

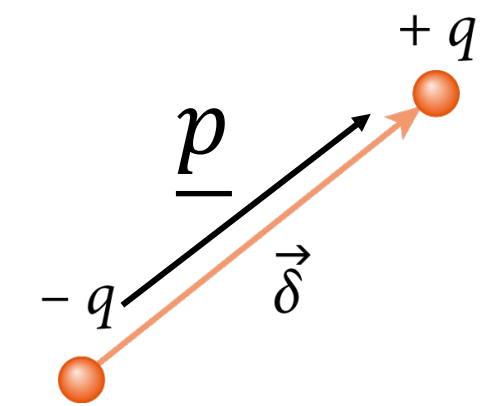
Conduttori e Dielettrici

*Isolanti no cariche libere di muoversi.
ma in presenza di un campo ho fenomeni di elettrizzazione.*

- ✓ Comportamento dei materiali dielettrici (isolanti) in presenza di un campo elettrostatico.
- ✓ Il ~~differente~~ comportamento fra materiali conduttori ed dielettrici (isolanti) a livello macroscopico è dovuto al differente comportamento su scala atomica o molecolare (livello microscopico).
- ✓ La differenza fondamentale è che i materiali dielettrici non possiedono cariche libere di muoversi.
- ✓ L'effetto principale dell'azione di un campo elettrostatico sui dielettrici è una modificazione della struttura a livello microscopico, che si chiama polarizzazione.
- ✓ Sperimentalmente si nota che un dielettrico che subisce il fenomeno della polarizzazione genera a sua volta un campo elettrostatico sia all'esterno che all'interno del volume da esso occupato.
- ✓ All'interno del volume questo campo si somma al campo esterno iniziale e contribuisce al fenomeno della polarizzazione, che dipenderà quindi dal campo totale.
- ✓ Per trattare questi fenomeni in modo quantitativo, si introdurranno delle grandezze fisiche basandosi su delle semplici considerazioni sul comportamento microscopico (azione del campo elettrico su una singola molecola o atomo)
- ✓ Ci riporteremo al caso in cui i fenomeni elettrostatici in presenza di dielettrici possono essere trattati come dovuti ad opportune distribuzioni di cariche nel vuoto.

Dipolo elettrico *Recap*

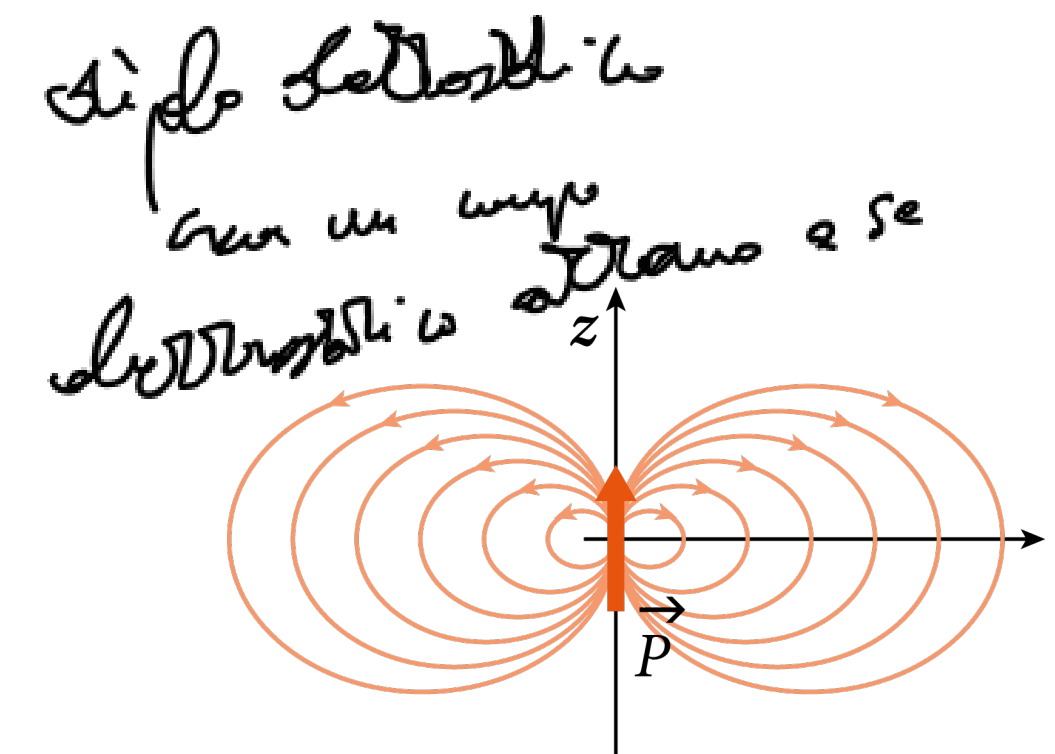
- ✓ Due cariche puntiformi di uguale carica (+q, -q) poste ad una distanza δ *ovvero da + a -* l'una dall'altra formano un dipolo elettrostatico.



- ✓ Il dipolo è caratterizzato da un momento di dipolo $\underline{p} = q\underline{\delta}$ *o a lunga distanza*

- ✓ Se $\delta \ll r$ *a lunga distanza, genera un potenziale* il potenziale generato dal dipolo a distanze molto maggiori della distanza tra le cariche è
$$V(\underline{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\underline{p} \cdot (\underline{r} - \underline{r}')}{|\underline{r} - \underline{r}'|^3} \quad V$$

- ✓ Se $\delta \ll r$ il campo elettrico dal dipolo a distanze molto maggiori della distanza tra le cariche è
$$\underline{E}(\underline{r}) = -\nabla V(\underline{r}) \quad \frac{V}{m}$$

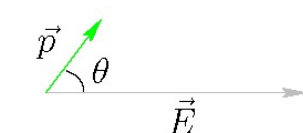
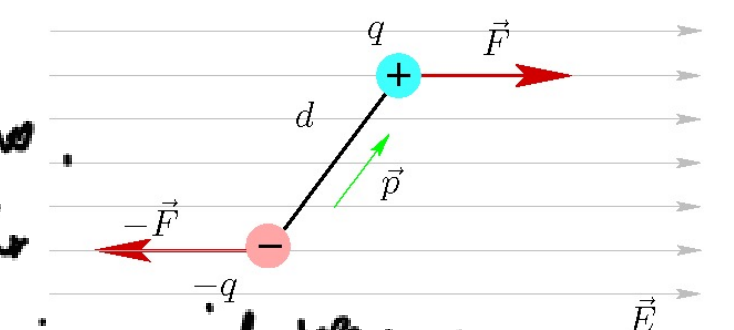


- ✓ Energia potenziale del dipolo *all'interno di un corpo*
- ✓ Momento meccanico della coppia di forze *lo momento come il corpo*
- ✓ Forza risultante applicata al baricentro

$$U = -\underline{p} \cdot \underline{E}(\underline{r}) \quad J$$

$$\underline{M} = \underline{p} \times \underline{E}(\underline{r}) \quad [N \cdot m] \quad \text{momento meccanico che il dipolo tende ad allinearsi con il campo.}$$

