

MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

AA 2021/22 – Lezione 17 24/05/2022

Argomenti della lezione di oggi

- La misura in fisica
 - La trasduzione di grandezze fisiche
- I sensori
 - Sensori di forza
 - Sensori di pressione
 - Accelerometri
 - Sensori di temperatura
 - L'effetto Seebeck (termoelettrico)

La misura in Fisica

Un problema fondamentale in Fisica è la caratterizzazione quantitativa delle grandezze fisiche.

Di molte grandezze fisiche noi abbiamo una concezione intuitiva, basata sull'esperienza quotidiana: ad esempio quella di lunghezza, oppure di peso o di colore.

In Fisica però dobbiamo definire un metodo, un **processo di misura** per definire la grandezza stessa, in modo tale che la sua valutazione possa essere riprodotta da qualsiasi sperimentatore, senza ambiguità.

Esempio: la misura della lunghezza dello spigolo di un tavolo

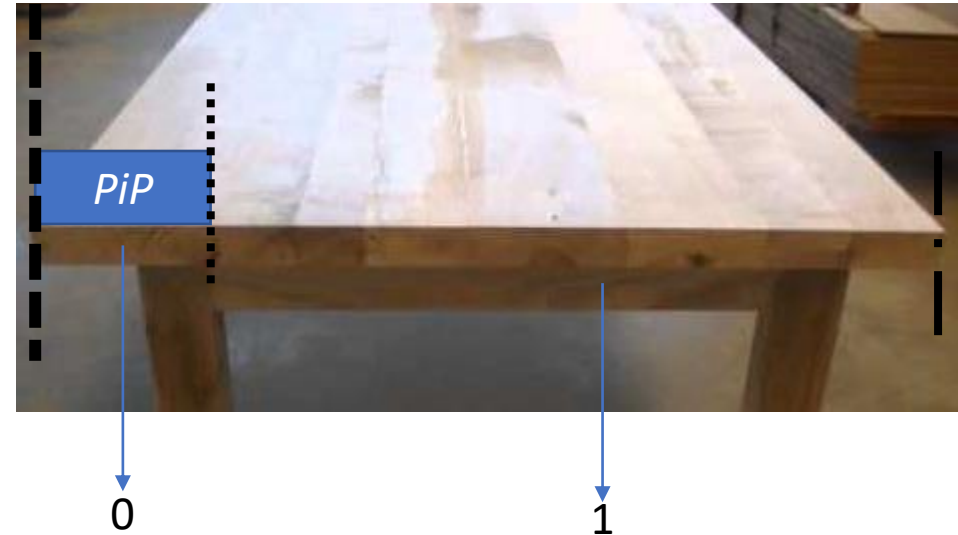
Per caratterizzare la dimensione dello spigolo del tavolo in figura abbiamo bisogno di confrontarlo con quella di un'altro oggetto "noto" (campione di confronto), ad esempio la confezione di un qualche prodotto noto (il famoso PiP).

La procedura con cui effettuare il confronto può essere la seguente

1. Allineare i bordi sinistri dei due oggetti (lungo la linea tratteggiata in figura)
2. Verificare se il bordo destro del tavolo (linea tratto-puntini) cade oppure no all'interno di PiP (sinistra/destra della linea a puntini)

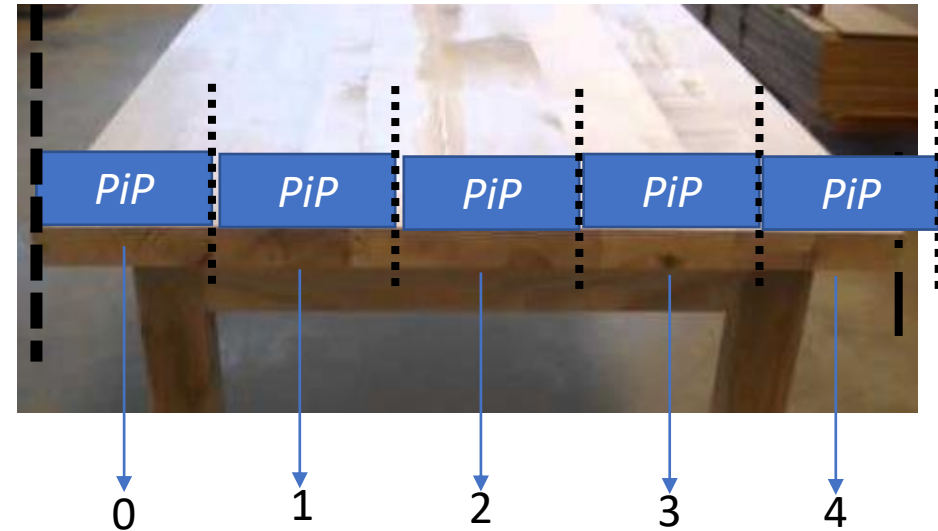
Nel primo caso si assegna un valore 0 al risultato di misura, altrimenti 1

Questo procedimento ci permette di rispondere alla domanda: il tavolo è più lungo o no del campione?



