– principio di indeterminazione di Heisenberg

il problema che questo principio si propone di risolvere è la determinazione dell'errore minimo che si può commettere nella misurazione di una grandezza, quando essa venga realizzata con lo strumento più preciso che riusciamo a concepire teoricamente, **a prescindere dalla sua reale fattibilità**.

In altre parole, il principio vuole indicare il limite entro il quale una grandezza fisica definita ha significato.

"**Il principio delle osservabili**" afferma infatti che non si possono definire le grandezze fisiche che non siano, **almeno concettualmente**, misurabili.

Per definire completamente lo stato della materia, è necessario assegnare la posizione occupata nello spazio, l'energia e l'impulso posseduti, in un istante assegnato.

Immaginiamo inizialmente di avere a disposizione strumenti con precisione, potere risolutivo e sensibilità infinitamente elevati, in modo da poter eliminare completamente gli errori strumentali per analizzare solo quelli di principio che **non sarà mai possibile eliminare**.

In questo caso, se la materia considerata può occupare, **in qualsiasi istante qualsiasi punto dello spazio fisico**, ossia si muove in uno spazio continuo, gli errori che possiamo commettere sono solo quelli legati alla "simultaneità" delle diverse misurazioni.

Solo se abbiamo uno stato stazionario, il valore delle grandezze da misurare non cambia nel tempo e sarà dunque possibile realizzare tutte le misuzazioni in istanti diversi senza introdurre errori nelle misure rilevate.

Studiando la teoria degli spazi rotanti abbiamo visto che la materia si organizza sempre nel rispetto dei principi di conservazione della energia e del momento angolare e non è mai stato osservato un caso nel quale i due principi citati non fossero verificati.

Questa osservazione ci autorizza ad imporre la verifica dei due principi come condizione fondamentale per lo studio dell'equilibrio di qualsiasi sistema e in qualsiasi condizione.

1988

Imponendo questi due vincoli all'organizzazione della materia nell'universo, si ricava la possibilità di realizzare una condizione di equilibrio stazionario solo in corrispondenza di orbite circolari ben precise, associate a numeri quantici che indichiamo con p.

Indicando con R_1 il valore del raggio dell'orbita associata a $p = 1$, le orbite circolari sulle quali sarà realizzabile l'equilibrio stazionario saranno espresse dalla relazione :

$$R_p = R_1 \cdot p^2$$

Le condizioni di moto alla sfera planetaria sull'orbita, vengono imposte dallo spazio rotante con la condizione di equilibrio :

$$K^2 = V^2 \cdot R$$

dove K^2 indica una costante caratteristica associata alla materia che genera lo spazio rotante.
Sostituendo la prima relazione nella seconda, si ricava :

$$V^2 = \frac{K^2}{R_1} \cdot \frac{1}{p^2}$$

Indicando con V_1 la velocità di equilibrio sull'orbita di raggio R_1 , si avrà :

$$V_1^2 = \frac{K^2}{R_1}$$

e quindi, per tutte le orbite stazionarie sarà :

$$V^2 = V_1^2 \cdot \frac{1}{p^2}$$

Essendo V^2 il valore dell'energia associata all'unità di massa in orbita, si può dire che :
Nello spazio rotante la quantizzazione delle orbite stabili produce una

quantizzazione dell'energia specifica ad esse associata.

Se abbiamo una massa planetaria di valore m , in orbita stabile con velocità V, in uno spazio rotante di valore K^2 , indicando con :

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 = \text{energia associata alla massa in orbita } \textbf{stabile}$$

$$P = m \cdot V = \text{impulso associato alla massa in orbita } \textbf{stabile}$$

sulle orbite quantizzate si ricavano le relazioni :

$$P \cdot R = (m \cdot V) \cdot R = m \cdot \frac{V_1}{p} \cdot R_1 \cdot p^2 = m \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot p$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot p}{2 \cdot T}$$

ponendo :

$$2 \cdot \pi \cdot m \cdot V_1 \cdot R_1 = M_1 \quad ; \quad E = E_1 \cdot \frac{1}{p^2} \quad ; \quad P = (m \cdot V_1) \cdot \frac{1}{p}$$

sulle orbite circolari stabili si verificano le espressioni :

$$E \cdot (2 \cdot T) = M_1 \cdot p$$

$$P \cdot R = \frac{M_1}{2 \cdot \pi} \cdot p$$

Queste relazioni sono di validità assolutamente generale, per cui si applicano alle strutture atomiche come agli ammassi galattici.

1990

In entrambi i casi si verifica la quantizzazione delle orbite circolari stabili e tra due orbite consecutive l'equazione del moto non fornisce soluzioni reali.

Questo vuol dire che, se si verifica una transizione da un'orbita all'altra, non esiste alcuna possibilità di descrivere le condizioni di moto della massa m per tutta la durata della transizione.

Studiando la teoria generale abbiamo visto però che, realizzando lo scambio alternato di energia tra spazio rotante e massa planetaria, anche in presenza di un eccesso di energia ΔE, rispetto al valore associato all'orbita circolare, diventa possibile realizzare un moto stazionario con la massa m in equilibrio su un'orbita ellittica.