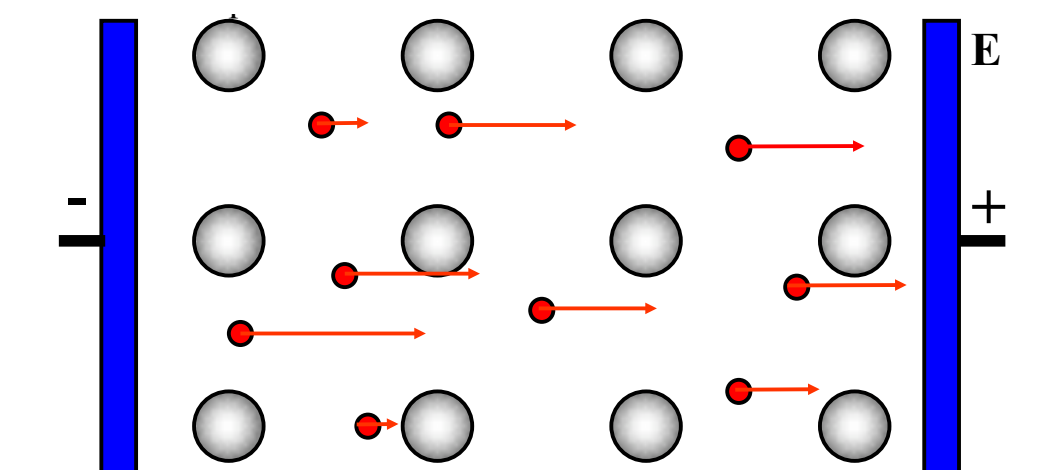
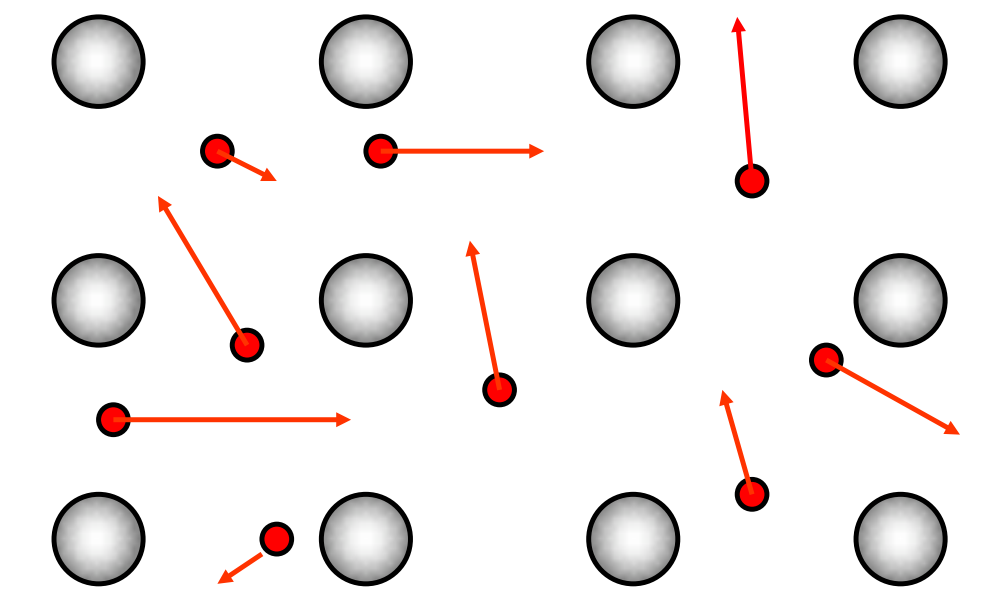
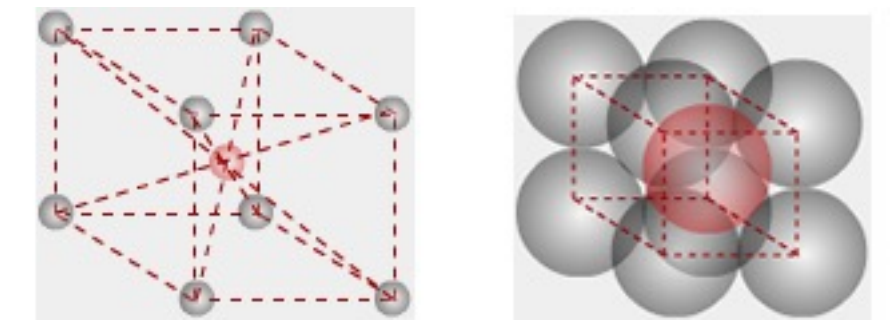
$$\underline{F} = (\underline{p} \cdot \nabla) \underline{E}(\underline{r}) \quad N$$



momento meccanico è uniforme e tende a ruotare se posto in un campo elettrico non uniforme

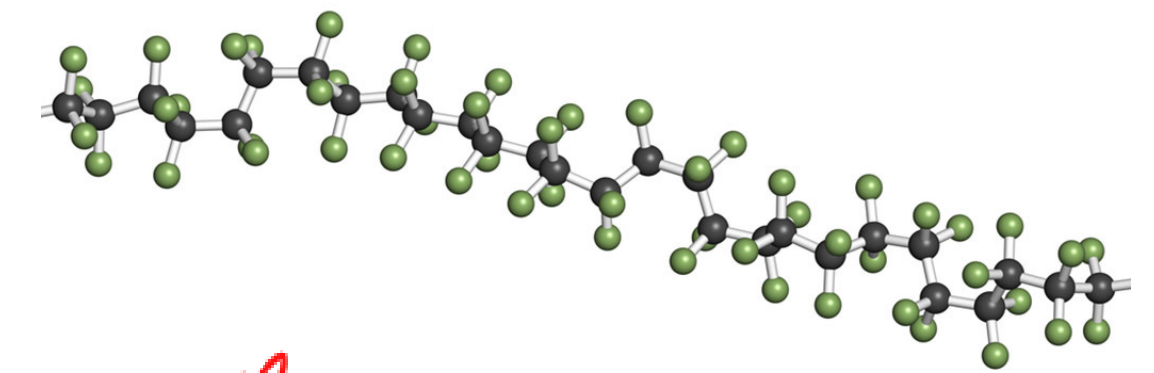
Conduttori

- ✓ Gli atomi sono disposti in modo regolare secondo una struttura cristallina.
- ✓ Un certo numero di elettroni delle orbite esterne degli atomi è **libero** cioè l'energia di legame di questi elettroni è abbastanza piccola da essere inferiore all'energia di agitazione termica già a temperature ambiente.
- ✓ Il metallo può essere pensato come costituito da ioni positivi circondati e legati da un "gas di elettroni" che occupa gli spazi del reticolo atomico.
- ✓ Gli elettroni sono in continuo movimento per agitazione termica e la loro traiettoria è continuamente modificata dalle collisioni con gli ioni (più pesanti).
- ✓ In condizioni di assenza di campo elettrico gli elettroni sono distribuiti uniformemente all'interno del metallo.
- ✓ L'applicazione di un campo elettrico statico esterno produce un'accelerazione degli elettroni (crescerebbe all'infinito se non ci fossero le collisioni con gli ioni).
- ✓ Gli elettroni si mettono in movimento "ordinato" fino a raggiungere una nuova situazione di equilibrio elettrostatico.
- ✓ Il tempo impiegato a raggiungere la nuova posizione è dell'ordine di 10^{-16} sec.



Dielettrici

- ✓ Sono caratterizzati dall'avere atomi e molecole con tutti gli elettroni fortemente legati ai rispettivi nuclei.
- ✓ Questi ~~elettroni~~ ^{v.m. calcoli} non sono liberi di muoversi sotto l'azione del campo elettrico, ad intensità tipiche che si rilevano nella pratica.
- ✓ Solo l'applicazione di forze molto intense (strofinio, campi molto intensi con conseguente scarica) può capitare che alcuni elettroni siano strappati dalla loro posizione (lasciando cariche positive localizzate).
- ✓ Essendo comunque materiali composti da atomi e molecole, cioè da insiemi di cariche, devono risentire della presenza di un campo elettrico statico esterno, perché questo si traduce in una forza applicata sulle cariche. *carpe bo forte dalle cose*
- ✓ Per comprendere e modellare i fenomeni da un punto di vista macroscopico (cioè mediati su regioni di spazio molto grandi rispetto alle dimensioni atomiche) procederemo in due passi:
 - un'analisi preliminare delle caratteristiche elettrostatiche di un singolo atomo o di una singola molecola in presenza di un campo elettrostatico
 - l'introduzione di alcune grandezze macroscopiche capaci di rappresentare il comportamento delle molecole e degli ~~atomi~~ opportunamente *mediato*.