Se però vogliamo sapere “quanto più grande del campione è il tavolo”, dobbiamo generalizzare la procedura, aggiungendo un’ulteriore azione

3) Nel caso che nello step 2 il bordo del tavolo cada fuori del PiP, traslare il PiP verso destra, facendo coincidere il bordo sinistro con la precedente posizione della linea a puntini. Fatto questo, ritornare allo step 2. Se invece nello step 2, il bordo del tavolo cade entro il PiP, fermarsi



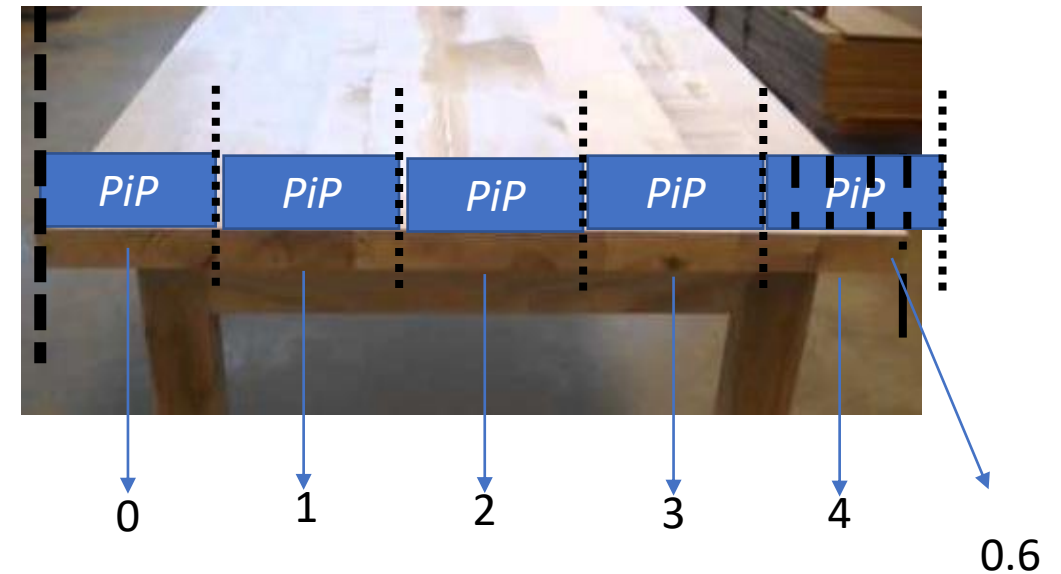
Alla fine il valore di misura è fornito dal conteggio del numero di volte che il PiP è stato traslato (nella figura, 4)

Quindi la risposta alla domanda “quanto più grande del campione è il tavolo” è: 4 volte

In questo modo abbiamo introdotto delle unità multiple di quella fondamentale, definite dal campione PiP

In modo simile possiamo definire dei sottomultipli dell'unità, ad esempio suddividendo in un certo numero di parti il PiP.

Nell'esempio in figura, il PiP è stato suddiviso in 5 parti. Con una generalizzazione del procedimento abbastanza ovvia, possiamo ottenere il valore 4.6 per il valore di misura della lunghezza dello spigolo (assegnando un valore 0.2 ad ogni divisione del Pip).



L'esempio mostrato è quello di un processo di **misura diretta**, in cui la grandezza fisica viene valutata mediante confronto diretto con un campione di misura.

Vi sono altri tipi di misure, tra cui quello chiamato **misura indiretta**. Un esempio è quello della misura della velocità media v_m , il cui valore viene ricavato dal calcolo mediante la relazione di definizione

$$v_m = \frac{L}{\Delta t}$$

in termini di spostamento effettuato L in un certo intervallo di tempo Δt , grandezze misurate in altro modo.

Un terzo tipo è quello costituito dalla **misura con strumento tarato**, che si basa sul principio della **trasduzione di grandezze fisiche**.

La trasduzione di grandezze fisiche

Ci sono dei casi in cui la grandezza fisica da misurare non può essere confrontata con uno o più campioni (o per lo meno risulta molto complicato) e neppure può essere definita mediante una misura indiretta.

In tali casi si ricorre alla correlazione della grandezza fisica da misurare con un'altra, più semplice da misurare.

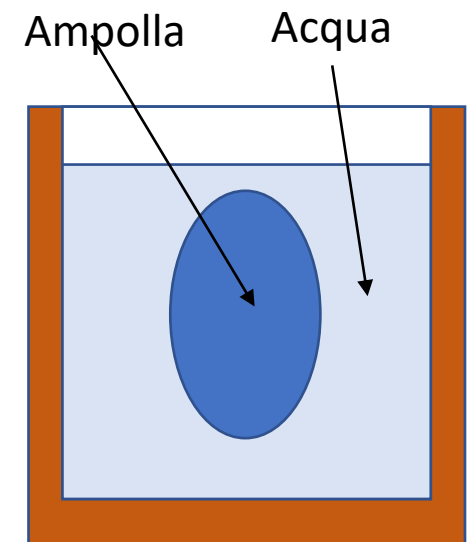
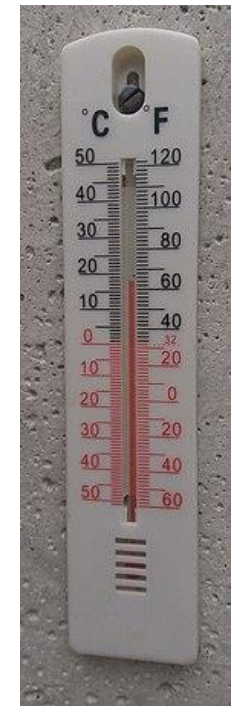
In generale, dispositivi che permettono un tale tipo di correlazione (**trasduzione**) vengono chiamati **trasduttori**.

Vediamo un esempio semplice di applicazione del processo di trasduzione in una misura: la misura di temperatura con un termometro ad alcool.

Il termometro ad alcool è costituito da una ampolla riempita di alcool, che viene messa a contatto termico con l'oggetto di cui si vuole misurare la temperatura (nell'esempio schematizzato in figura, l'acqua contenuta in un recipiente).

