

# **IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA E IL SUO RUOLO NELLO SVILUPPO DELLA FISICA**

De Scisciolo Francesca

TFA A049

# Cos'è il Principio di Conservazione dell'Energia (PCE)?

Ascoltiamo Richard Feynman.

“Esiste una proprietà, o se preferite una *legge*, che governa tutti i fenomeni naturali conosciuti fino ad oggi. Non si conosce eccezione a questa legge, essa è esatta nei limiti delle nostre conoscenze. La legge è chiamata *conservazione dell'energia*. Essa stabilisce che vi è una certa quantità, che chiamiamo energia, che non cambia nei molteplici mutamenti subiti dalla natura. Il concetto è astratto, poiché si tratta di un principio matematico; esso afferma che esiste una quantità numerica che non cambia qualsiasi cosa accada. Non è la descrizione di un meccanismo o di un fenomeno concreto, è soltanto il fatto singolare di poter calcolare un numero, e dopo aver osservato i mutamenti capricciosi della natura, ricalcolarlo ottenendo sempre lo stesso risultato. (Qualcosa di simile al movimento di un alfiere sui quadrati neri della scacchiera, qualunque sia il numero delle mosse – ignoriamo i dettagli – esso si trova sempre sul nero. È una legge di questo tipo).”

“Quando calcoliamo l'energia di un sistema, talvolta una parte di essa abbandona il sistema e talvolta, invece, vi si introduce. Per verificare la conservazione dell'energia dobbiamo fare attenzione a non averne tolta né introdotta. L'energia ha un gran numero di forme diverse e vi è una formula per ciascuna di esse. Abbiamo: l'energia gravitazionale, l'energia termica, l'energia cinetica, l'energia elastica, l'energia elettrica, l'energia chimica, l'energia radiante, l'energia nucleare e l'energia di massa. Se sommiamo le formule per ciascuno di questi contributi, vedremo che il totale non cambia eccetto che per l'energia che entra e che esce.

È importante tener presente che nella fisica odierna, noi non abbiamo cognizione di ciò che l'energia è. Non abbiamo un modello che esprima l'energia come somma di termini definiti. Tuttavia vi sono formule per calcolare alcune quantità numeriche e se le sommiamo tutte otterremo sempre lo stesso numero. Si tratta di un'astrazione in quanto non ci insegna il meccanismo o i *motivi* delle varie formule”.

Nelle nostre conoscenze attuali, dunque, il PCE non conosce eccezioni.

Lo sviluppo delle teorie fisiche moderne non ha limitato il suo ambito di validità, come invece è avvenuto per gran parte della Fisica classica.

Non esiste però una prova vincolante “a priori” di tale principio, quindi non si può escludere la possibilità che esso potrà essere in futuro condizionato empiricamente entro un certo ambito di validità.

Tuttavia la fiducia in tale principio ha giocato un ruolo importante nello sviluppo concettuale della Fisica.

I casi della sua apparente violazione hanno permesso da un lato di generalizzare il principio stesso, dall'altro di migliorare le teorie e quindi anche l'accordo con gli esperimenti.

La validità di questo modo di procedere è evidenziata da Feynman quando parla della necessità di “scommettere” su alcune leggi per poter fare previsioni ed estendere il campo di validità delle teorie fisiche.

Questa presentazione si propone di fare una breve panoramica sul ruolo che ha giocato il PCE nella **Fisica Classica** (meccanica, termodinamica, elettrodinamica), nella teoria della **Relatività** e nella **Meccanica Quantistica**.

Fin dall'antichità, il principio guida delle scienze è stato la ricerca di elementi di costanza in un mondo caratterizzato dal mutamento, nel tentativo di trovare un ordine al caos apparente.

→ La ricerca di regolarità e di leggi conduce a principi di conservazione.

**"Niente viene dal niente e niente può diventare niente"**

(Democrito, V secolo a.C.)

**"... Altrimenti tutto può venire fuori da tutto"**

(Epicuro, III secolo a.C.)