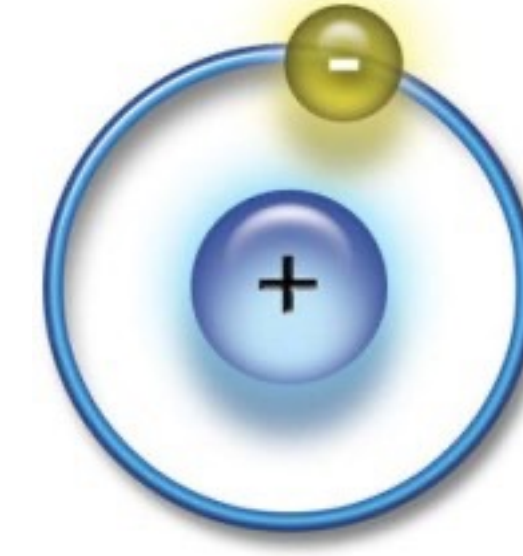
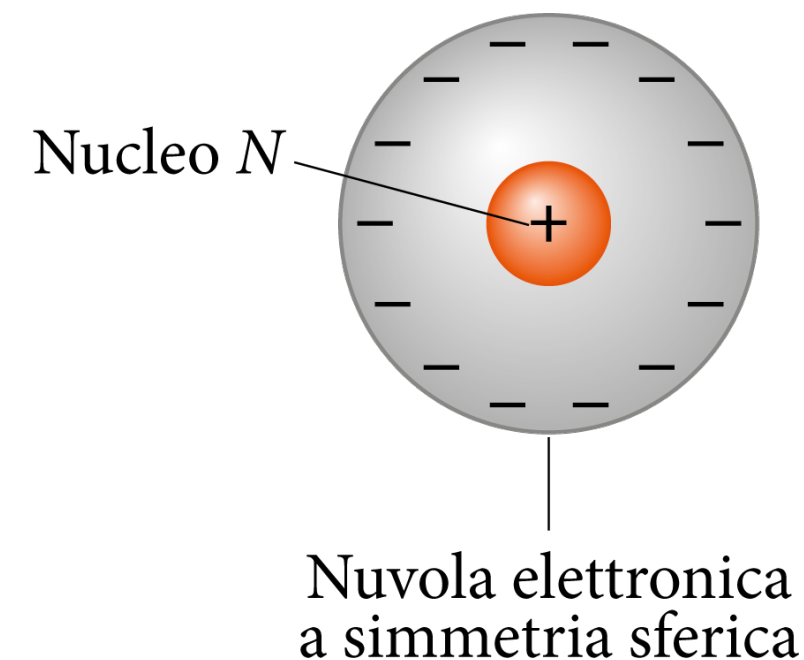
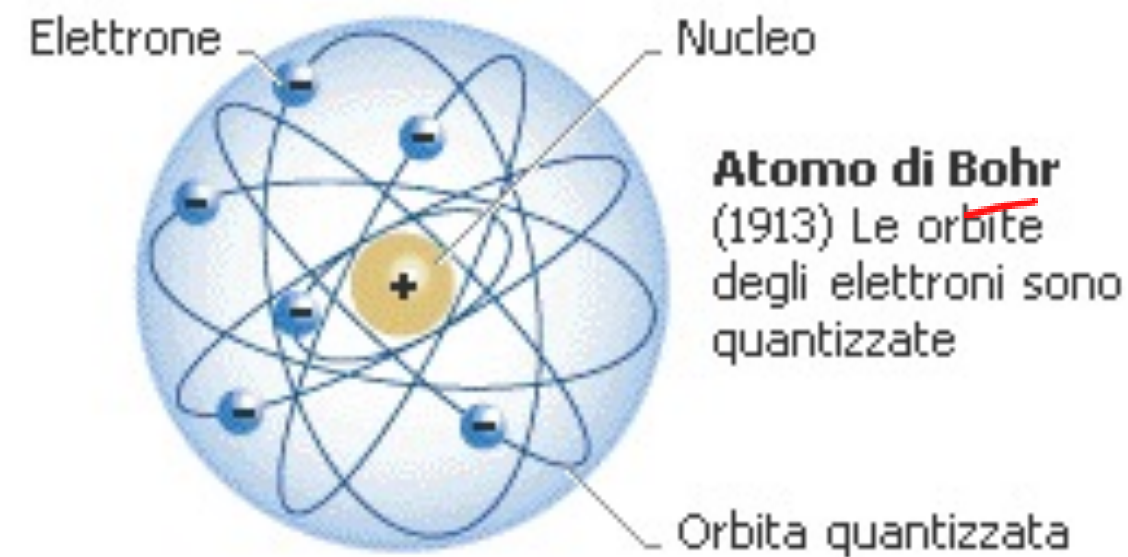


*dielettrico tipo localizzato
come ϵ non c'è
ricquilibrio*

Modello dell'atomo

- ✓ Ogni atomo, anche quello più elementare, può essere schematizzato come un sistema elettricamente neutro costituito da:

- a) nucleo centrale di dimensioni molto piccole, $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ m}$ più piccola del raggio atomico, dotato di carica positiva (Ze (Z numero atomico; e carica positiva pari a quella del singolo elettrone)) *2 protoni di carica e*
- b) nube elettronica intorno al nucleo con densità di carica a simmetria sferica variabile con continuità dal centro alla periferia e con diametro dell'ordine di qualche Angstrom ($1 \text{ Angstrom } 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). *nube più densa sulle orbite*



Atomo di idrogeno

nube elettronica di simmetria sferica atomo

- ✓ Dato il tipo di simmetria, l'atomo presenta un momento di dipolo (e anche di monopolo) **nullo**.

cosa succede se applico un campo elettromagnetico

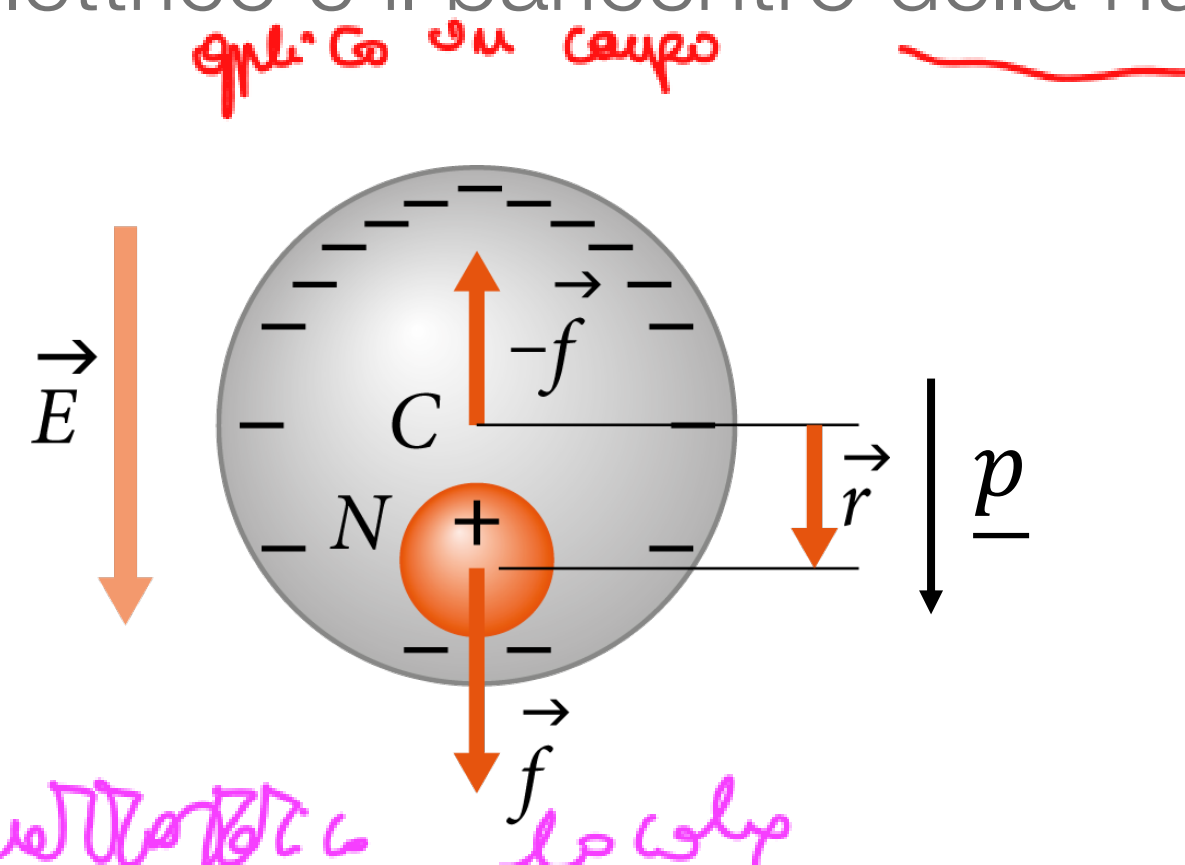
*SIMMETRIA SFERICA,
NON HO MOMENTO
DI DIPOLLO*

Deformazione dell'atomo

- ✓ Se il singolo atomo viene sottoposto all'azione di un campo elettrico (statico) esterno locale il nucleo subisce una forza $\underline{f} = Ze\underline{E}$ in direzione del campo elettrico e il baricentro della nube elettronica una forza $\underline{f} = -Ze\underline{E}$

Se un atomo si deforma, qui
momento di dipolo, si genera
anche un campo elettrico

form. di dipolo da campo elettrico esterno



la nucleon 7
o spostato

- ✓ Si genererà una deformazione della sferula elettronica. La distribuzione di carica negativa avrà una forma finale ovoidale.
- ✓ All'equilibrio il baricentro della nube si troverà ad una certa distanza r dal nucleo.
- ✓ In un modello in cui gli elettroni sono legati elasticamente ai nuclei lo spostamento sarà proporzionale al campo locale applicato.