L'alcool del termometro e l'acqua, dopo un certo periodo di tempo, raggiungono l'**equilibrio termico**, cioè sono caratterizzati dalla **stessa temperatura**.

$$T_{acqua} = T_{alcool}$$

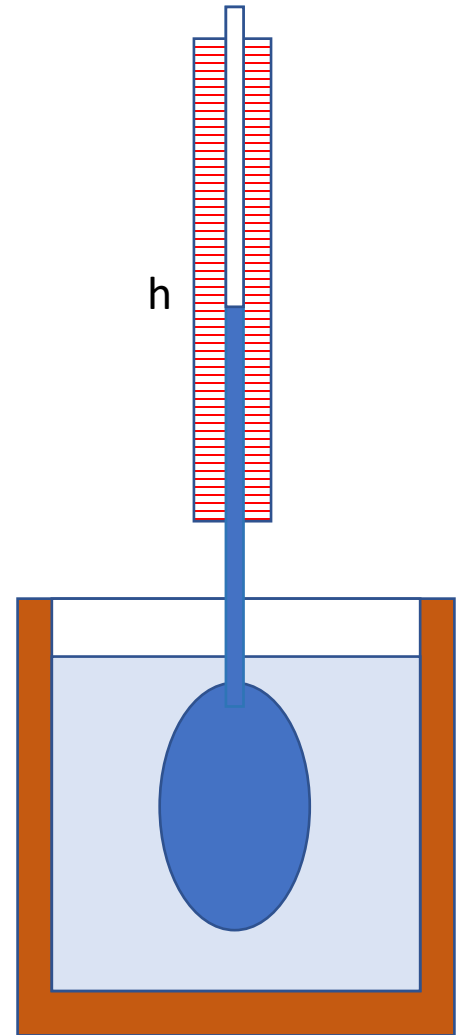


Il volume di un liquido però dipende dalla sua temperatura: esiste una **relazione fenomenologica** tra il volume $V_{alcohol}$ e $T_{alcohol}$. Questa relazione può essere approssimata linearmente mediante una relazione di proporzionalità tra la variazione di volume e la variazione di temperatura

$$\Delta V_{alcohol} \propto \Delta T_{alcohol}$$

L'ampolla è collegata ad un capillare e l'alcool può espandersi in esso, in modo tale che la sua superficie libera possa raggiungere una certa altezza h , misurabile su una scala graduata.

Poiché la sezione del capillare è costante, la variazione della altezza Δh risulta proporzionale alla variazione di volume $\Delta V_{alcohol}$ e quindi è proporzionale anche a $\Delta T_{alcohol}$

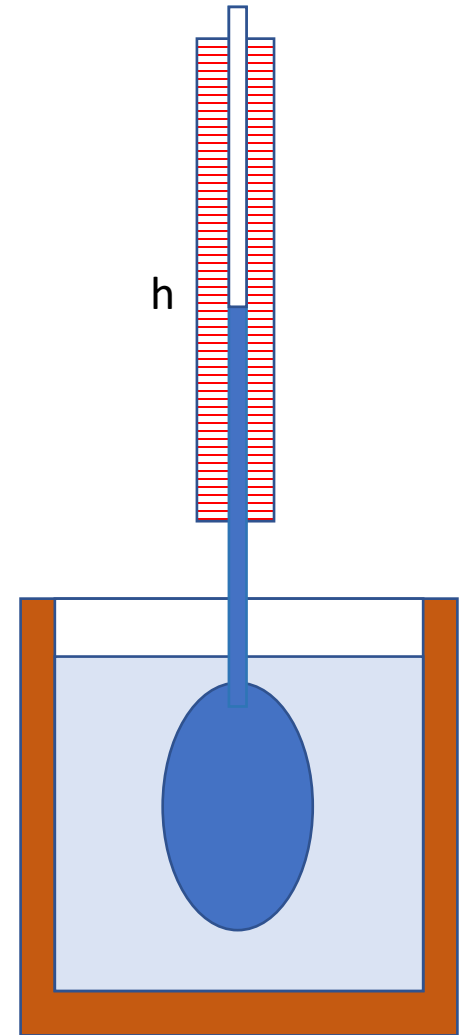


Questa relazione di proporzionalità implica che esiste una funzione lineare F tale che

$$(T_{acqua}) = T_{alcohol} = F(h; a, b)$$

($T_{acqua} = T_{alcohol}$ poiché i due sistemi sono in equilibrio termico) a e b sono delle costanti che vanno determinate mediante un processo chiamato **taratura**.

La funzione F viene chiamata **funzione di trasferimento** e può essere realizzata in maniera analitica (formula) oppure tabulare, oppure in maniera analogica (ad esempio etichettando la scala di lettura con i valori di temperatura corrispondenti). a e b sono chiamate **costanti di taratura**.



Riassumiamo

- 1) Nella trasduzione applicata alla misura di grandezze fisiche si realizza una correlazione tra la grandezza fisica del sistema che si vuole misurare ed una analoga dello strumento di misura, tipicamente sfruttando una situazione di equilibrio (meccanico, termico, elettrico) tra i due oggetti (nell'esempio, un equilibrio termico, in modo che la temperatura dell'acqua e del fluido termometrico sia eguale)
- 2) La grandezza associata allo strumento di misura risulta correlata con un'altra grandezza di stato dello strumento, mediante una relazione empirica (nell'esempio, il volume del liquido termometrico è correlato alla temperatura, ed inoltre tale volume è correlato all'altezza della superficie libera del liquido termometrico nel capillare). Questa seconda grandezza (trasdotta) viene poi misurata.
- 3) Il valore della grandezza trasdotta viene poi correlata al valore che fornisce il risultato della misura della grandezza originaria, calcolandolo mediante la funzione di trasferimento.
- 4) La funzione di trasferimento viene calibrata determinando opportune costanti di calibrazioni (effettuando misure di campioni con valori noti della grandezza da misurare)

I sensori

Uno strumento di misura che operi mediante il processo di trasduzione viene chiamato **sensore**, particolarmente nelle applicazioni pratiche moderne (che possono interessare questo corso di laurea) in cui **la grandezza trasdotta è di tipo elettrico**, una tensione o una corrente o una resistenza.

Le grandezze che possono essere misurate mediante questi sensori sono quanto mai varie.