**"Nulla si crea dal nulla... nulla si distrugge"**

(Lucrezio, *De Rerum Natura*, I secolo a.C.)

**"Né forza alcuna potrebbe alterar mai l'universo ché non v'è luogo né dove possa ritrarsi una parte della materia dal cosmo, né donde sorgere e irrompere possa nel cosmo una forza nuova, e mutarne l'essenza tutta, e sconvolgerne i moti"** (Lucrezio)

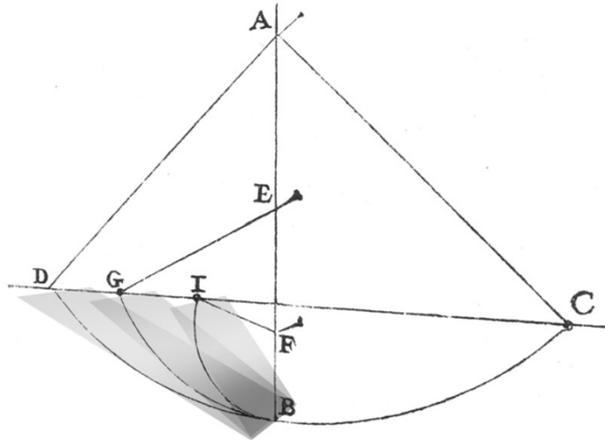
→ C'è già l'idea di conservazione della materia e della "forza".

Il principio di conservazione della massa viene dimostrato per la prima volta empiricamente da **Lavoisier** (1743-1794).

Lavoisier conduce alcuni tra i primi esperimenti quantitativi in Chimica.

Dimostra che, in una reazione chimica, la quantità di materia è la stessa all'inizio e alla fine della reazione.

**Galileo** (1564-1642) studia la caduta di un corpo vincolata su un piano inclinato e il moto di un corpo oscillante (pendolo semplice).



Sposta l'attenzione dalla traiettoria effettiva del corpo all'**altezza** di salita e di discesa.

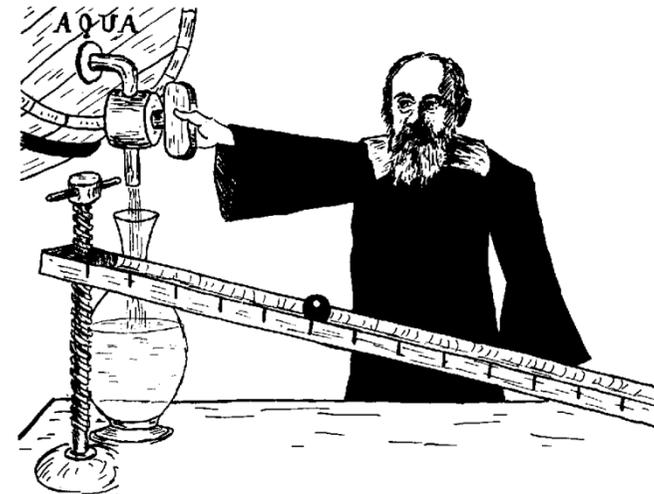
**"Un corpo pesante tende verso il basso con tanta forza quanta ne occorrerebbe per trascinarlo verso l'alto".**

*(De Motu, 1589-1592)*

**"Come chiaramente si vede in un pendolo assai grave, che slargato cinquanta o sessanta gradi dal perpendicolo, guadagna quella velocità e virtù che basta precisamente a sospingerlo ad altrettanta elevazione, trattone però quel poco che gli vien tolto dall'impedimento dell'aria".**

**"I gradi di velocità, acquistati da un medesimo mobile su piani diversamente inclinati, sono uguali allorché sono uguali le elevazioni di quei medesimi piani".**

