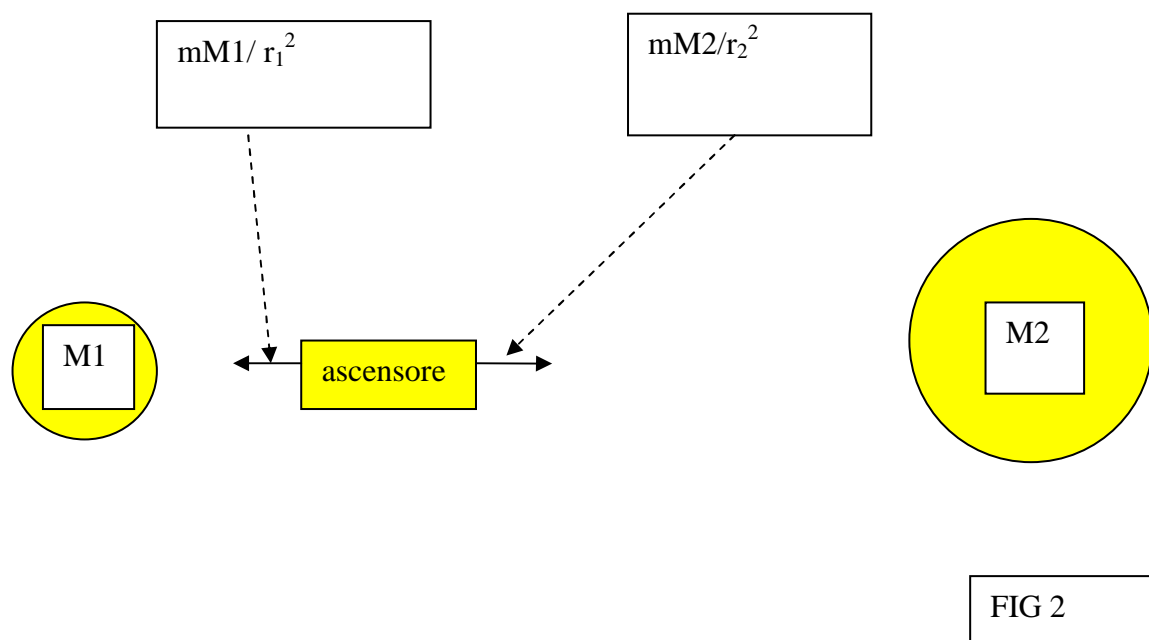
Un ascensore è posto in un campo gravitazionale a distanza  $r$  dal centro di gravità.

Lasciato libero esso si muoverà con accelerazione  $g$  ( $9,81 \text{ m/s}^2$  nel campo gravitazionale terrestre) approssimativamente costante per spostamenti limitati (a rigore infinitesimi); tale risultato sarà quello dedotto da un osservatore  $O'$  solidale con il centro di gravità.

Un osservatore  $O$  posto all'interno dell'ascensore risulterà essere in caduta libera con esso e, conseguentemente, non risconterà l'esistenza di alcuna forza (peso); la deduzione sarà quella di trovarsi in un sistema inerziale.

Naturalmente  $O$  potrebbe anche immaginare di trovarsi in una zona di equilibrio tra due campi gravitazionali opposti; l'equilibrio risulterebbe instabile e verrebbe meno per spostamento non infinitesimali (come peraltro previsto dall'esperimento einsteiniano).

.



Nella ipotetica situazione di Fig 2 le conclusioni di O e di O' coinciderebbero e la sola massa in gioco sarebbe la massa gravitazionale.

## F) Meccanica Quantistica - Principio di Indeterminazione

Il V Congresso Solvay si svolse presso il Leopold Park di Bruxelles dal 24 al 29 ottobre del 1927 .

Vi parteciparono 27 tra i più illustri fisici dell'epoca tra cui: Lorentz, Einstein, De Broglie, Dirac, Born, Heisenberg, Schrödinger, Bohr , Curie; fu proprio in tale occasione che Einstein elaborò alcuni dei suoi famosi esperimenti mentali, atti a falsificare le basi stesse della Meccanica Quantistica.

Einstein fu sempre un accanito sostenitore del determinismo che non ammette casualità nelle leggi della natura; “*Dio non gioca a dadi*” è una sua frase tanto famosa da non richiedere ulteriori commenti.

Ma l'esperimento mentale che meglio chiarisce tale punto di vista fu da Einstein proposto a Bohr nel corso del successivo VI Congresso Solvay ( 20-26 ottobre 1930).