Nella realtà, questo scambio si realizza però solo negli spazi rotanti ordinari, nei quali si trovano aggregati di qualsiasi dimensione e questo consente di verificare i principi di conservazione dell'energia e del momento angolare in qualsiasi punto dell'orbita ellittica.

Se abbiamo invece uno spazio rotante atomico, nucleare o subnucleare, nei quali non esistono aggregati materiali liberi e **quelli in orbita sono sempre costituiti da materia nella condizione di "particella elementare" oppure da sistemi di particelle elementari**, **lo scambio continuo di energia con lo spazio fisico rotante**, **necessario per poter soddisfare il principio di conservazione su orbite ellittiche**, **non è realizzabile**, **per la definizione stessa di particella elementare**.

Conseguenza di questa situazione è che le particelle elementari in equilibrio sulle orbite circolari stabili non riescono ad assorbire o cedere la quantità di energia che le porterebbe in equilibrio su orbite ellittiche, a meno che l'afelio non coincida con un'altra orbita circolare stabile.

L'analisi dettagliata del problema viene comunque fatta trattando un capitolo della teoria generale.

Vogliamo qui solo mettere in evidenza che, in queste condizioni, riusciamo a descrivere con precisione (con errore nullo, usando gli strumenti ideali che

sono stati ipotizzati) solo lo stato della massa m sull'orbita di partenza e su quella di arrivo, **ma assolutamente nulla riusciamo a descrivere di quello che accade durante la transizione.**

Quando la massa m non si trova in equilibrio con lo spazio rotante nel quale si muove, ossia durante il passaggio da un'orbita all'altra, le nostre equazioni sono del tutto impotenti e quindi la sua condizione può essere difinita solo a meno delle seguenti differenze :

$$\Delta R = R_2 - R_1 = R_1 \cdot \left(p^2 - 1\right)$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 = m \cdot \left(V_2 - V_1\right) = P_1 \cdot \left(\frac{1}{p} - 1\right)$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = E_1 \cdot \left(\frac{1}{p^2} - 1\right)$$

$$\Delta V = V_2 - V_1 = V_1 \cdot \left(\frac{1}{p} - 1\right)$$

$$\Delta t = T_2 - T_1 = T_1 \cdot \left(p^3 - 1\right)$$

Queste relazioni ci dicono che, anche per bassi valori di p, l'indeterminazione sul valore delle grandezze misurate risulta, **in tutti i casi**, dello stesso ordine di grandezza della misura stessa.

Questo si verifica solo per l'organizzazione degli spazi rotanti atomici e subatomici e non tiene conto degli strumenti utilizzati che, **in questo caso sono stati considerati assolutamente perfetti**.

Si tratta dunque di una indeterminazione legata solo alla struttura della materia.

Abbiamo dunque le indeterminazioni minime :

1992

$$\Delta t \geq T_1 \quad ; \quad \Delta E \geq E_1 \quad ; \quad \Delta P \geq P_1 \quad ; \quad \Delta R \geq R_1 \quad ; \quad \Delta V \geq V_1$$

Si ricavano quindi le relazioni :

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq E_1 \cdot T_1 = \frac{M_1}{2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot V_1 \cdot R_1}{2}$$

$$\Delta R \cdot \Delta P \geq R_1 \cdot P_1 = \frac{M_1}{2 \cdot \pi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot V_1 \cdot R_1}{2 \cdot \pi}$$

$$\Delta V \cdot \Delta t \geq V_1 \cdot T_1 = 2 \cdot \pi \cdot R_1$$

Queste relazioni sono state ricavate con riferimento a $Z = 1$. Per qualsiasi altro atomo, nella teoria generale, si ricava :

$$V_1(Z) = V_1(1) \cdot Z^{\frac{1}{3}} \quad ; \quad R_1(Z) = R_1(1) \cdot Z^{\frac{1}{3}}$$

e dunque l'indeterminazione risulta molto più elevata.

Essendo l'elettrone la particella in orbita in tutti gli atomi, sostituendo il valore della sua massa, si ottiene :

$$2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot V_1 \cdot R_1 =$$
$$= 6{,}6260755 \cdot 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{sec} = h = \textbf{costante di Planck}$$

In definitiva, si ha quindi :

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{2} \quad ; \quad \Delta R \cdot \Delta P \geq \frac{h}{2 \cdot \pi} \quad ; \quad \Delta V \cdot \Delta t \geq 2 \cdot \pi \cdot R_1$$

Di queste relazioni si fa un grande abuso, **interpretandole senza tener conto della loro origine**.

Si dice infatti che l'errore che si commette nel rilevare una misura sarà tanto

più elevato quanto minore è l'errore commesso nel rilievo dell'altra coniugata e **questo si ritiene valido senza limiti**.

Noi sappiamo però che questo non è vero, in quanto l'indeterminazione, che abbiamo calcolato, deriva unicamente dal fatto che non possiamo dire nulla sulle condizioni di esistenza della particella durante il passaggio da un'orbita circolare stabile all'altra.