*(Discorsi, 1638)*

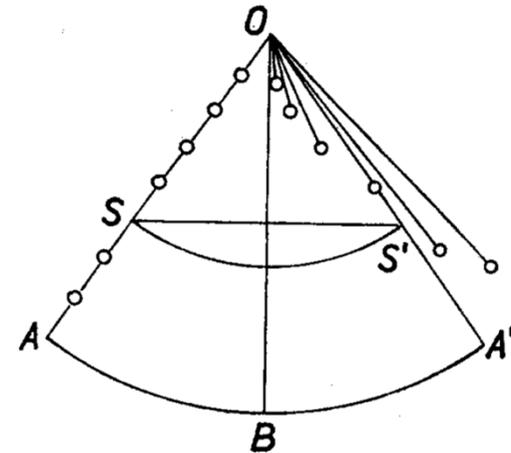


Huygens (1629-1695) generalizza l'approccio di Galileo.

Prende in considerazione non più un corpo singolo, ma un insieme di corpi connessi. Concentra quindi il suo interesse sul loro centro di gravità.

" Se quanti si vogliano oggetti pesanti, in virtù della loro gravità, cominciassero a muoversi, il centro di gravità da essi composto non potrebbe salire più in alto di quanto si trovava all'inizio del moto".

"Se vengono rimossi l'aria o qualsiasi altro impedimento, il centro di gravità di un pendolo che oscilla descrive archi uguali nello scendere e nel salire".



"Assumiamo che un pendolo sia composto da più corpi pesanti e, partendo dalla quiete, abbia effettuato una parte qualsiasi dell'oscillazione completa, e successivamente si verifichi che i suoi singoli pesi, abbandonato il vincolo comune, invertano verso l'alto le velocità acquisite e si sollevino tanto in alto quanto possono salire.

Concesso ciò, il centro di gravità composto da tutti sarà ritornato alla medesima altezza in cui si trovava all'inizio dell'oscillazione".

(*Orologium Oscillatorium*, 1673)

Dunque la rimozione dei vincoli tra i corpi o parti dei corpi non influenza l'equivalenza tra l'altezza di salita e di discesa.

Applicando la legge di caduta di Galileo, Huygens trova infine che la somma dei prodotti delle masse per i quadrati delle velocità finali dei corpi è caratteristica della posizione del sistema (la sua altezza iniziale) e non dipende dalle traiettorie eseguite per raggiungere quella posizione.

Individua così una significativa quantità fisica, chiamata "***vis viva***", che è costante per una posizione data.

→ Ritornando alla posizione iniziale, il valore della *vis viva* non muta.

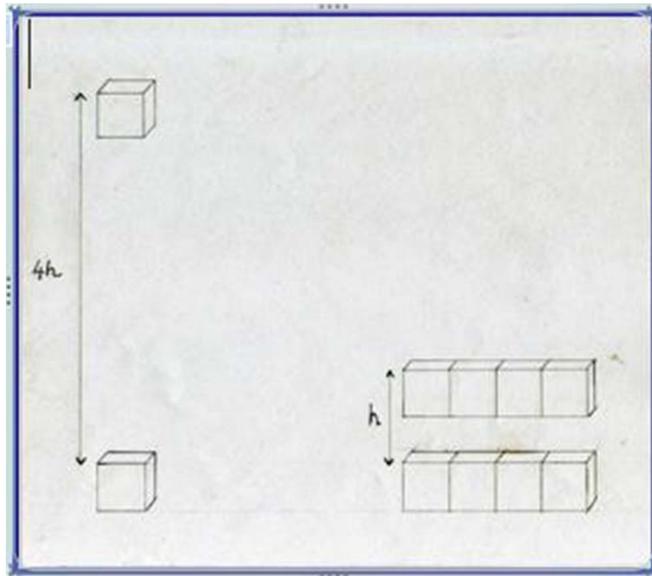
**Leibniz** (1646-1716) si riallaccia al lavoro di Huygens.

Critica il punto di vista di **Cartesio** (1596-1650), secondo il quale la *forza* contenuta in un corpo in movimento è data dal prodotto della sua massa per la sua velocità.