Uno dei Postulati fondamentali della MQ è il Principio di Indeterminazione elaborato da Werner Heisenberg nel 1927.

Esso pone un limite preciso ( $h/4\pi$ ) alla possibilità di determinazione dei valori di grandezze fisiche coniugate quali posizione-quantità di moto o tempo-energia.

L'esperimento mentale prevede l'impiego di una “Scatola a luce” cioè un volume chiuso contenente energia elettromagnetica (ad esempio luce = fotoni). E' ovvio

trattarsi di un esperimento mentale: una scatola avente tali proprietà deve avere pareti infinitamente riflettenti.

In essa sia posto un orologio collegato ad un attuatore che possa aprire, attraverso un diaframma, un foro in una delle pareti ad un istante prefissato.

Il tempo di apertura del diaframma sia tale da consentire la fuoruscita di un solo fotone la cui energia è data da  $E = hf$  ( $f$  = frequenza della radiazione  $\approx$  colore della luce emessa) e la cui massa è ricavabile dalla nota equazione einsteiniana  $E = mc^2$ .

Ne segue che la massa del fotone è  $m = hf/c^2$ .

La scatola a luce subirà una diminuzione di peso pari a  $ghf/c^2$  essendo  $g$  accelerazione gravitazionale.

Sospesa ad una molla, la Scatola a Luce si solleverà di un tratto di valore irrilevante, ma comunque finito e misurabile con precisione illimitata.

Il tempo di rilascio del fotone viene pertanto determinato con precisione limitata solo dalle caratteristiche meccaniche dell'orologio (e non da leggi naturali).

Le due misurazioni di grandezze coniugate (tempo ed energia del fotone) eseguibili senza limiti di precisione, contrastano con il Principio di Indeterminazione e, conseguentemente, con l'intera impostazione della MQ.

Illuminante, per meglio comprendere come si svolsero i fatti, la testimonianza del fisico belga Léon Rosenfeld (1904-1974), stretto collaboratore di Bohr, che in quei giorni si trovava a Bruxelles per incontrare proprio lo scienziato danese:

*«Fu un vero shock per Bohr [...] che all'inizio non riuscì a trovare una soluzione. Per tutta la sera, fu estremamente agitato e continuò a spostarsi da uno scienziato all'altro, cercando di convincerli che non poteva essere vero, che se Einstein avesse avuto ragione, allora sarebbe stata la fine della Fisica [...] Non dimenticherò mai l'immagine dei due antagonisti quando lasciarono il club: Einstein, con la sua figura alta e imponente, che camminava tranquillo, un sorriso appena ironico, e Bohr che allungava il passo per stargli dietro, pieno di eccitazione [...] Il mattino seguente avrebbe visto il trionfo di Bohr».*

Da Wikipedia

Si consideri che l'obiettivo di Einstein nel proporre tale esperimento mentale era dimostrare la incompletezza della MQ; ma una diversa lettura dell'esperimento consente di validare proprio la teoria che Einstein desiderava falsificare.

Tale diversa lettura la si deve a Bohr.

La Relatività Generale prevede che, sotto l'azione di un campo gravitazionale, il tempo scorra più lentamente.

All'istante del rilascio del fotone la Scatola a Luce si sposta verticalmente sotto l'azione della sua forza peso, ridotta dal rilascio del peso del fotone emesso. La sua posizione all'interno del campo gravitazionale terrestre varia così come la misurazione del tempo.

L'istante del rilascio del fotone coincide con lo spostamento dell'orologio nel campo gravitazionale e con la relativa dilatazione dei tempi; sinteticamente l'istante del rilascio risulta determinato con precisione limitata.

### **G) Meccanica quantistica - Complementarità**

Il Principio di Complementarità venne enunciato da Niels Bohr nel 1927, in occasione del congresso di Como.

Esso afferma che non è possibile rilevare contemporaneamente e nel medesimo esperimento sia l'aspetto corpuscolare che quello ondulatorio dei componenti elementari di materia ed energia.

In tale principio è contenuta l'ammissione della duplice natura delle particelle elementari che la sperimentazione non è in grado di verificare contemporaneamente, ma che, ontologicamente è sempre esistente.

Celebre l'esperimento mentale-paradosso proposto da Schrödinger nel 1935 parallelamente all'esperimento EPR (parag. seguente), entrambi volti a falsificare la MQ nella interpretazione canonica (interpretazione di Copenaghen.)