2 cariche uguali e opposte
ad una distanza r

→ avrà un momento di dipolo

- ✓ L'atomo deformato presenta un momento di dipolo indotto $\underline{p} = Ze\underline{r} = \alpha_d \underline{E}_l$ diverso da zero. $\underline{p} = Ze \underline{r} = \alpha_d \underline{E}_l$

deformazione di sfera e nucleo
campo elettrico. crea un momento di dipolo, proporzionale al
Maggiore aumento di campo: maggior momento

non solo proporzionale al momento di campo elettrico

più forte è il campo, più si deforma, maggiore è il momento di dipolo

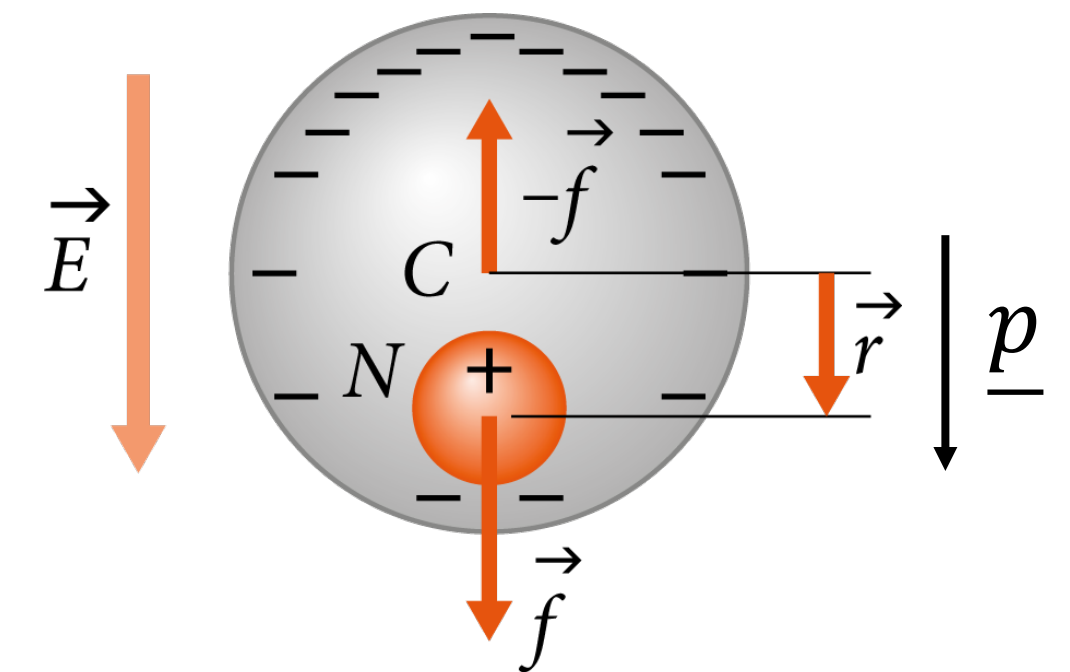
Polarizzazione per deformazione

- ✓ Il fenomeno per cui un atomo immerso in un campo elettrico esterno acquista un momento di dipolo è chiamato polarizzazione elettrica.

- ✓ Il campo locale E_l è da intendersi come il campo generato dalle sorgenti esterne sull'atomo, compreso anche i campi generati sull'atomo dai momenti di dipolo degli altri atomi vicini e lontani del materiale dielettrico, ma escluso il campo generato dall'atomo stesso quando si polarizza.

$$\underline{p} = Z \underline{e} \underline{r} = \alpha_d \underline{E}_l$$

ovvero
quello generato
dal campo elettrico
degli altri dipoli



MOM DI DI P

- ✓ Il campo macroscopico (mediato nel tempo e nello spazio) in un punto interno al dielettrico include anche il campo generato dall'atomo in esame.

Tutti gli atomi si deformano

PER DEFORMAZIONE
NELLA STESSA DIREZIONE
DEL CAMPO
EL

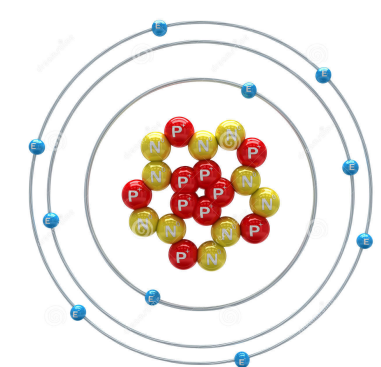
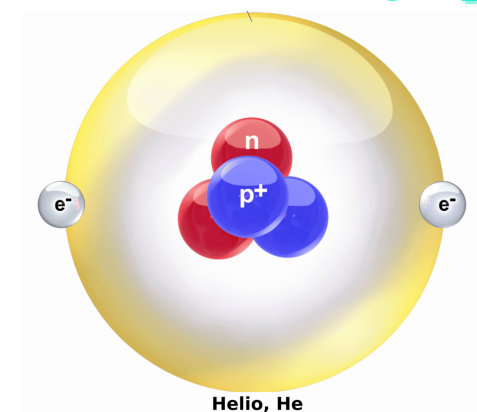
- ✓ Il coefficiente di proporzionalità α_d è detto polarizzabilità elettronica.

valore
in base
alla sostanza

$$\text{Elio } \alpha_{He} = 0,22 \cdot 10^{-40} \quad [F \cdot m^2]$$

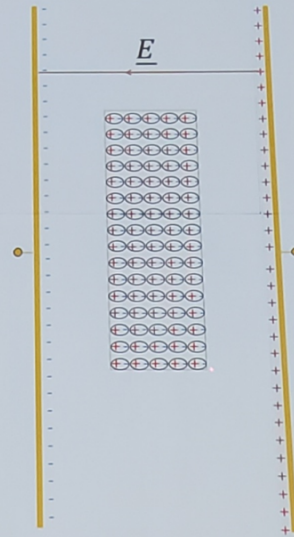
$$\text{Neon } \alpha_{Ne} = 0,43 \cdot 10^{-40} \quad F \cdot m^2$$

$$\underline{p} = \alpha_d \underline{E}_l$$



Polarizzazione
defavorisce
atomi a separazione
di iperstruttura

Polarizzazione per deformazione



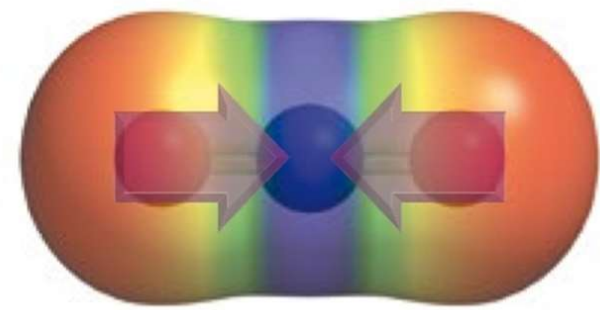
Si formano cariche le superfici di
separazione

Molecole polari e non polari

materiali formati dalle
MOLECOLE, che posso essere
in base alla loro config.

- ✓ Le molecole poliatomiche possono essere divise in due categorie:
 - a) Molecole non polari: che non posseggono momento di dipolo proprio
 - b) Molecole polari: posseggono un momento di dipolo proprio diverso da zero.
- ✓ Entrambi i tipo di molecole sono comunque sistemi elettricamente neutri (non posseggono momento di monopolo)