Nel seguito vedremo alcuni dei tipi di sensori più comuni nelle applicazioni pratiche

Sensori di forza

I sensori di forza sono tipicamente dei dispositivi costituiti da dei materiali solidi a reticolo cristallino.

Quando vengono sollecitati dall'esterno essi subiscono delle deformazioni (ad esempio possono essere compressi oppure soggetti a flessioni) che modificano la struttura del reticolo atomico del materiale e le caratteristiche elettriche di quest'ultimo.

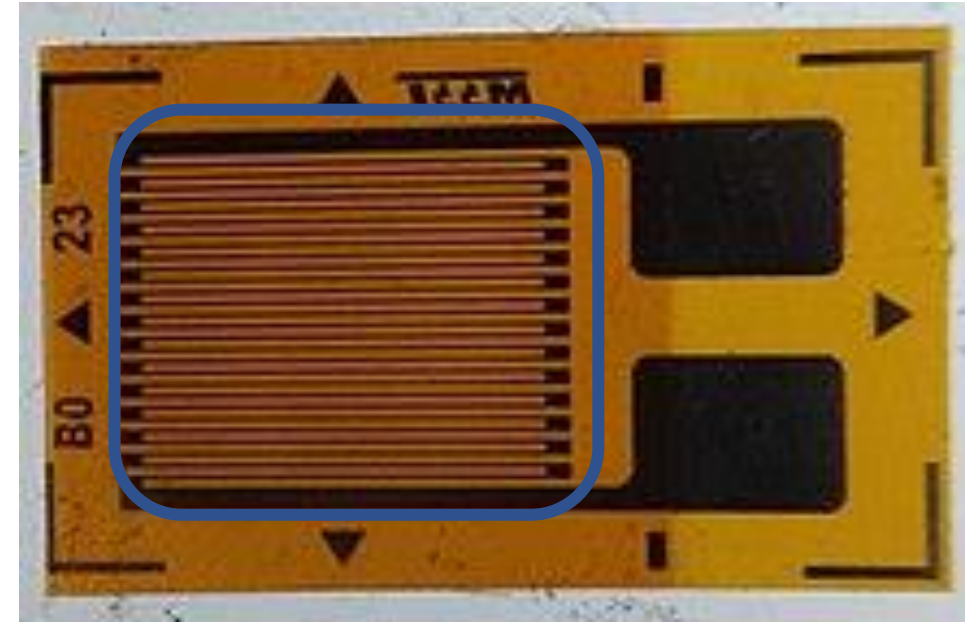
Ad esempio, nella compressione si può generare una tensione elettrica (il fenomeno, piuttosto complesso, viene chiamato **effetto piezoelettrico**). L'effetto piezoelettrico è quello utilizzato negli accendini per generare una scarica elettrica tale capace di infiammare il gas.

La tensione generata con questo effetto è misurabile direttamente e ciò è alla base del principio di funzionamento dei sensori piezoelettrici.



Un'altra categoria di sensori di forza è quello degli **strain gauge** (misuratori di stress meccanico).

Negli strain gauge viene misurata la resistenza di un conduttore ohmico (nella figura è mostrato un dispositivo realizzato creando una pista conduttiva a zig zag su un supporto isolante flessibile).



Se il conduttore viene deformato in flessione, la struttura cristallina del conduttore viene deformata, modificando la resistenza del conduttore (nell'esempio di figura, applicando una forza ortogonale al piano del supporto, flettendolo in tale direzione).

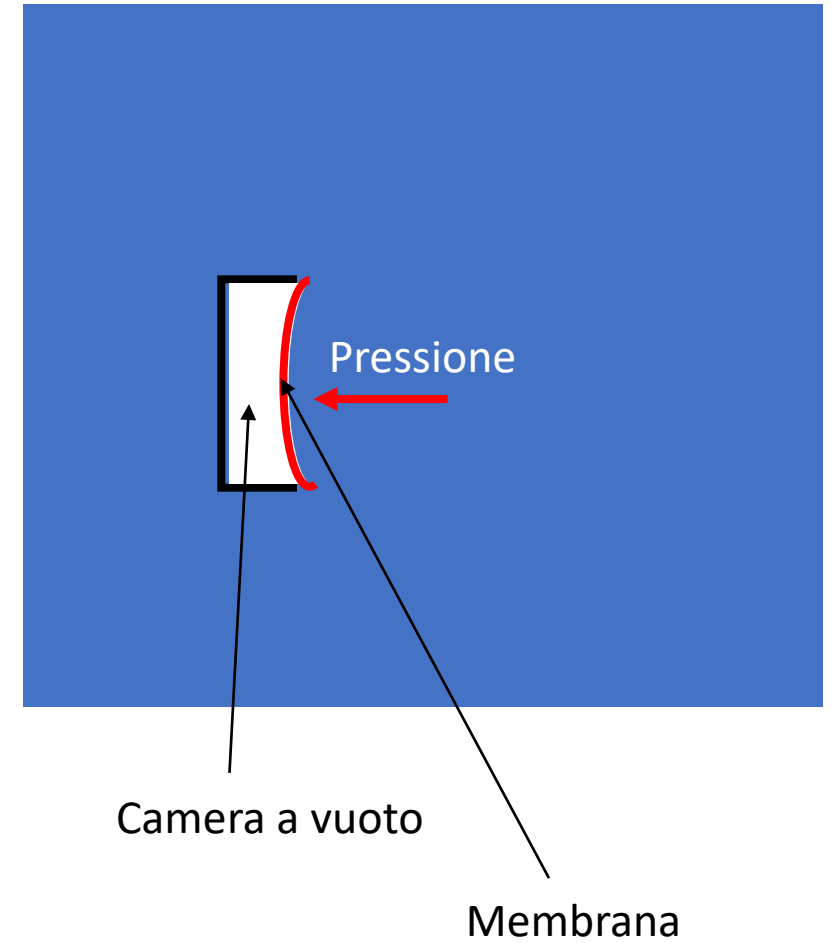
L'entità della variazione della resistenza dipende da quella della flessione, che a sua volta dipende dalla sollecitazione esterna. In condizioni di equilibrio meccanico, viene quindi realizzata una trasduzione tra la grandezza fisica che produce la deformazione (forza) e la resistenza del dispositivo.