*“Si possono anche costruire casi del tutto burleschi. Si rinchiuda un gatto in una scatola d'acciaio insieme alla seguente macchina infernale (che occorre proteggere dalla possibilità d'essere afferrata direttamente dal gatto): in un contatore Geiger si trova una minuscola porzione di sostanza radioattiva, così poca che nel corso di un'ora forse uno dei suoi atomi si disintegrerà, ma anche, in modo parimenti probabile, nessuno; se l'evento si verifica il contatore lo segnala e aziona un relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro. Dopo avere lasciato indisturbato questo intero sistema per un'ora, si direbbe che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo si fosse disintegrato, mentre la prima disintegrazione atomica lo avrebbe avvelenato. La funzione dell'intero sistema porta ad affermare che in essa il gatto vivo e il gatto morto non sono degli stati puri, ma miscelati con uguale peso.”*

(E. Schrödinger: *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik* [La situazione attuale della meccanica quantistica], *Die Naturwissenschaften* 23

Solo l'osservazione diretta, ottenuta all'apertura della scatola, potrà stabilire quale delle due alternative si è realizzata, mentre la verifica sperimentale dello stato miscelato (gatto vivo-gatto morto) è preclusa dal principio di complementarità.

La osservazione del sistema genererà il collasso della funzione  $\psi$  in uno, ed uno solo, dei due stati sovrapposti.

Quindi, se pur riferita ad un sistema macroscopico, l'esperimento mentale di Schrodinger sembrerebbe confermare sia l'interpretazione di Copenaghen che il Principio di complementarità.

Eppure una sua diversa interpretazione può vanificare tale conclusione.

Nel 1957 il fisico statunitense Hugh Everett III, nella presentazione della propria tesi per il dottorato di ricerca dal titolo *Relative State formulation of quantum mechanics*, ed avendo come relatore il famoso cosmologo John Wheeler propose una visione diversa dei fenomeni (ed una diversa valutazione dell'esperimento mentale di Schrödinger) nota come Many Worlds Interpretation.

Il collasso della funzione d'onda  $\psi$  generata dalla osservazione non sembra essere supportata da alcuna ragione logica; che la sola osservazione possa intervenire sulla realtà potrebbe essere paradossale (anche se lo stesso atto dell'osservare comporta un trasferimento d'informazione e, quindi di energia, dall'osservatore all'oggetto osservato)

Il gatto di Schrödinger, per Everett, mantiene la sua caratteristica di essere contemporaneamente vivo in un universo e morto in un universo parallelo; la osservazione del suo stato (ad esempio morto) non genera alcun collasso di  $\psi$  che, pertanto, rappresenta anche lo stato di gatto vivo ma in un universo parallelo.

Una versione, per alcuni aspetti alternativa al paradosso del Gatto di Schrödinger, è stata elaborata da Max Erik Tegmark, cosmologo svedese naturalizzato statunitense, professore presso il Massachusetts Institute of Technology, che nel 1998, propose il seguente esperimento mentale:

Un osservatore punta alla fronte una pistola dotata di un dispositivo che aziona lo sparo al decadimento di un elemento radioattivo; l'interpretazione di Copenhagen prevede che esista una probabilità del 50% che la pistola spari e l'osservatore muoia ed il 50% che l'atomo non decada, la pistola non spari e l'osservatore sopravviva.

Solo l'osservazione potrà determinare quale delle due alternative si è verificata.

Per contro la MWI (Many Worlds Interpretation) prevede che sussistano entrambe le possibilità espresse dalla funzione d'onda (rappresentante il decadimento dell'atomo radioattivo) e che l'osservatore muoia in un Universo e sopravviva in un universo alternativo.

L'esperimento ripetuto infinite volte, vedrà sempre un clone dell'osservatore sopravvivere in un universo; dal punto di vista di ciascuna di tali copie si avrà la certezza di essere immortale.

Ecco come una diversa lettura dell'esperimento mentale proposto da Schrödinger e da Tegmark può portare sia alla validazione che alla falsificazione della interpretazione canonica (di Copenhagen) della MQ e, conseguentemente, risulta portare alla indecidibilità.

## **H) Entanglement**

L'esperimento mentale noto come Paradosso EPR fu proposto da Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen nel 1935 in un articolo dal titolo "*La descrizione quantistica della realtà fisica può ritenersi completa?*".

Obiettivo era quello di dimostrare che la MQ, nella interpretazione canonica di Copenaghen, era incompleta, violando il Principio di Causalità Locale ossia il principio che stabilisce che eventi spazialmente separati non possono influenzarsi reciprocamente in modo istantaneo (ossia a velocità superiore a  $c$ )

L'esperimento è tanto noto da non richiedere, in questa sede, che un sintetico richiamo.