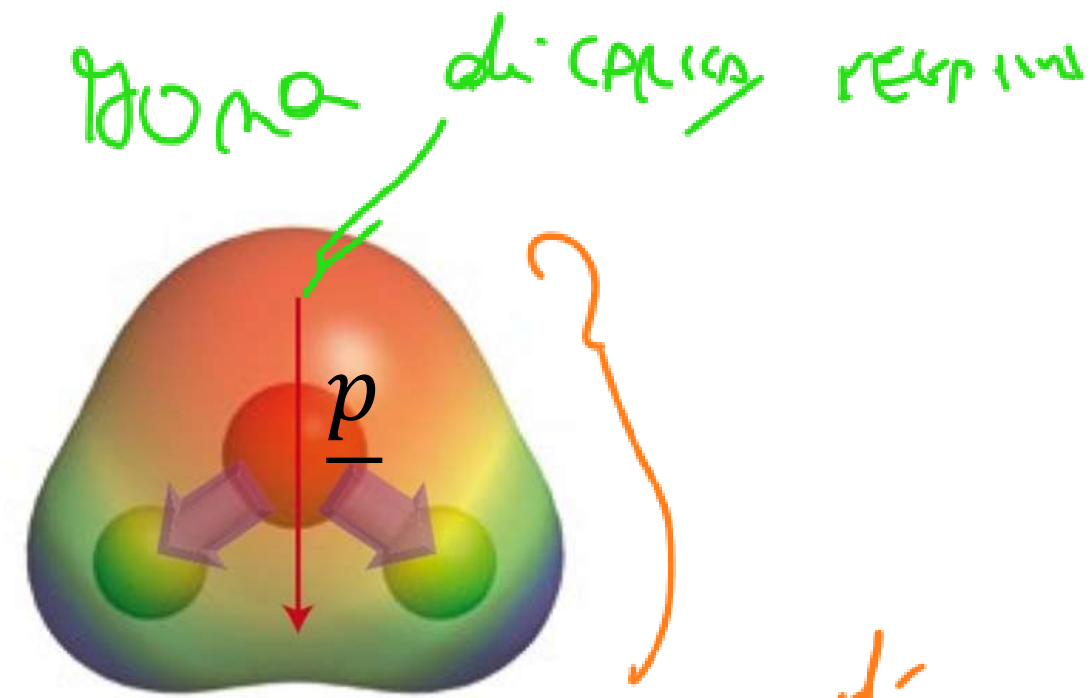
2 non
di dipolo
opposti e
opposti



26 Diossido di carbonio, CO_2

Molecola non polare

elettroni che
si legano tra
loro annullando
nel. Vi sono
del tutto no



27 Acqua, H_2O

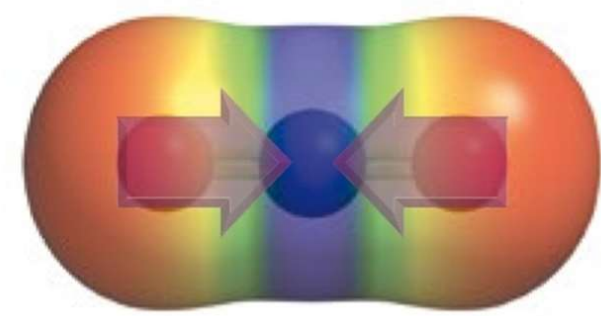
Molecola polare

zona di
carica positiva

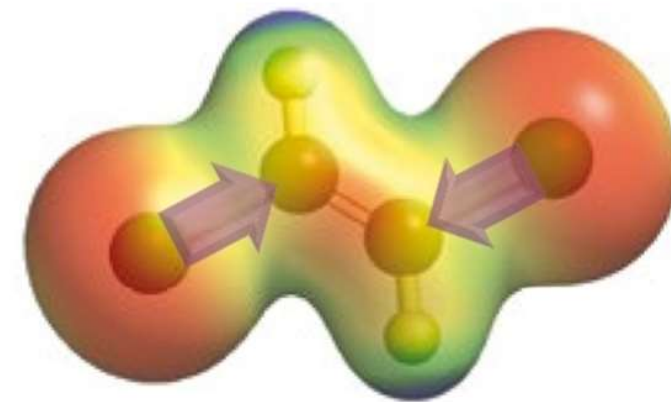
Molecole non polari

- ✓ Le molecole non polari sono tipicamente quelle che hanno una distribuzione simmetrica delle cariche (es molecole diatomiche)

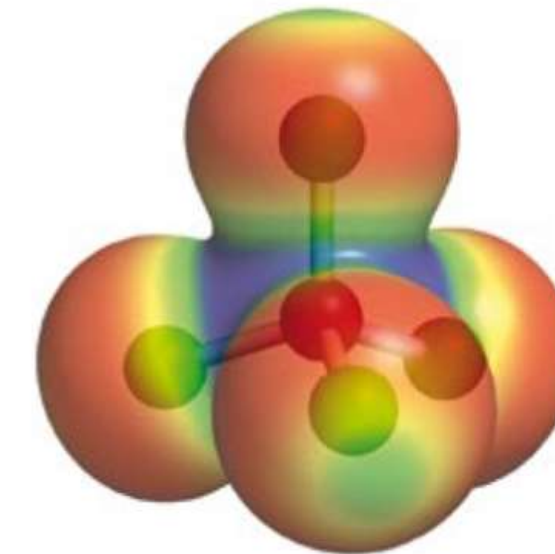
No net dip. moment



26 Diossido di carbonio, CO_2



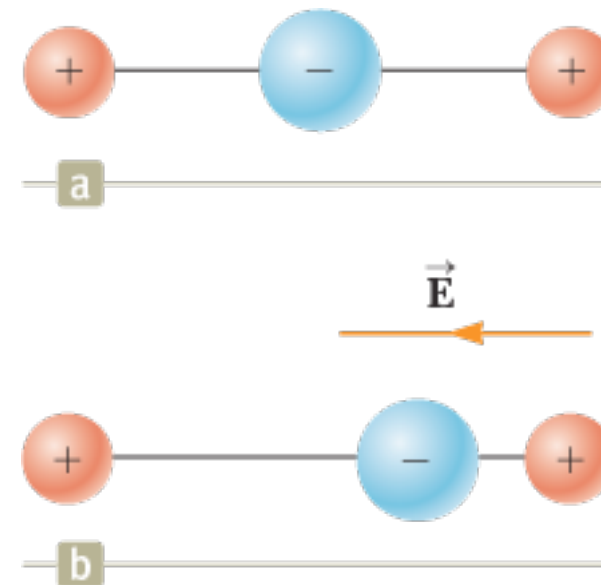
29 *trans*-Dicloroetene, $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$



30 Tetraclorometano, CCl_4

Possono essere comunque polarizzati per deformazione per cui nasce un momento di dipolo

- ✓ La polarizzazione per deformazione è presente anche nelle molecole poliatomiche non polari, per cui anche queste acquistano un momento di dipolo elettrico diverso da zero sotto l'azione di un campo elettrico applicato.

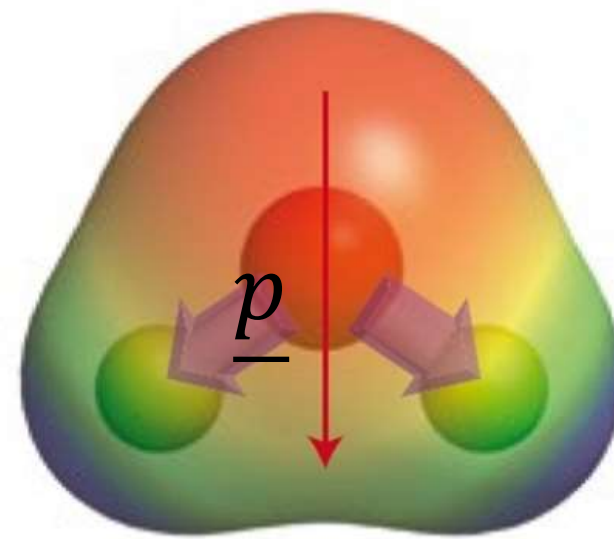
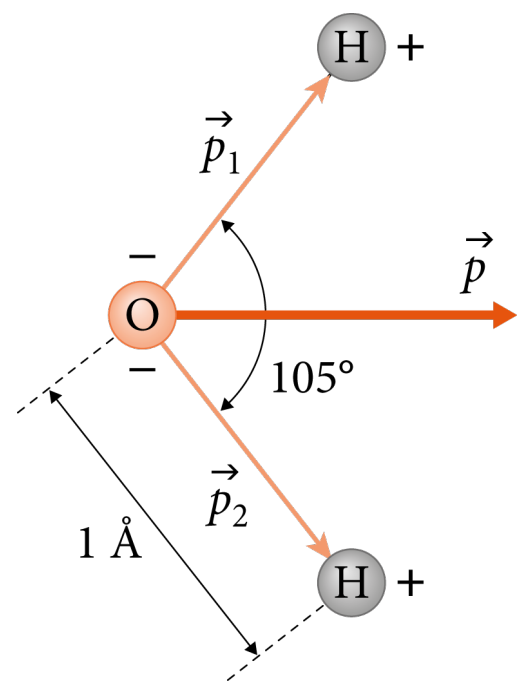


*momento di dipolo netto
a seguito di polarizz.
momento di dipolo*

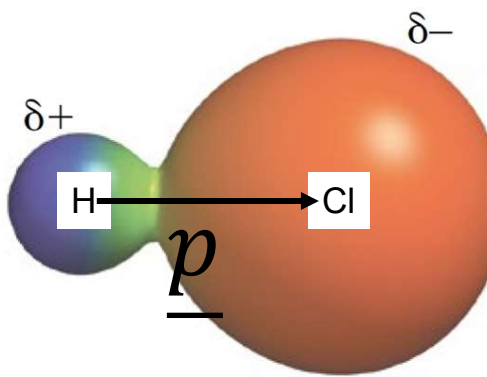
*momento di dipolo $\neq 0$
per deformazione.*