Se la sollecitazione esterna cambia abbastanza lentamente nel tempo, tale equilibrio meccanico viene approssimativamente realizzato in ogni istante di tempo, permettendo di monitorare l'evoluzione dell'intensità della forza nel tempo.

Sensori di pressione

I sensori di pressione sono tipicamente realizzati con una camera in cui è fatto il vuoto, sigillata da una membrana che può essere deformata dalla pressione del fluido (gas o liquido) all'esterno.

La deformazione può essere rilevata in diversi modi: i più pratici sono quelli realizzati con un sensore di forza. In tale caso, la membrana è realizzata con materiale piezoelettrico oppure con uno strain gauge depositato sulla sua superficie.



L'accelerometro

L'accelerometro è un dispositivo che misura il peso di una sua componente (nucleo).

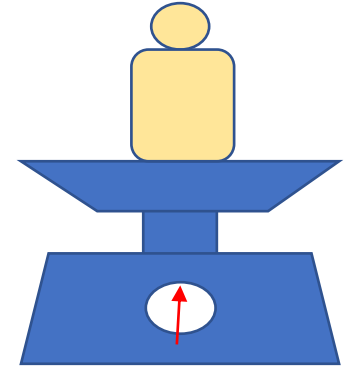
Il concetto di peso in Fisica non va confuso con quello di forza peso o di massa: vediamo alcuni esempi per chiarire ciò.

Poniamo un corpo sul piatto di una bilancia: lo strumento indicherà un valore che usualmente interpretiamo come quello della massa del corpo.

In realtà quello che la bilancia misura è una grandezza che in Fisica viene chiamata forza: nel caso specifico, è la forza che il piattello della bilancia applica al corpo per farlo stare fermo. Il corpo di per sé tenderebbe a muoversi verso il basso, sotto l'effetto di un'altra forza chiamata forza peso (quella che fa cadere tutti i corpi nei pressi della superficie della Terra).

Per fare stare fermo il corpo, è necessario che le due forze (la forza peso e quella applicata dal piattello) si controbilancino, realizzando una situazione di equilibrio.

Quindi per trasduzione, la bilancia misura la forza peso del corpo (che risulta essere proporzionale alla massa del corpo stesso, tramite una costante chiamata costante di accelerazione di gravità g).



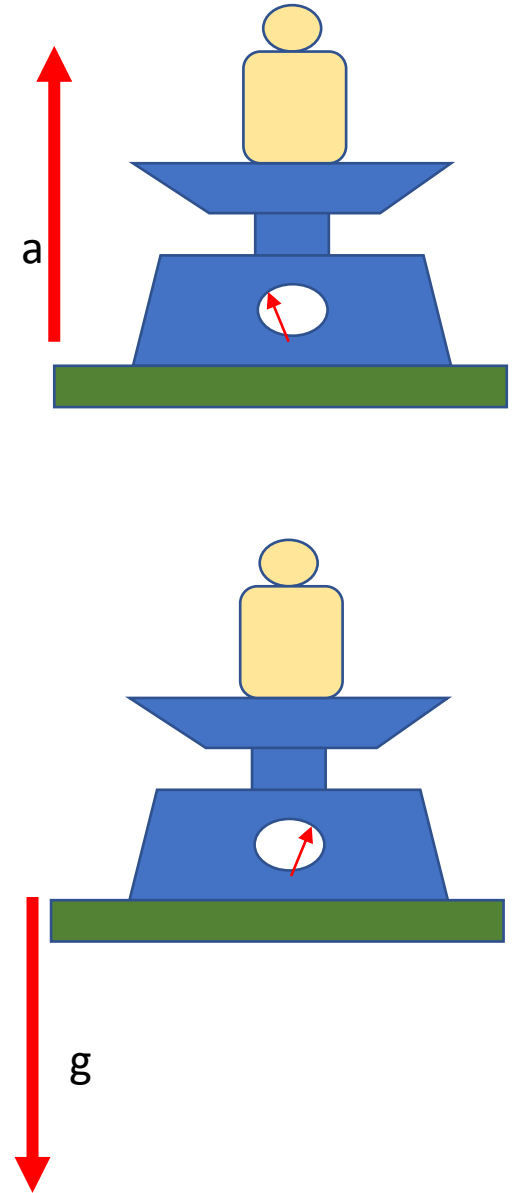
Il tutto cambia se facciamo accelerare verso l'alto la bilancia (ad esempio, se la mettiamo sul pavimento di un ascensore che acceleri verso l'alto con accelerazione a).

Allora, in condizioni di quiete relativa tra bilancia e corpo, è necessario che anche il corpo acceleri verso l'alto: per fare ciò il piattello deve agire con una forza maggiore del caso precedente, per poter spingere il corpo verso l'alto.

In questo modo la bilancia segna un peso maggiore, anche se la massa del corpo non è cambiata.

La differenza tra le misure dipende dal valore della accelerazione (in effetti, è proporzionale ad essa).