Siamo costretti a misurare **solo le caratteristiche associate alla particella in equilibrio su queste due orbite stazionarie**.

La assoluta stabilità nel tempo degli atomi e dei nuclei ci assicura che le particelle in orbita non perdono energia.

Questo vuol dire che la loro velocità relativa rispetto allo spazio rotante nel quale si muovono è nulla.
L'orbita risulta dunque perfettamente circolare ed il moto stazionario.

Se l'orbita viene interpretata come **probabilità** di trovare la sfera planetaria in una certa posizione, " **si attribuisce alla particella un moto oscillatorio** " rispetto allo spazio rotante.

Questo crea però un **moto accelerato** con perdita di energia e conseguente instabilità del sistema, **contrario all'esperienza quotidiana**.

Questa ipotesi, che viene indicata come teoria degli orbitali, risulta anche in contraddizione con il fatto che la transizione di elettroni tra due livelli produce l'emissione di un fotone avente sempre la stessa frequenza caratteristica.

Secondo la distribuzione di energia che si associa ai due orbitali tra i quali si verifica la transizione, si dovrebbe avare invece una distribuzione continua di frequenze.

Sulle orbite circolari stazionarie sarà dunque possibile effettuare, nel tempo, le misure **indipendentemente una dall'altra**, senza alcun limite di principio sulla indeterminazione.
Durante la transizione si avrà invece :

1994

$$\Delta t \geq T_1 \quad ; \quad \Delta E \geq E_1 \quad ; \quad \Delta P \geq P_1 \quad ; \quad \Delta R \geq R_1 \quad ; \quad \Delta V \geq V_1$$

Le espressioni della indeterminazione vanno dunque scritte nella forma :

$$\Delta t \geq \frac{h}{2 \cdot E_1} \quad ; \quad \Delta E \geq \frac{h}{2 \cdot T_1}$$

$$\Delta R \geq \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot P_1} \quad ; \quad \Delta P \geq \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot R_1}$$

Ribadiamo che questi limiti della indeterminazione delle misure, si applicano solo alle transizioni all'interno degli atomi e sono indipendenti dagli strumenti utilizzati, **i cui errori sono stati assunti uguali a zero**.

Per $p \to \infty$ l'elettrone risulta indipendente dallo spazio rotante nucleare con velocità di equilibrio uguale a zero.

Se quindi abbiamo un elettrone libero, fermo nello spazio, possiamo dire che esso **si trova in perfetto equilibrio con il nucleo dal quale si è separato**.

Se ora lo acceleriamo, portandolo alla velocità V gli avremo fornito l'energia cinetica $\Delta E = E = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot V^2$

che risulta in eccesso rispetto al valore richiesto dalla condizione di equilibrio sull'**orbita di confine**, imposta dallo spazio nel quale si muove.

Se, a questo punto, con un mezzo qualsiasi, freniamo l'elettrone fino ad avere $V = 0$, al termine dell'operazione esso avrà trasferito al mezzo frenante tutta l'energia $\Delta E = E$ con una velocità media $V_m = \frac{V}{2}$.

Con questa operazione noi avremo " **forzato** " una transizione dell'elettrone

1995

dalla condizione iniziale con eccesso di energia ΔE alla condizione finale di equilibrio con $E_{eq} = \mathbf{0}$.

Se come mezzo frenante viene utilizzato uno spazio rotante protonico, **l'energia che esso assorbe crea una perturbazione che ha frequenza proporzionale all'energia trasferita**, **secondo la** :

$$\Delta E = E = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot V^2 = h \cdot \nu = \frac{h}{T}$$

Se il tempo entro il quale viene completato il trasferimento dell'energia ΔE , alla velocità media V_m , viene indicato con T_m , dalla teoria generale degli spazi rotanti, sappiamo che si ha : $T = 2 \cdot T_m$.

Dalla teoria generale sappiamo anche che la perturbazione che viene creata nello spazio, dall'eccesso di energia trasferito, si propaga con una lunghezza d'onda : $\lambda = V_m \cdot T$.

Con qualche semplice sostituzione, si ricava :

$$\lambda = V_m \cdot T = \frac{1}{2} \cdot V \cdot \frac{h}{\Delta E} = \frac{h}{m_e \cdot V} = \frac{h}{P_e}$$

L'espressione è nota come " **onda associata di De Broglie** ".

L'espressione è **assolutamente identica** a quella che descrive la lunghezza d'onda λ associata alla perturbazione che viene generata nello spazio da un fotone che trasferisce l'impulso P.

E' chiaro che, nel caso dell'elettrone, la propagazione dell'energia ΔE nello spazio si realizza attraverso lo spostamento della massa m_e alla velocità V , la quale **non è quindi una caratteristica propria dello spazio**, mentre per il fotone il trasferimento avviene alla velocità della luce C_l.

1996

Quello che, da questa lunga deviazione dal tema, risulta evidente è il fatto che "**l'onda associata di De Broglie**" **non accompagna la particella** m_e **per**

tutta la sua corsa, ma nasce durante la transizione, così come accade anche per le onde elettromagnetiche associate ai fotoni.