Molecole polari

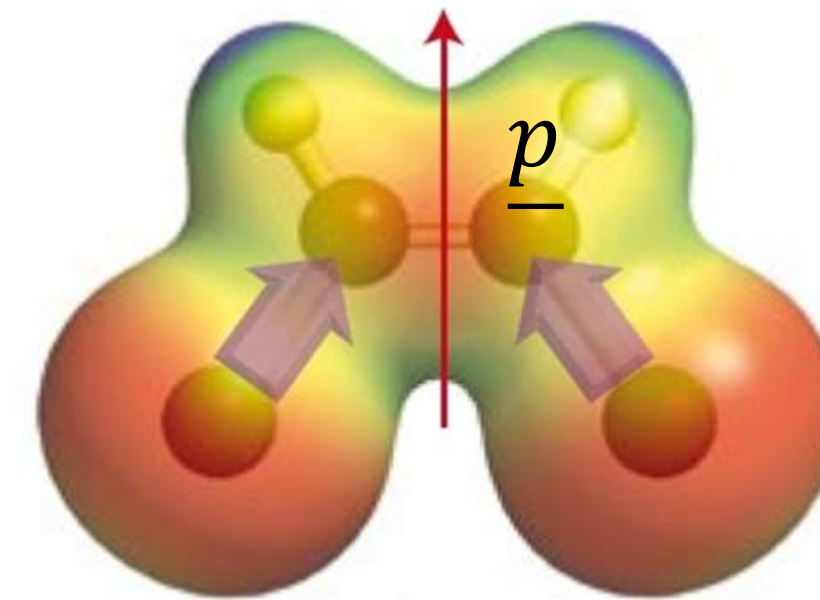
- ✓ La distribuzione delle cariche è asimmetrica e quindi posseggono un momento di dipolo proprio anche in assenza di campi elettrici esterni.
- ✓ Alcuni esempi:



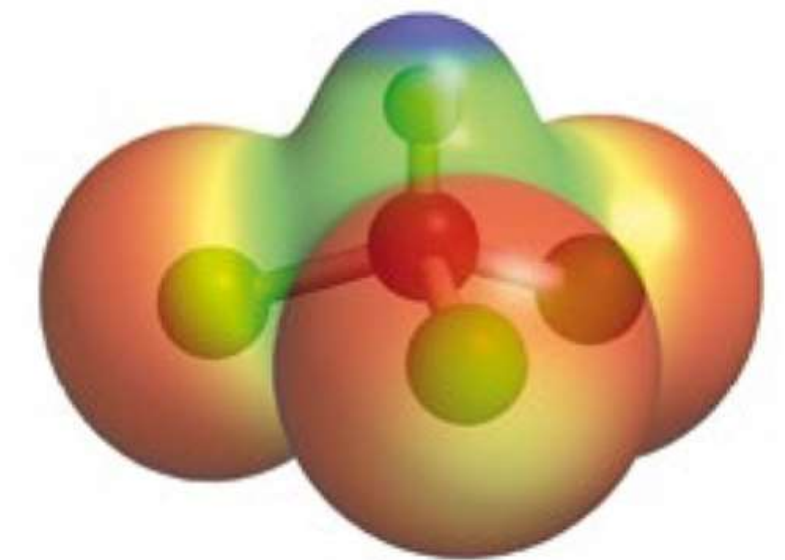
27 Acqua, H_2O



Acido cloridrico



28 *cis*-Dicloroetene, $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$



31 Triclorometano, CHCl_3

- ✓ Il momento di dipolo proprio p_0 può essere stimato oppure misurato sperimentalmente. Nel caso dell'acido cloridrico misure sperimentali hanno portato a stimare il momento di dipolo $p_0 \cong 3.4 \cdot 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$.

- ✓ Generano singolarmente un campo elettrostatico.

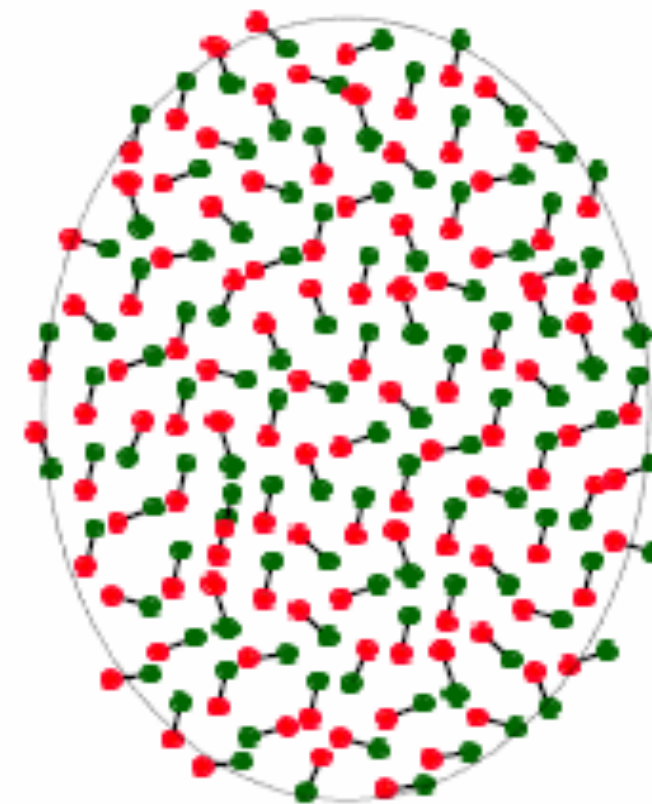
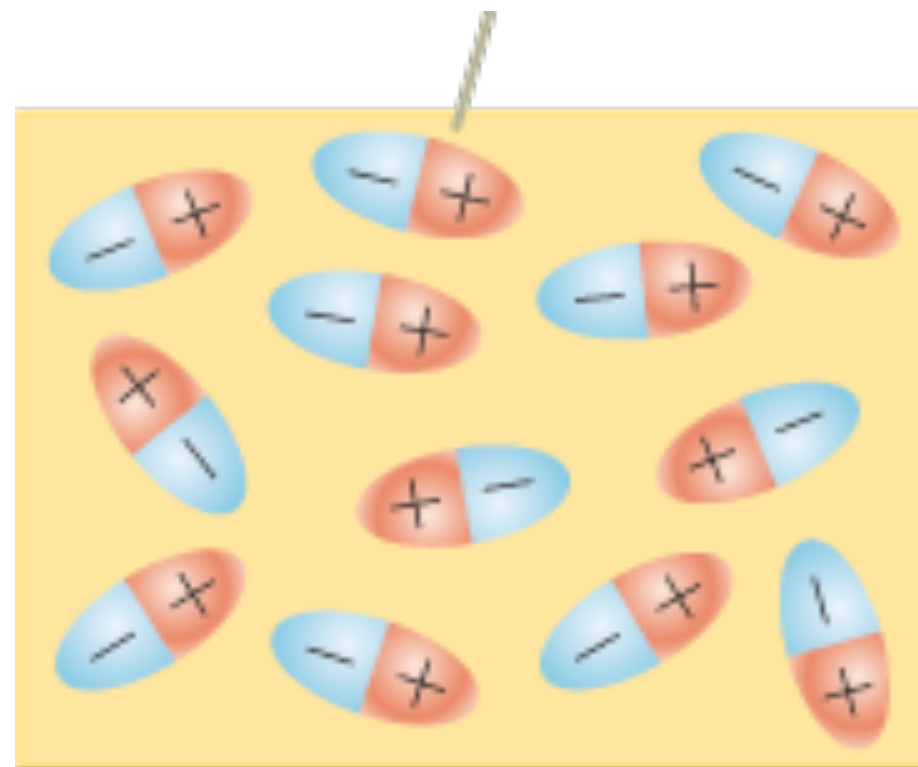
e un pot elettrico proprio attorno a se

Molecole polari

l'ordine termico che è casuale
se sono tempi inferiori a $\tau = 0$

- ✓ Una sostanza formata da molecole polari in condizioni di assenza di campi elettrici applicati non produce all'esterno nessun effetto elettrostatico macroscopico.
- ✓ A causa dell'agitazione termica le molecole sono orientate in modo casuale per cui il valore medio del momento di dipolo $\langle P \rangle$, eseguito su un volumetto molto piccolo, ma contenente un gran numero di molecole polari è nullo.