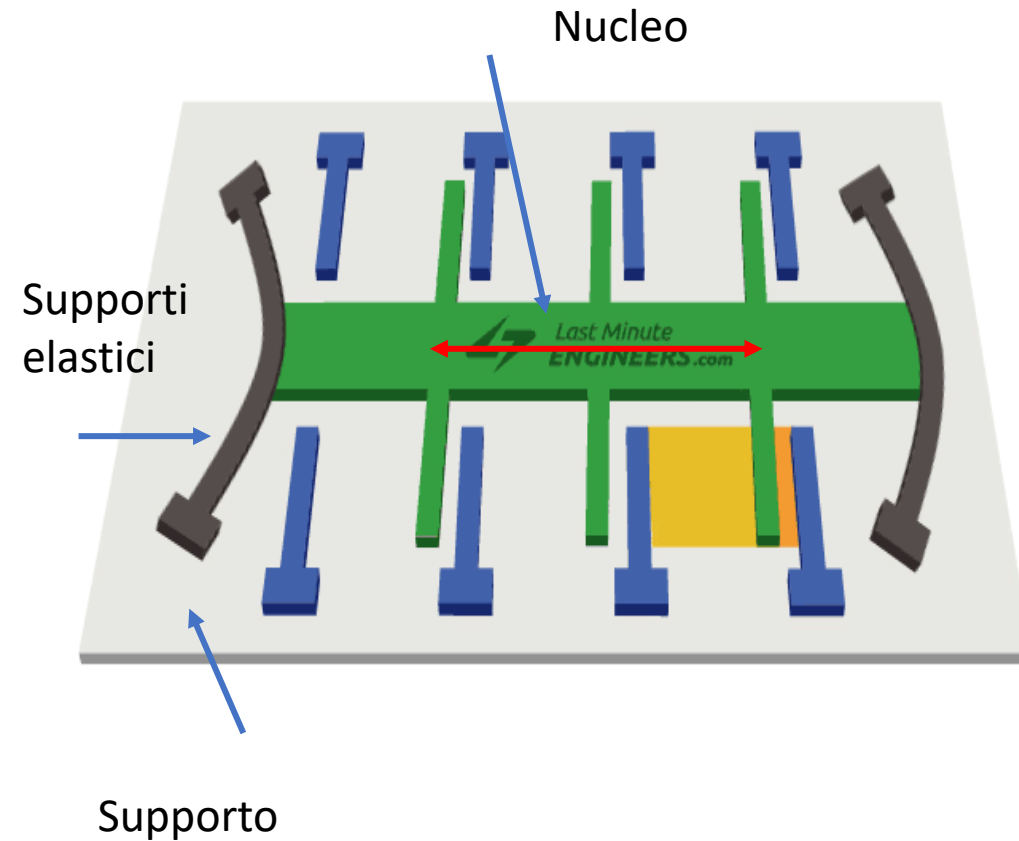
Per completezza, se ad un certo punto il cavo che fa muovere l'ascensore si rompesse ed il tutto cadesse liberamente, corpo e bilancia si muoverebbero entrambi con accelerazione g e non sarebbe necessaria nessuna forza applicata dal piattello per mantenere in quiete relativa i due oggetti: la bilancia segnerebbe un peso nullo (moto in assenza di peso).



Gli accelerometri MEMS

Un accelerometro per smartphone è tipicamente realizzato con un dispositivo microelettronico (MEMS) integrato in forma altamente miniaturizzata su un substrato di materiale semiconduttore.

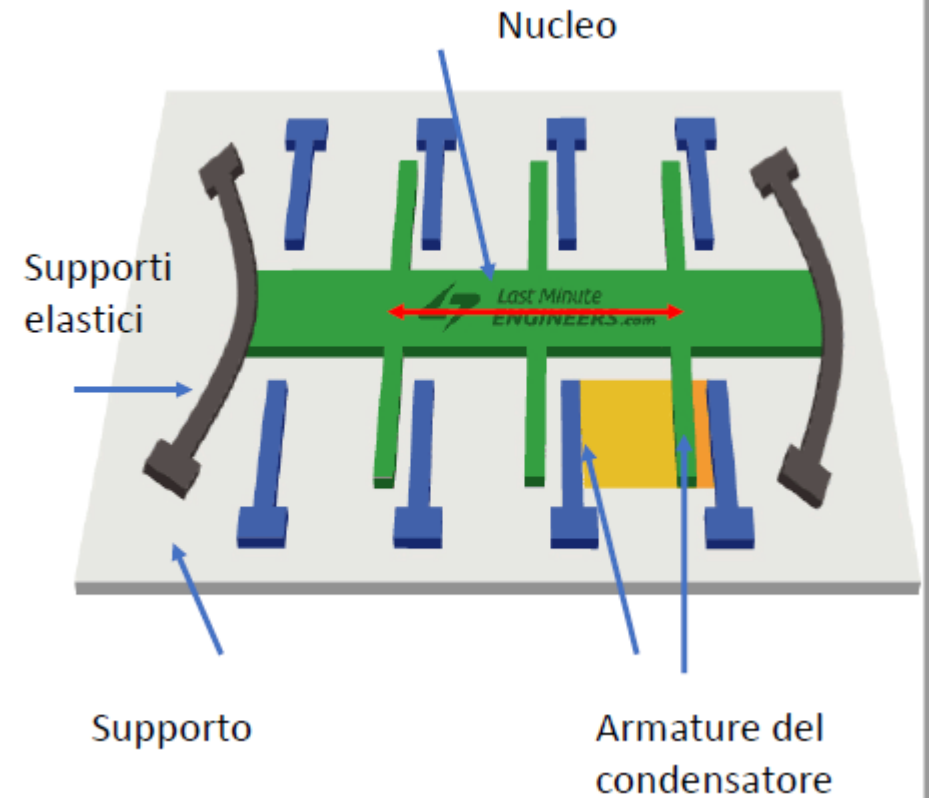
Il dispositivo è costituito da un nucleo dotato di una certa massa, sostenuto da elementi elastici. Sotto una sollecitazione esterna, il supporto accelera, mentre il nucleo tende a rimanere fermo. Si crea così una deformazione degli elementi elastici, fino a che il nucleo non si muove con la stessa accelerazione del supporto.



Il grado di deformazione dei supporti elastici è correlato alla forza applicata al nucleo e quindi alla sua accelerazione.