Lebniz invece ipotizza:

due corpi in caduta libera hanno la stessa *forza* nel toccare il suolo, se portare i due corpi alla rispettiva altezza iniziale comporta lo stesso lavoro.

Per Leibniz, in base alla legge di caduta di Galileo, se un corpo ha velocità di caduta doppia rispetto al secondo, allora il secondo corpo, per avere la stessa *forza* del primo, deve avere massa quadrupla rispetto ad esso.



**La “forza” che può innalzare quattro libbre all’altezza di un piede è la stessa che può innalzare una libbra di quattro piedi.**

**Un corpo che cade da una certa altezza acquista una forza motrice tale da permettergli di risalire alla stessa altezza.**

Quella che Leibniz chiama *forza motrice* oggi viene chiamata *energia*.

Il presupposto di Leibniz, che la *forza* sia pari al lavoro che deve essere eseguito per la sua produzione, racchiude l'idea di conservazione.

La *forza* non è percepibile in modo immediato, ma si nasconde nel corpo sollevato sotto forma di lavoro compiuto (*forza latente*, in seguito verrà chiamata energia potenziale).

Nella caduta il corpo trasforma energia potenziale in energia cinetica e, nella risalita in seguito a urto elastico, l'energia cinetica si trasforma di nuovo in energia potenziale.

**Leibniz** dà quindi una prima formulazione del **principio di conservazione dell'energia meccanica**.

Sotto determinate condizioni delle forze agenti (ad esempio l'assenza di attrito) la somma dell'energia cinetica e di quella potenziale è costante.

"Egli (Dio) non ha, così sembra, una provvidenza sufficiente a farne un moto perpetuo. Anzi, la macchina dell'azione di Dio è così imperfetta, secondo questi gentiluomini, che egli è obbligato a ripulirla, di volta in volta, ricorrendo a interventi straordinari, e persino a ripararla, come un orologiaio ripara il proprio lavoro; e si tratta di un operaio tanto meno abile quanto più spesso è obbligato a riparare il proprio lavoro e rimetterlo in condizione di ben funzionare. Secondo la mia opinione, la stessa forza e lo stesso vigore restano sempre nel mondo, e si limitano a passare da una parte della materia all'altra, conformemente alle leggi della natura"

*(Leibniz).*

Questa equivalenza tra energia e lavoro porta alla formulazione del **Primo principio della Termodinamica** ( detto anche appunto principio di conservazione dell'energia), ad opera di **Mayer** (1842) e **Helmholtz** (1847).

Il calcolo dell'energia di un sistema fisico viene a coincidere con il calcolo del lavoro che questo sistema avrebbe potuto compiere in una trasformazione.

Il calore viene riconosciuto come forma di energia (**Mayer** ne calcola per primo l'equivalente del lavoro) e viene definitivamente abbandonata la termologia materiale, che invece lo considerava come materia che può generarsi o svanire.

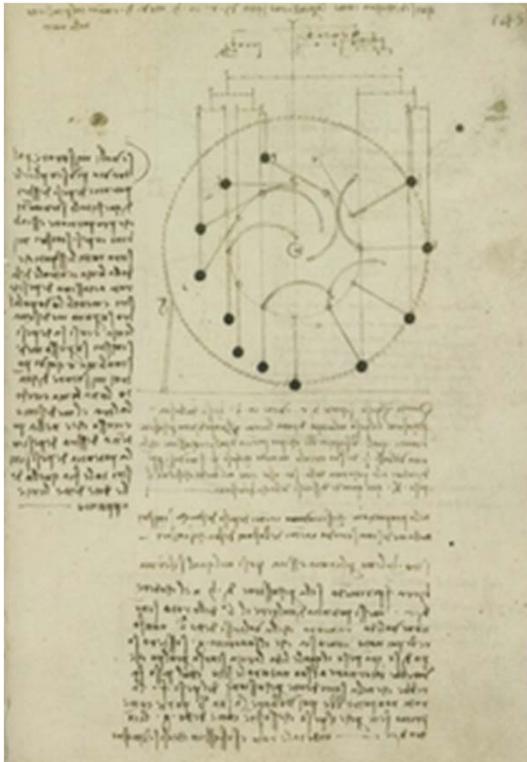
Così, il PCE afferma, per esempio, che l'energia meccanica perduta in una trasformazione a causa dell'attrito, si ritrova come calore.