non si p. genera un
camp e se
potenzio

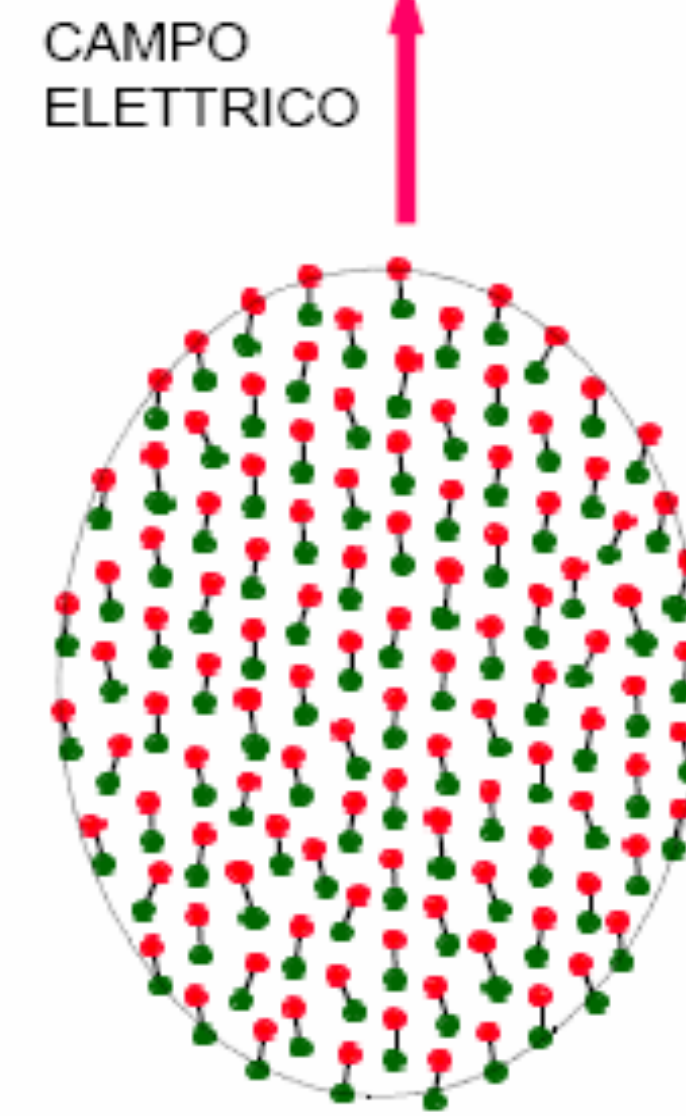
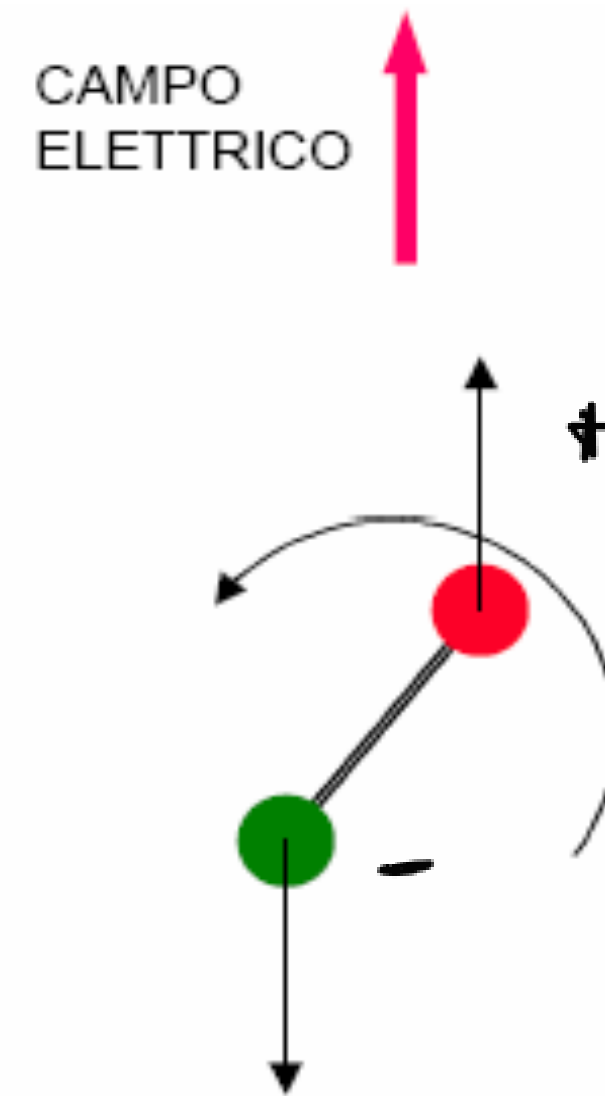
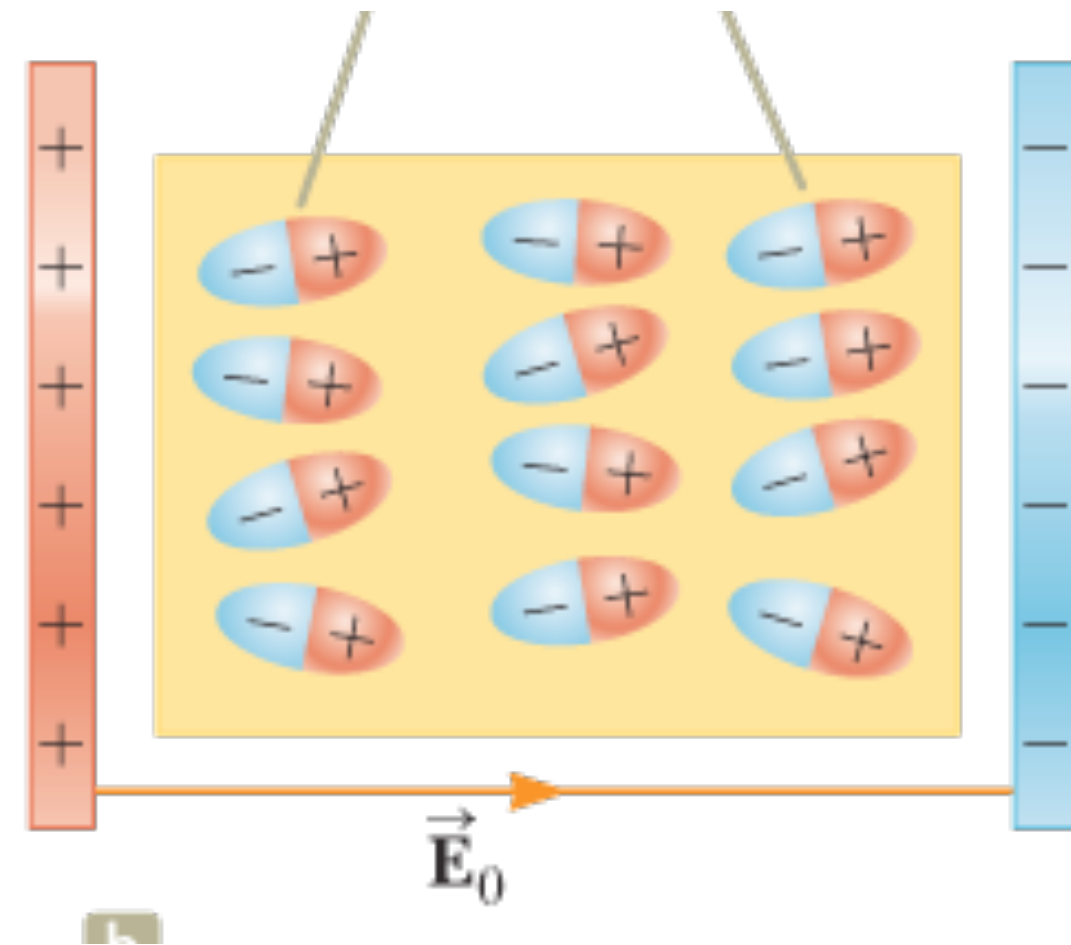


a livello macroscopico,
in un volume, la
media del momento
di dip. complessivo
è nulla

campo risultante
nullo

Molecole polari in presenza di un campo elettrico esterno

- ✓ In presenza di un campo elettrico esterno ogni molecola polare tenderà ad orientarsi parallelamente al campo esterno perché questo agirà sulla molecola con una coppia di forze