Questa deformazione è inoltre correlata con lo spostamento del nucleo rispetto al supporto, sfruttando la variazione di capacità elettrica di un condensatore, con una armatura solidale al supporto e l'altra al nucleo.

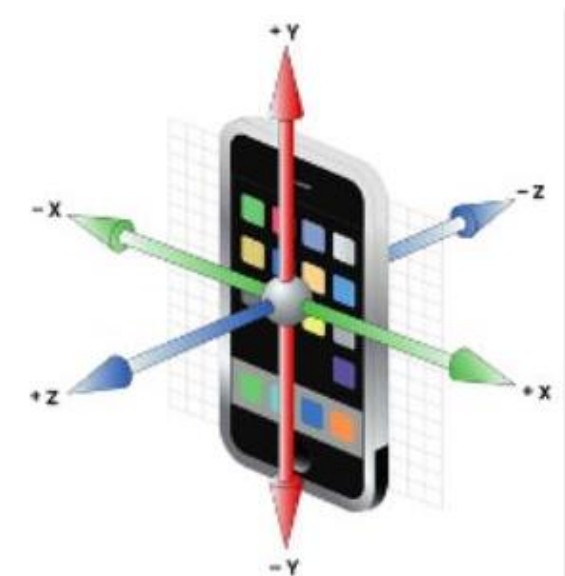
Viene così realizzata una trasduzione tra l'accelerazione subita dal dispositivo e una grandezza elettrica (legata al condensatore del dispositivo)



Un MEMS è un sensore unidirezionale, per cui misura l'accelerazione lungo una sola direzione.

Per caratterizzare completamente l'accelerazione sono necessari tre MEMS, ognuno diretto lungo uno dei tre assi di un sistema di riferimento tridimensionale.

Una app che acquisisce e visualizza i dati in tempo reale dall'accelerometro dello smartphone, mostra l'andamento temporale delle tre componenti dell'accelerazione (la traccia bianca è la composizione delle tre componenti).



I sensori di temperatura

I sensori commerciali di temperatura possono essere classificati in due categorie principali

- Le termocoppie. Il loro funzionamento si basa sull'effetto termoelettrico e misurano la differenza di temperatura tra due ambienti diversi.
- I termistori. Il principio di funzionamento è basato sulla diversa conducibilità elettrica dei materiali al variare della temperatura e quindi forniscono una misura assoluta della temperatura nell'ambiente in cui si trovano.

Esaminiamo per prima la termocoppia.

L'effetto Seebeck (termoelettrico)

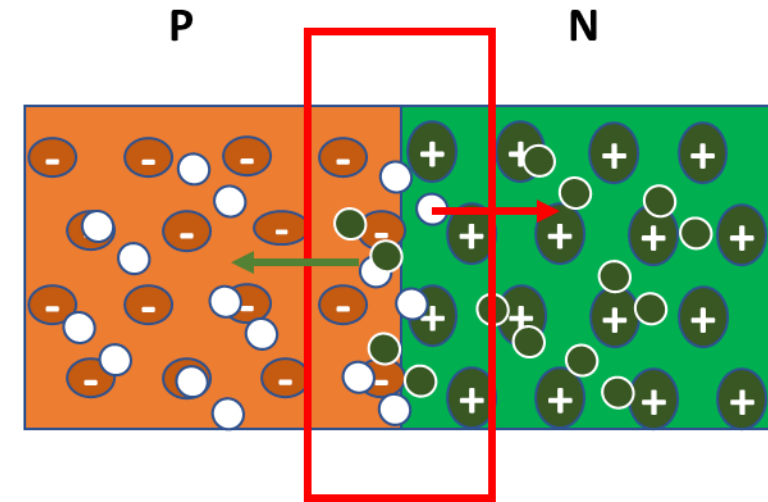
Nella lezione 14 avevamo visto come in un diodo a giunzione PN la corrente circolante sia dovuta a due tendenze opposte dei portatori di carica:

- Migrare dalle zone ad alta concentrazione a quelle a bassa (diffusione)
- Migrare attraverso una differenza di potenziale di segno opposto alla carica portata.

Il tutto viene espresso in termini di bilancio tra le variazioni di energia associate alle differenze di potenziale chimico e di potenziale elettrico tra le due zone

$$n \Delta\mu + n q \Delta V$$

(n.b. il segno nella precedente formula è stato corretto rispetto alla lezione)

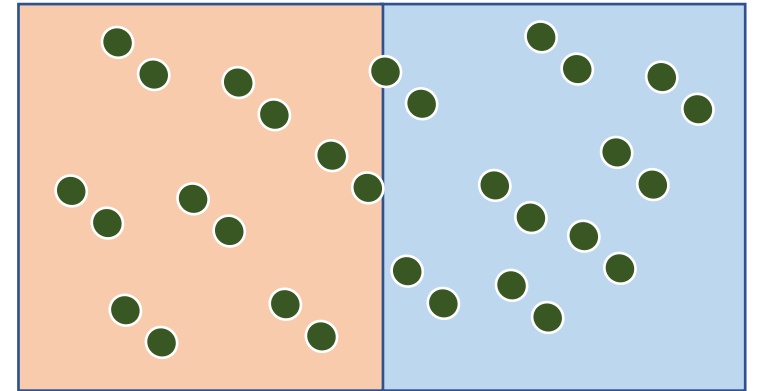
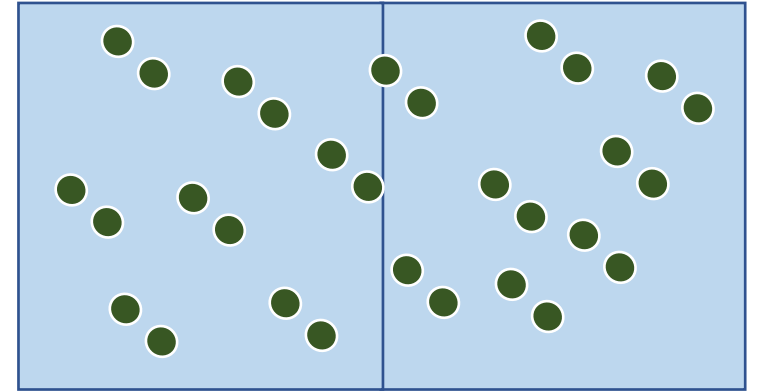


Questo fenomeno esiste anche in un qualsiasi altro tipo di conduttore: nel seguito, per semplificare il ragionamento, supporremo che i portatori di carica siano elettroni di conduzione.