In generale, l'equivalente del lavoro necessario per passare da uno stato A a uno stato B dipende solo dallo stato iniziale e da quello finale, ma non dal modo in cui è avvenuta la trasformazione.

Questo principio conferma l'impossibilità del *perpetuum mobile*, ossia di una macchina ad azione periodica, che svolga lavoro in modo continuativo senza nessuna variazione dello stato della macchina e del suo ambiente.

*Infatti, se l'emissione di energia nel passaggio da uno stato di un sistema ad un altro dipendesse dal modo in cui il passaggio è messo in atto, allora si potrebbe scegliere in tale passaggio la via che comporta il maggior dispendio di energia, e per il ritorno del sistema allo stato originario quella più economica, e con ciò nel complesso verrebbe prodotta energia senza che lo stato finale del sistema si distingua da quello iniziale; se si ripetesse il processo regolarmente, allora si otterrebbe la macchina desiderata.*

Già **Leonardo da Vinci** (1452-1519) era convinto dell'impossibilità del perpetuum mobile.



"Qualunque peso possa essere attaccato alla ruota, peso che sia la causa del movimento di questa ruota, senza alcun dubbio il centro di tale peso rimarrà al di sotto del centro dell'asse (della ruota)".

"E nessuno strumento che gira intorno al suo asse può essere costruito dall'ingegno umano che sia capace di evitare questo risultato".

"O speculatori sul moto perpetuo, quante vane chimere avete creato in questa ricerca? Andate e prendete il vostro posto tra i cercatori d'oro".

Un'autorevole affermazione dell'impossibilità di costruire un *perpetuum mobile* si ebbe nel **1775** da parte della **Academie Royale des Sciences** di Parigi; essa non si basa su una dimostrazione teorica ma assume semplicemente uno stato di fatto.

*“L'Accademia ha approvato quest'anno di non esaminare alcuna soluzione di problemi sui seguenti argomenti: La duplicazione del cubo, la trisezione dell'angolo, la quadratura del cerchio o **alcuna macchina per dimostrare il moto perpetuo**. Consideriamo doveroso da parte nostra spiegare i motivi che ci hanno condotto a questa determinazione.*

*La costruzione di una macchina del moto perpetuo è assolutamente impossibile. [...].Se si riuscissero a eliminare l'attrito e la resistenza, il primo moto impartito a un corpo continuerebbe sempre; esso non agirebbe però in relazione ad altri corpi e l'unico moto perpetuo possibile in quest'ipotesi (che non potrebbe esistere in natura) sarebbe assolutamente inutile e non potrebbe quindi realizzare l'obiettivo che i costruttori di queste macchine del moto perpetuo si propongono. L'inconveniente di queste ricerche è di essere enormemente dispendiose, tanto che esse hanno rovinato più di una famiglia; spesso la meccanica che avrebbe potuto rendere grandi servizi al pubblico, ne ha sperperato i mezzi, il tempo e la genialità.”*

# Il PCE e l'elettrodinamica

L'elettrodinamica viene sviluppata come teoria di campo, la cui variazione è regolata dalle equazioni di **Maxwell** (1831-1879).

→ L'energia del campo si diffonde nello spazio, quindi si introduce il concetto di **densità spaziale dell'energia**.

→ **Il PCE si esprime come segue:**

Se si considera una determinata regione spaziale chiusa attraverso i cui confini l'energia fluisce, allora la variazione temporale dell'integrale della densità dell'energia all'interno della regione deve essere uguale all'integrale dell'afflusso di energia attraverso la superficie.

L'energia viene quindi tratta come i *fluidi* nell'idrodinamica.