In entrambi i casi la perturbazione che viene indotta nello spazio presenta una componente continua ed una alternata, che mettono in evidenza una doppia natura del fenomeno che può comunque essere rivelato solo con l'interazione della particella con uno spazio rotante capace di creare con essa un sistema in equilibrio.

Da questo punto di vista è necessario rivedere le affermazioni che in genere vengono fatte circa l'onda associata a un protone o **alla materia ordinaria**.

Il protone può essere frenato solo dallo spazio rotante elettronico e quindi si potrà generare l'onda associata solo facendolo interagire con un elettrone.

La materia ordinaria, come per esempio un atomo di idrogeno, potrà formare un sistema equilibrato solo se entra in orbita in uno spazio rotante generato da altra materia ordinaria, per il quale la relazione che abbiamo ricavato non è utilizzabile.

Ritornando al nostro tema, possiamo concludere che, nel caso dell'elettrone libero, anche se quando viene fermato si crea una perturbazione avente una componente ondulatoria, non esiste nessuna quantizzazione del fenomeno e **non esiste quindi nessun limite concettuale nella determinazione delle misure e gli errori saranno solo quelli strumentali**.

Se, a questo punto, teniamo conto che gli strumenti reali non sono quelli che abbiamo finora considerato, alle "**indeterminazioni di principio**" dobbiamo aggiungere gli errori strumentali.

Naturalmente, per valutare il limite inferiore degli errori, consideriamo il caso in cui gli strumenti utilizzati siano i più opportuni.

Consideriamo che gli strumenti di misura più precisi, metro ed orologio, di cui possiamo disporre sono proprio quelli che sfruttano la costanza praticamente assoluta, nel tempo, delle transizioni che si verificano nelle strutture atomica, nucleare e subnucleare.

1997

La relazione che descrive queste radiazioni è del tipo :

$$\mathrm{E} = \mathrm{h} \cdot \nu = \frac{\mathrm{h}}{\mathbf{2} \cdot \mathrm{T}}$$

in cui T è la durata della transizione da un'orbita stabile all'altra.
La relazione si può anche scrivere :

$$\mathrm{E} \cdot \lambda = \mathrm{h} \cdot \mathrm{C} \quad ; \quad \mathrm{E} \cdot (\mathbf{2} \cdot \mathrm{T}) = \mathrm{h}$$

oppure : $$\lambda = \frac{\mathrm{h} \cdot \mathrm{C}}{\mathrm{E}} = \frac{\mathrm{h}}{P} \quad ; \quad (\mathbf{2} \cdot \mathrm{T}) = \frac{\mathrm{h}}{\mathrm{E}}$$

Per indurre, nel sistema in esame, la minore perturbazione possibile, siamo portati ad assumere un valore di energia E , associato alla radiazione, molto basso.

Questa scelta comporta però valori elevati di λ e T e, dato che questi valori rappresentano la minima indeterminazione che possiamo avere sul tempo e sulle distanze, dobbiamo accettare un compromesso.

Supponendo comunque di aver fatto la scelta più opportuna, avremo i valori minimi di indeterminazione :

$$\Delta \mathrm{X} = \lambda \quad ; \quad \Delta \mathrm{P} = P \quad ; \quad \Delta \mathrm{E} = \mathrm{E} \quad ; \quad \Delta \mathrm{t} = (\mathbf{2} \cdot \mathrm{T})$$

e risulta ancora :

$$\Delta \mathrm{X} \cdot \Delta \mathrm{P} = \mathrm{h} \quad ; \quad \Delta \mathrm{E} \cdot \Delta \mathrm{t} = \mathrm{h}$$

Questi risultati indicano che gli errori strumentali risultano dello stesso ordine di grandezza di quelli di principio.

Va ricordato che le indeterminazioni di principio non derivano da misurazioni, ma nascono per il fatto che, essendo impossibile misurare durante il periodo di transizione, siamo costretti a rilevare le misure nei due stati stazionari di partenza e di arrivo.

1998

A questa **indeterminazione** vanno aggiunti gli **errori strumentali** che siamo costretti a commettere durante i rilievi, che vengono effettuati comunque nello stato stazionario.

E' chiaro che, pur essendo "**indeterminazione** ed **errori strumentali**" valori che concorrono a definire lo stesso risultato, si tratta di due entità diverse dal punto di vista concettuale.

I primi sono legati unicamente al sistema in esame e non possono essere da noi scelti.
I secondi invece dipendono solo dagli strumenti che utilizziamo e quindi sono il risultato delle nostre scelte.

Trattandosi sempre di uno stato stazionario, non esiste il problema di dover effettuare i rilievi simultaneamente e dunque possiamo, per ciascuna misura, minimizzare l'errore (non l'indeterminazione che invece è fissa) scegliendo di volta in volta lo strumento più opportuno.

Con questo accorgimento, nello studio di particelle legate, nelle transizioni tra orbite stabili, gli errori strumentali possono essere resi trascurabili rispetto alle indeterminazioni proprie della transizione in esame.