In un conduttore omogeneo, a cui non è applicata una tensione dall'esterno, però non esistono squilibri nei termini di energia dovuta ai potenziali chimico ed elettrico: sono eguali ovunque

$$n \mu + n q V = \text{costante}$$

La situazione cambia se riscaldiamo una estremità del conduttore (ad esempio quella di sinistra in figura): gli elettroni assumono una energia di agitazione termica (chiamiamola u_{term}) superiore a quella degli elettroni nella zona fredda



L'energia totale degli elettroni conterrà quindi anche un termine legato alla temperatura T

$$n u_{term}(T) + n \mu(n) + n q V$$

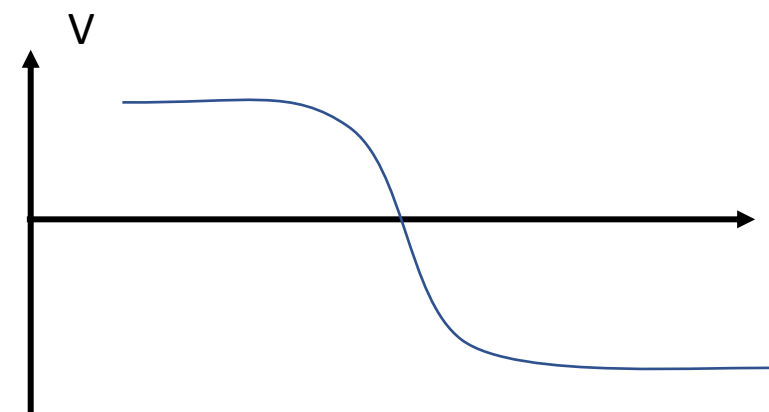
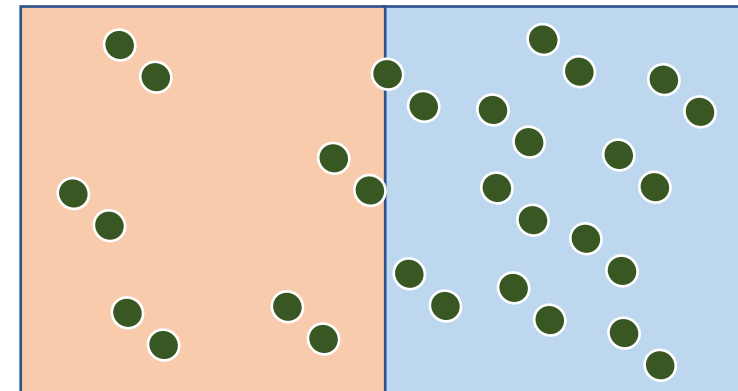
In questo caso vi è una differenza di energia tra le due parti del conduttore. Ciò genera un flusso di elettroni dalla regione calda a quella fredda, per equilibrare l'energia tra di esse.

Questo però comporta che all'equilibrio si instaura una differenza di potenziale elettrico tra le due regioni (nella zona di destra aumenta la carica negativa, mentre in quella di sinistra diminuisce), oltre che di potenziale chimico.

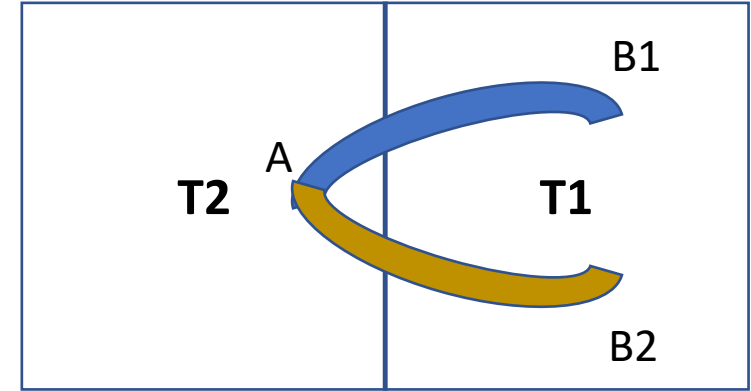
Questa differenza di potenziale ΔV dipende in maniera diretta dalla differenza ΔT di temperatura: una approssimazione è una relazione di proporzionalità

$$\Delta V = S \Delta T$$

ove S è una opportuna costante che dipende dal materiale.



Se saldiamo una estremità (A) di due aste di materiali diversi (come in figura) e poniamo le altre estremità (B1) e (B2) in un ambiente a temperatura diversa, tra le estremità A e B1, A e B2 si avranno d.d.p. diverse, a seconda del valore della costante S per i due materiali.



Risulterà quindi una tensione ΔV tra i terminali B1 e B2, proporzionale alla differenza di temperatura $T2-T1$: misurando tale tensione con un voltmetro è possibile correlarla (processo di trasduzione!) con il valore di $T2$ (supposto noto il valore di $T1$).

Questo è il principio di funzionamento del sensore chiamato **termocoppia**.

La termocoppia ha il vantaggio di essere un sensore molto veloce, potendo rendere piccola a piacere la zona attiva (la giunzione dei due materiali) e quindi raggiungendo l'equilibrio termico in tempi brevi. Lo svantaggio è che per una misura assoluta di temperatura è necessario mantenere le altre estremità in una regione a temperatura controllata (eventualmente misurata da un altro sensore, più lento).