*Quando, con Einstein, si abbandona l'ipotesi dell'etere, e quindi di un modello meccanico dell'elettrodinamica, si capisce senza ombra di dubbio l'indipendenza del PCE da una concezione meccanica della natura.*

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Teorema di Gauss}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Leggi di Laplace}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Legge Induzione di Faraday}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{Equazione di continuità}$$

# Il PCE e la Teoria della Relatività ristretta

Fino all'avvento della Teoria della Relatività ristretta (**Einstein**, 1905), **massa** ed **energia** appaiono come due vere e proprie realtà del mondo fisico.

La Teoria della Relatività presuppone (ed è stata confermata sperimentalmente) **l'equivalenza** fra **massa** ed **energia**: ad ogni quantità di energia è legata una quantità proporzionale di massa.

- Una particella elementare che viaggia a velocità paragonabile a quella della luce oppone ad ogni ulteriore accelerazione una resistenza che aumenta con la velocità: la sua massa è cresciuta di una quantità che deriva dalla sua energia cinetica.
- Se si uniscono protoni e neutroni a formare il nucleo di un atomo, viene liberata una quantità di energia che sarà tanto maggiore quanto più stabile sarà il legame fra le particelle nel nucleo. Nella stessa misura in cui l'energia viene sprigionata, si assiste ad una perdita di massa nel nucleo.

Si può accettare il principio di conservazione dell'energia solo se la massa ponderabile, la cosiddetta “massa a riposo”, viene assimilata nel bilancio energetico.

→ I principi di conservazione di massa ed energia sono completamente **fusi**.

L'energia e l'impulso, che in Fisica classica erano uno scalare e un vettore, diventano le componenti (rispettivamente temporale e spaziali) del **quadrivettore energia-impulso** nello spazio di **Minkowski**.

$$(E, \vec{p}) \quad E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

- Le componenti di questo quadrivettore sono diverse in ogni sistema di coordinate.
- Non ha senso interrogarsi sulla “vera energia” di un corpo.
- **In ogni sistema di coordinate, continua a valere il PCE.**
- Varia soltanto il valore numerico che attribuiamo all'energia quando cambiamo sistema di coordinate, cioè punto di vista.

# Il PCE e la Meccanica Quantistica

Secondo la Meccanica Quantistica, ogni particella (per esempio un elettrone) può, in determinate circostanze, apparire come un'onda, e ogni processo ondulatorio come azione di una particella localizzata.

$$E = h\nu \quad (\text{Planck, 1900})$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{De Broglie, 1924})$$

$E, p$  *Energia e impulso della particella*

$\nu, \lambda$  *frequenza e lunghezza d'onda dell'onda associata*

Ad ogni particella è associata una funzione d'onda, la cui intensità in una data posizione determina la probabilità di trovare la particella in quella posizione.

**Bohr, Kramers e Slater** propongono una teoria (1924) per la quale il principio di conservazione dell'energia vale solo su basi statistiche e non nei singoli casi.

Partono da due presupposti:

- 1) L'intensità dell'onda indica la probabilità della presenza di una particella;
- 2) La comparsa di una particella in una determinata posizione non modifica la forma d'onda associata ad altre posizioni.

Consideriamo allora un treno d'onde generato dall'emissione da parte di un atomo di un solo quanto di energia  $h\nu$ . Dividiamo lo spazio in cui l'onda si trova in due parti uguali e cerchiamo il quanto in una e poi nell'altra parte.

La probabilità di trovare il quanto in ciascuna parte è non nulla. Ma l'aver trovato un quanto nella prima parte non influenza la probabilità di trovarlo nella seconda (per via del secondo presupposto).

Ci sono quindi quattro casi possibili.

- 1) Il quanto non viene trovato in nessuna delle due sezioni di spazio.
- 2) Il quanto viene trovato nella prima sezione e non nella seconda.
- 3) Il quanto viene trovato nella seconda sezione e non nella prima.
- 4) Viene trovato un quanto in entrambe le sezioni.