Naturalmente questo non è possibile trattando particelle libere alle quali non sono legate indeterminazioni di principio.

In quest'ultimo caso si rende però necessario effettuare le misurazioni simultaneamente.

Prima di esemplificare quanto abbiamo detto con casi reali, vogliamo ancora analizzare alcune interpretazioni discutibili del principio di indeterminazione.

Secondo la teoria che abbiamo esposto, studiando, in una struttura atomica, una transizione tra due livelli, l'indeterminazione sui valori ad essa legati non sono delle grandezze variabili, ma valori ben definiti legati alla transizione in esame.

La meccanica quantistica, trascurando l'origine, **che noi abbiamo richiamato**, **utilizza il principio di indeterminazione nella forma** :

1999

$$\Delta \mathrm{R} \cdot \Delta P = \mathrm{h} \quad ; \quad \Delta \mathrm{E} \cdot \Delta \mathrm{t} = \mathrm{h}$$

dove alle indeterminazioni viene dato il significato di variabili continue, aventi intervallo di definizione $0 \rightarrow \infty$.

Con questa interpretazione, la " definizione classica di orbita " perde il suo significato per diventare il valore del raggio in corrispondenza del quale è massima la probabilità di trovare la particella.

Anche il "significato classico di particella" sull'orbita cede il passo alla probabilità di trovare la particella $(?)$ in un certo tratto dell'orbita.

La prima tesi approda alla **teoria degli orbitali** che risulta in contraddizione con molte osservazioni sperimentali, tra le quali certamente la più importante è la **incontestabile stabilità assoluta degli atomi nel tempo.**

Una importante e vistosa osservazione astronomica che contraddice questa tesi è la seguente.

Le masse inerziali dell'atomo di idrogeno e del Sole, determinate nelle stesse condizioni, dunque con lo stesso significato fisico, qualunque esso sia, sono note :

$$\mathbf{m_H} = \mathbf{1{,}67353404 \cdot 10^{-27}}\ K_g \quad ; \quad \mathbf{m_s} = \mathbf{1{,}989085 \cdot 10^{30}}\ K_g$$

Il numero di atomi di idrogeno presenti nel Sole risulta :

$$N_s = \frac{m_s}{m_H} = \mathbf{1{,}1885536 \cdot 10^{57}}\ \text{atomi}$$

Considerando il Sole come una sfera di idrogeno metallico il cui raggio vale : $r_s = \mathbf{695843}\ K_m$, per il raggio dell'atomo di idrogeno, si ottiene il valore :

$$r_H = \frac{r_S}{\left(\frac{6}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{m_s}{m_H}\right)^{\frac{1}{3}}} = \mathbf{5{,}2946577 \cdot 10^{-11}}\ \text{m}$$

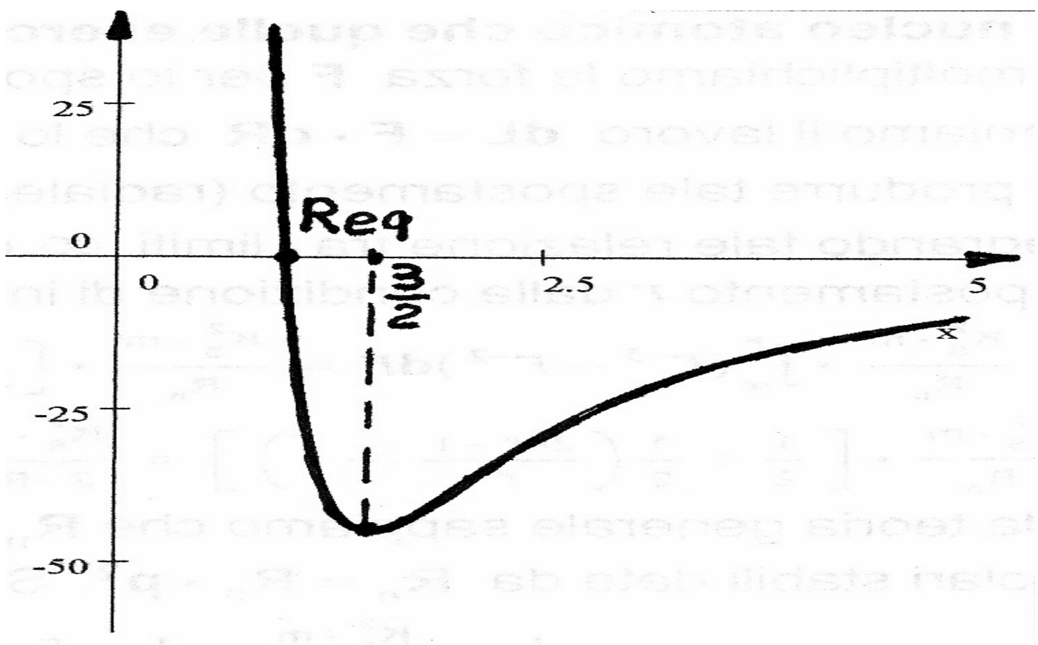
2000

tenendo conto della sfera planetaria dell'elettrone, il raggio dell'orbita sulla quale rivoluisce l'elettrone, risulta :

$$\mathbf{R_{11e}} = \frac{r_H}{\left(\mathbf{1} + \frac{m_e}{m_p}\right)} = \mathbf{5{,}2917757 \cdot 10^{-11}}\ \mathrm{m}$$

Questo valore coincide perfettamente con il raggio dell'orbita fondamentale dello spazio rotante protonico, **senza alcun aumento**, **come suggerirebbe la teoria degli orbitali**.