L'esperimento EPR tende sostanzialmente ad inficiare il Principio di Indeterminazione di Heisenberg misurando contemporaneamente quantità di moto e posizione di una particella con precisione elevata a piacere.

Si considerino due palle da biliardo che si urtano; misurata la quantità di moto della palla A risulta nota anche la quantità di moto della palla B, anche se B si trova, dopo l'urto, a grande distanza da A. Ciò è dovuto al Teorema di Conservazione della Quantità di Moto del sistema A+B.

A questo punto la misurazione effettuata su A ne ha modificato la posizione, che risulta pertanto irrilevabile con precisione illimitata.

Sulla palla B potrà essere effettuata una misura di posizione con precisione illimitata mentre la sua quantità di moto è nota, anch'essa con precisione illimitata, dalla misura effettuata precedentemente su A.

Sinteticamente e con riferimento a particelle quantistiche: si misura con precisione a piacere la quantità di moto della particella A, deducendo in tal modo anche la quantità di moto della particella B.

Tale misurazione avrà disturbato la particella A in modo da non avere alcuna contemporanea informazione sulla sua posizione, ma avrà certamente lasciato inalterata la posizione della particella B che si trova ormai a grande distanza. Simultaneamente è possibile misurare con precisione a piacere la posizione della particella B, la cui quantità di moto è nota dalla misura su A eseguita precedentemente.

L'interpretazione dell'esperimento EPR porta alla nascita di una numerosa serie teorie quantistiche (Interpretazione statistica, Coscienza causa del collasso, Interpretazione alla Berkeley, Decoerenza quantistica, Interpretazione a molte menti, Teorie delle variabili nascoste, Interpretazione di Bohm) ognuna delle quali fornisce spiegazioni alternative al paradosso EPR senza, peraltro, essere completamente esaustiva.

Per Einstein il chiarimento stà nella non conoscenza di variabili ignote che permetterebbero una conoscenza deterministica dello stato di particelle *entangled*.

Da ciò la conclusione ovvia della indecidibilità circa la valenza (validatrice o falsificatrice) di EPR.

#### 4) References

- Galileo Galilei, *Le Opere di Galileo Galilei*, Società editrice fiorentina, 1844 p.233
- V. Viviani, *Racconto storico della vita di Galileo*
- Isaac Newton articolo di George Smith, Stanford Encyclopedia of Philosophy.
- G E Smith, "Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2008 Edition), E N Zalta (ed).
- John T. Blackmore, Ryoichi Itagaki & Setsuko Tanaka (a cura di), *Ernst Mach's Science*, Tokai University Press, Kanagawa, 2006.
- Erik C. Banks, *Ernst Mach's World Elements*, Kluwer, Dordrecht, 2003.
- Dub, E.E., *Atomism and Thermodynamics in Isis*, vol. 58, 1967, pp. 293–303
- Leff, H.S. & Rex, A.F. (eds), *Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing*, Bristol, Adam-Hilger, 1990
- Bennett, C.H. (1987) "Demons, Engines and the Second Law", *Scientific American*, November, pp108-116
- *L'elettrodinamica dei corpi in movimento* Traduzione in italiano dell'articolo pubblicato da Einstein nel 1905
- Corso di relatività ristretta di Bruno Touschek
- Hermann Bondi, *La relatività e il senso comune*, Bologna, Zanichelli, 1963
- Arthur Stanley Eddington, *Spazio, tempo e gravitazione: la teoria della relatività generale*, Torino, Bollati Boringhieri, 2003.
- Wolfgang Pauli, *Teoria della relatività*, Torino, Bollati Boringhieri, 2008.
- Tullio Regge, *Spazio, tempo e universo: passato, presente e futuro della teoria della relatività*, Torino, Utet, 2005.
- Bertrand Russell, *L'ABC della relatività*, prefazione di Piergiorgio Odifreddi, Milano, Tea, 2008.
- Werner Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Mechanics*, Dover Publications, 1930
- Arthur Fine: "The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory", Chicago University Press 1986.
- E. Schrödinger: *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik [La situazione attuale della meccanica quantistica]*, Die Naturwissenschaften 23 (1935) 807–812, 823–828, 844–849; citazione a pag. 812. Articolo originale tradotto in lingua inglese
- Stefan Rinner, Ernst Werner: *On the role of entanglement in Schrödinger's cat paradox*, Central European Journal of Physics 02/2008; 6(1):178-183