→ Il contenuto di energia dell'onda nel secondo e terzo caso è  $h\nu$  (l'energia si è conservata), nel primo zero e nel quarto  $2h\nu$  (l'energia non si è conservata: è sparita oppure raddoppiata).

*CONCLUSIONE: Il PCE non vale per un caso singolo.*

Esperimenti successivi (**Bothe, Compton, Simon**) dimostrano però che il PCE vale anche nei casi individuali.

→ Decade il secondo presupposto di Bohr, Kramers e Slater.

Se il quanto viene trovato nella prima sezione di spazio, la probabilità di trovarlo nella seconda scende a zero → l'intensità dell'onda in tale sezione si annulla.

Se il quanto non viene trovato nella prima sezione di spazio, la probabilità di trovarlo nella seconda sale a 1 → l'intensità dell'onda in tale sezione raddoppia.

Se la posizione di una particella viene determinata in modo molto preciso, l'intensità dell'onda ad essa associata, all'infuori del punto osservato, vale 0.

→ L'onda non ha quindi né frequenza né lunghezza d'onda definite, quindi ad essa non corrispondono valori definiti di energia ed impulso.

$$\Delta x \times \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \times \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

### Principio di indeterminazione di **Heisenberg** (1927)

La precisa conoscenza dell'impulso esclude la possibilità della precisa conoscenza della posizione.

La precisa conoscenza dell'energia esclude la possibilità della determinazione precisa della collocazione temporale dell'evento.

All'energia di una particella corrisponde la frequenza di un'onda. Tuttavia, per poter attribuire ad un'onda una determinata frequenza, si deve far oscillare l'onda abbastanza a lungo

→ In caso contrario, non si tratta di un'onda periodica, ma di un impulso singolo a cui non è attribuibile nessuna frequenza.

→ Quindi anche l'energia di una particella non è definita in un singolo istante, ma in un certo **intervallo di tempo**.

**Se si misura l'energia in un intervallo di tempo più breve, si ottiene un valore indeterminato.**

Questo spiega **l'effetto tunnel**:

**In accordo con l'esperienza, una particella ha una certa probabilità di oltrepassare un ostacolo, rispetto al quale, secondo la Fisica classica, avrebbe un'energia insufficiente.**

- L'ostacolo deve essere abbastanza sottile perché il breve tempo durante il quale la particella si trova sull'ostacolo stesso, non sia sufficiente per definire con precisione l'energia della particella in questo stato.
- In tal caso la particella, senza contraddire il PCE, potrebbe superare l'ostacolo.

La Meccanica Quantistica non falsifica mai il PCE, ma in certi casi costringe a sospenderlo. Si può sempre presupporre la sua validità, ma solo se esistono condizioni sperimentali che, almeno in linea di principio, consentono di verificare tale validità.

Per concludere, vediamo un esempio di come la “scommessa” sul PCE ha consentito lo sviluppo di nuove ipotesi.

**SCISSIONE NUCLEARE:** determinati nuclei atomici emettono elettroni e si trasformano in nuclei di altro tipo.

Nel processo non si osservano altre emissioni di energia.

Tuttavia sperimentalmente si trova che l'energia degli elettroni emessi **non coincide** con la differenza di energia tra il nucleo iniziale e quello finale.

In processi analoghi, gli elettroni risultano avere energie differenti, comprese tra 0 e un valore massimo.

→ **Bohr** ipotizza che in questi processi venga violato il PCE.

**Pauli** (1931) elabora un'altra ipotesi.

Nella scissione non viene emesso solo l'elettrone, ma anche un'altra particella priva di carica (il **neutrino**), non ancora osservata.

In seguito l'ipotesi di Pauli trova conferma sperimentale.

→ In effetti, in ogni tipo di scissione viene emesso lo stesso quantitativo di energia, suddiviso fra le particelle emesse (elettroni e neutrini) in una relazione che varia da caso a caso.

Il PCE non è quindi violato.