Infatti, se si riporta su assi cartesiani l'accelerazione radiale, che agisce sullo elettrone in orbita, in funzione della distanza dal centro del protone, si ottiene un andamento che presenta una forte dissimmetria rispetto alla posizione di equilibrio, come è indicato in figura.

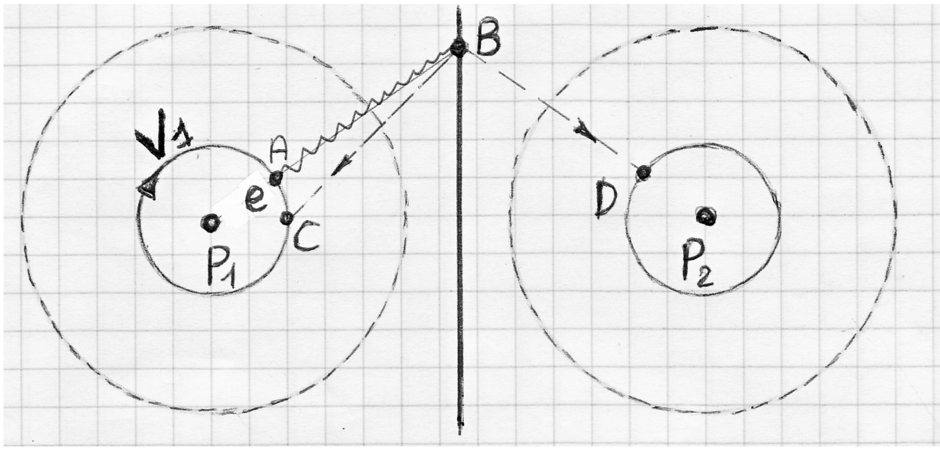


Conseguenza di questa dissimmetria è una maggiore probabilità di trovare l'elettrone spostato verso l'esterno piuttosto che verso l'interno dell'atomo. Essendo molto elevato il numero di atomi presenti nel Sole, qualsiasi valore della deviazione, anche molto piccolo, dall'orbita fondamentale, se è presente viene messo in evidenza.

2001

Il valore del raggio che abbiamo ricavato mette in evidenza che tutto questo non si verifica.

Un’altra evidenza sperimentale in contraddizione con la teoria degli orbitali è la unicità della frequenza della radiazione emessa in corrispondenza di una qualsiasi transizione di qualsiasi atomo.



Con riferimento alla figura, osservando la stabilità degli atomi, diciamo che, in quello di sinistra, l’elettrone **e** è in equilibrio sull’orbita circolare stabile dello spazio rotante generato dal protone $\mathbf{P_1}$, con le caratteristiche orbitali definite perfettamente e **costanti nel tempo**, anche se possiamo non conoscere con precisione il loro valore.

Questo vuol dire che riteniamo verificati, **in ogni momento**, **i principi di conservazione**, senza verificarlo.

Senza dimostrarlo, **affermiamo quindi che l’elettrone**, **per passare dal punto A al punto C deve percorrere il tratto di circonferenza**.

Anche se apparentemente arbitraria, questa affermazione è avallata dal fatto che non conosciamo un solo caso in cui i principi di conservazione non siano stati verificati.

Secondo la teoria degli orbitali, negli atomi non è possibile distinguere una condizione di equilibrio stazionario, su orbite circolari stabili.

2002

Questo vuol dire che si verificano continuamente transizioni **durante le quali** i principi di conservazione potrebbero essere violati.

Anzi, secondo tale teoria, le transizioni spontanee negli atomi avvengono con tale frequenza da impedirci di definire con precisione la traiettoria, che viene così indicata solo in termini probabilistici.
In definitiva, si presenta la seguente situazione.

Sperimentalmente non è mai stato possibile cogliere una particella durante la fase di transizione per verificare le sue condizioni di moto.

I principi di conservazione, vengono sempre verificati in qualsiasi circostanza ed in qualsiasi campo e si ritiene che vengano violati nel **solo caso che non riusciamo a studiare**.

Un pensiero certamente meno discutibile può essere quello di ritenere che i principi di conservazione siano verificati anche **quando noi non riusciamo a dimostrarlo**.

Riferendoci sempre alla figura, secondo la teoria degli orbitali, si ipotizza una probabilità finita che l'elettrone, per passare dal punto **A** al punto **C** " **chieda in** prestito **al protone** " una quantità di energia pari al valore di estrazione per poter arrivare nel punto **B**, che vale :

$$\Delta E_e = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot V_1^2.$$

Il protone P_1 "**concede il prestito**" con la condizione che l'energia gli venga restituita " **prima che esso possa accorgersi dell'ammanco** ".

In pratica l'elettrone chiede di **non rispettare** i principi di conservazione per un tempo tanto piccolo da soddisfare il principio di indeterminazione.

A parte la verifica dei meccanismi reali attraverso i quali queste operazioni si possono realizzare, quando l'elettrone giunge nel punto **B** con velocità nulla, si trova in perfetto equilibrio e presenta quindi una elevata probabilità di non ritornare a saldare il debito.

2003

Inoltre, nel punto **B** l'elettrone si trova con due protoni, $\mathbf{P_1}$ e $\mathbf{P_2}$ in posizione assolutamente simmetrica e non ha nessuna giustificazione teorica per dover tornare nel punto **C** e nel 50% dei casi si dirige nel punto **D**.

Tutto questo risulta in contraddizione con la assoluta stabilità degli atomi. Inoltre, queste continue transizioni danno origine ad un'accelerazione radiale con perdita di energia da parte della particella che dovrebbe così cadere nel nucleo, fatto che **non è mai stato verificato**.

Un altro uso molto discutibile del principio di indeterminazione è quello che lo chiama in causa per poter generare particelle elementari dal nulla e dare così origine alla materia presente nell'universo.

Secondo molti studiosi, lo "**spazio vuoto**" nel quale si evolve l'universo, non è poi così vuoto come finora è stato immaginato.

Esso va pensato, in realtà, come un oceano di particelle subatomiche libere, le quali interagiscono tra loro, creando una continua e casuale fluttuazione di energia. Vediamo il discorso con qualche dettaglio in più.

Fissato il valore E_s dell'energia richiesta per la sintesi della coppia formata da particella e antiparticella, se in un punto dello spazio la fluttuazione supera il valore E_s, si genera una coppia che, in un tempo molto breve, e comunque **tale da soddisfare il principio di indeterminazione**, restituisce allo spazio l'energia E_s attraverso il processo di annichilazione.

Facciamo notare che questi processi s'intendono realizzati in uno spazio che viene indicato come " **vuoto quantistico** ", intendendo con questo lo spazio nel quale, **non è presente materia organizzata** (alla quale la definizione di energia è riferita).

Non sono dunque presenti spazi rotanti con orbite quantizzate tra le quali si possono verificare transizioni di particelle.

Non si potrebbe quindi avere emissione di radiazioni. Esse vengono tuttavia rese possibili dicendo che le particelle libere, vaganti in questo oceano vuoto, "**non sono reali**", ma "**virtuali**", in quanto hanno una vita tanto breve da non essere rivelabili.

2004

In base al principio delle osservabili, esse non esistono e, in questo senso, lo spazio rimane vuoto.

Dato che i processi di **generazione** e **annichilazione** non sono simmetrici, uno dei due prevale e si genera così materia dallo spazio vuoto.

Analogo discorso viene fatto per l'evaporazione dei buchi neri.

Le osservazioni che si possono fare a queste tesi sono davvero molte. Noi ci limitiamo ad alcune tra le più significative.

La teoria degli spazi rotanti mette in evidenza come i processi di sintesi e di annichilazione siano casi limiti di transizione tra livelli stazionari e dunque **si realizzano solo all'interno di uno spazio rotante quantizzato** e non uno qualsiasi, ma quello capace di trattenere sulle orbite stazionarie le particelle che vengono sintetizzate.

Questa circostanza, **tra l'altro**, **è ampiamente nota e verificata in tutti gli istituti di ricerca di fisica nucleare**.

Le particelle libere, come abbiamo visto, non sono soggette a quantizzazione delle caratteristiche, quindi i loro valori non sono soggetti a indeterminazionel di principio. la conoscenza del loro valore è dunque limitato unicamente dagli errori strumentali.

Purtroppo, queste particelle non sono in uno stato stazionario, ma in continua evoluzione e quindi, per definire il loro stato, siamo costretti a rilevare tutte le caratteristiche **simultaneamente**, con un unico strumento.

Per la scelta dello strumento, dobbiamo stabilire, in rapporto al problema che si sta trattando, il livello di perturbazione $\Delta\%$ del sistema che viene ritenuto accettabile.
Sostituendo nell'espressione degli errori abbiamo quindi :

$$\Delta t \simeq \frac{h}{2 \cdot \frac{\Delta\%}{100} \cdot E_s}$$

2005

Nel nostro ragionamento, la vita media delle particelle generate deve essere minore della risoluzione dello strumento di misura, in modo che sia impedita la loro rivelazione.

Se come strumento utilizziamo un oscillatore, sarà dunque necessario che la frequenza ν della radiazione emessa soddisfi la relazione :

$$\nu = \frac{1}{T} \leq \frac{1}{2 \cdot T_m}$$

E' chiaro che le particelle generate potranno essere considerate " **virtuali** " solo se riescono a sfuggire al controllo degli strumenti teorici più precisi che riusciamo ad immaginare.

La risoluzione più elevata che possiamo concepire è quella che si ottiene con la radiazione che viene emessa dal processo di annichilazione della coppia **protone** – **antiprotone** :

$$\Delta t = T = \frac{h}{2 \cdot E_{sp}} = \frac{h}{2 \cdot m_p \cdot C_l^2} = 2,20387 \cdot 10^{-24} \text{ sec}$$

Questo valore rappresenta l'intervallo di tempo minimo che si può concepire, **con un significato fisico**.

Questa radiazione perturba il sistema che l'assorbe con un valore di energia

$$\Delta E = 2 \cdot m_p \cdot C_l^2 = 1876,5 \text{ MeV}$$

sarà dunque utilizzabile con successo solo nei processi che mettono in gioco una energia $E_s >> 1876,5$ MeV.

Se consideriamo la sintesi della coppia elettrone – positrone, dovrà essere : $E_s = 1,2$ MeV .
Per evitare che lo strumento stesso dia un contributo significativo al processo di generazione, assumiamo $\Delta\% = 1$.

2006

L'oscillatore dovrà avere quindi una frequenza :

$$\nu \leq \frac{\frac{\Delta\%}{100} \cdot E_s}{h} = 2,9016 \cdot 10^{18}\ H_z$$

Per non essere rivelate, le particelle dovranno avere una vita media minore di

$$T_m \leq \Delta T = \frac{1}{2 \cdot \nu} = 1,7232 \cdot 10^{-19}\ sec$$

decisamente maggiore del minimo valore misurabile con altri strumenti.

Nell'analisi che abbiamo fatto, è certamente singolare il fatto che si consideri fisicamente significativo, dunque definibile , solo ciò che si riesce a misurare, anche se solo con strumenti ideali, e successivamente, s'invochi l' impotenza degli stessi strumenti per **imporre l'esistenza di particelle non rilevabili**.

Concludiamo queste brevi note riassumendo e precisando quello che è stato finora detto, al fine di eliminare l'alone di mistero che circonda il principio di indeterminazione.
Abbiamo visto che il problema delle indeterminazioni nasce quando si vuole conoscere lo stato di moto di una massa nello spazio.

Vale comunque una regola generale, non legata al problema che si analizza :

Il principio di indeterminazione è verificato sempre, **in qualsiasi caso**, solo **quando si utilizza**, **come strumento per il rilievo delle misure una**, **radiazione elettromagnetica**.

Si possono presentare diversi casi, ciascuno dei quali richiede un approccio diverso, per il rilievo delle caratteristiche.

1 – massa in equilibrio stazionario :
Le misurazioni si possono effettuare in **tempi diversi** con **strumenti diversi**, che vengono scelti opportunamente, in rapporto al problema in esame.
In questo caso gli errori sono solo strumentali e senza particolari vincoli.

2007

2 – massa in transizione tra due stati stazionari quantizzati :
Questa situazione si verifica solo nelle particelle in orbita nei sistemi atomici e subatomici.

La nostra incapacità di cogliere la particella durante le transizioni ci consente di effettuare i rilievi delle caratteristiche solo negli stati stazionari di partenza e di arrivo, come è indicato nel caso $\left(\mathbf{1}\text{-}\right)$.

La differenza tra i valori rilevati costituisce l'incertezza, **che verifica il principio di indeterminazione**.

3 – massa in evoluzione libera nello spazio :
Se l'evoluzione è lenta, come generalmente accade per le masse ordinarie, è possibile trattare il problema come **stato quasi stazionario.**

Se invece l'evoluzione è rapida, si impone il problema di dover effettuare il rilievo delle misure delle diverse grandezze " simultaneamente e con strumenti poco invasivi ".

Si tenga presente che, per definire le condizioni di un sistema in evoluzione molto rapida è più importante la simultaneità dei rilievi della precisione delle singole misure.

La certezza di effettuare rilievi simultanei si potrà avere solo utilizzando un solo evento con un solo strumento per tutte le grandezze da misurare.

Noi conosciamo un solo strumento capace di essere nello stesso tempo un buon metro, un buon orologio, una buona bilancia :
la radiazione elettromagnetica, **la quale presenta caratteristiche aventi una grande stabilità e legate dalle relazioni che caratterizzano i livelli tra i quali avviene la transizione che la genera**.

$$E \bullet \left(\mathbf{2} \cdot \mathrm{T}\right) = \mathrm{M_1} \cdot \mathrm{p} \quad : \quad P \bullet \mathrm{R} = \frac{\mathbf{M_1}}{\mathbf{2} \cdot \pi} \cdot \mathrm{p}$$

da queste relazioni si ricavano le seguenti.

2008

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{2} \quad ; \quad \Delta R \cdot \Delta P \geq \frac{h}{2 \cdot \pi} \quad ; \quad \Delta V \cdot \Delta t \geq 2 \cdot \pi \cdot R_1$$

Si noti che l'evento che viene utilizzato, in tutti i problemi, è sempre lo stesso, l'effetto Compton.

Si provoca una interazione della radiazione scelta con la particella in esame, si impongono i principi di conservazione e, con il calcolo, si ricavano tutte le caratteristiche della particella iniziale.

2009