Intensità polare
fornita da un campo
esterno

su ogni MOM pol interno agisce
un MOMENTO
MECANICO
 $P \times E$

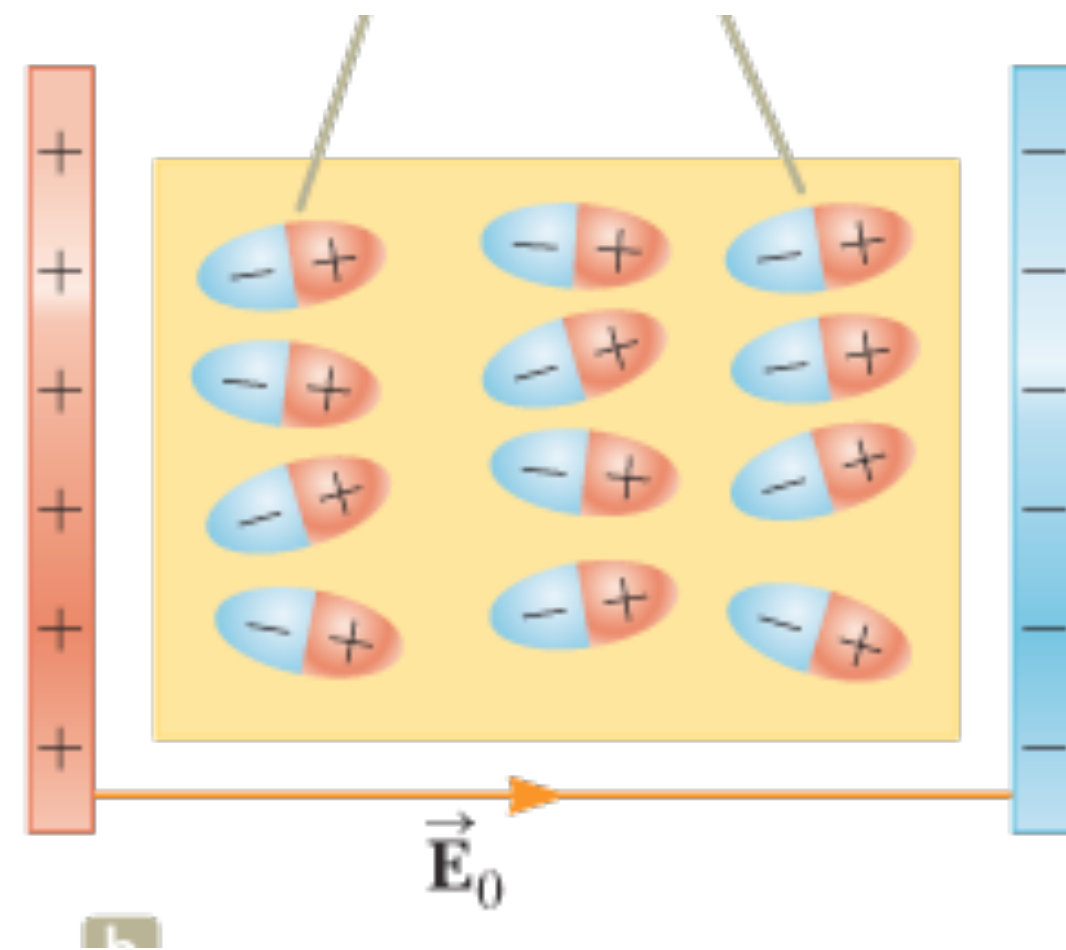
molto semplice molecola
Si orienta parzialmente
con il campo elettrico (per
agit. termica) e in media
nel tempo avrà un
momento di dipolo non nullo
nella direzione
del campo elettrico

- ✓ La tendenza sarà contrastata dall'agitazione termica per cui non tutte si orienteranno nella direzione del campo elettrico e alcune si orienteranno solo parzialmente.
- ✓ Ogni singolo dipolo avrà, in media nel tempo una componente del momento di dipolo non nulla nella direzione del campo elettrico, che indichiamo con $\langle \underline{p}_m \rangle$.
- ✓ La molecola o la sostanza formata dalle molecole polari si polarizza per orientamento.
- ✓ In questo caso valore medio del momento di dipolo $\langle \underline{P} \rangle$, eseguito su un volumetto molto piccolo, ma contenente un gran numero di molecole polari è non nullo.

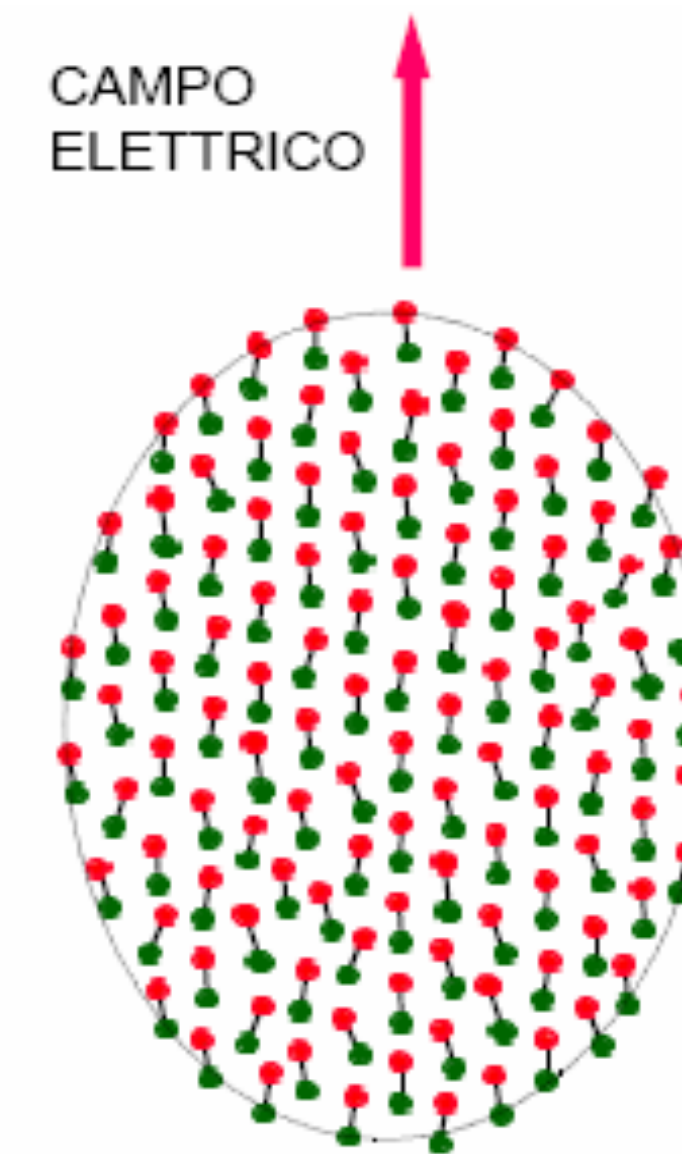
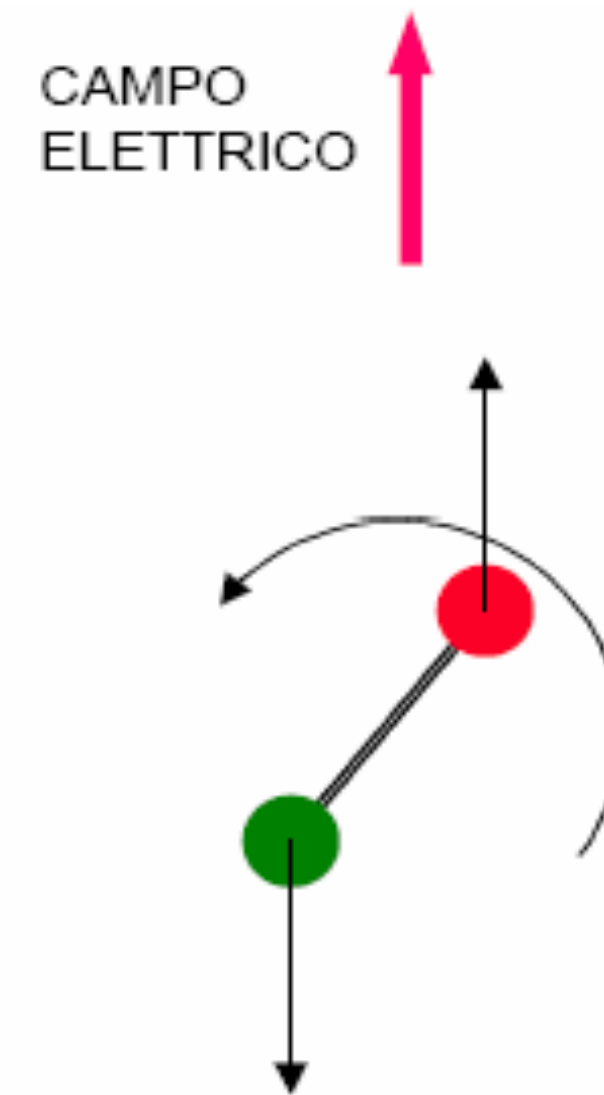
a livello microscopico, il momento di dipolo è dato anche da quella delle
molecole

Avrà allora un MOM
di dipolo
non nullo

Molecole polari in presenza di un campo elettrico esterno



ORIENTAMENTO



Campo el. mol. Polare
Locale è dato
dal campo ESTERNO
+ interno al
dipolo interno

- ✓ Nel caso di polarizzazione per orientamento, è il valor medio del momento di dipolo della singola molecola ad essere proporzionale al campo elettrico locale E_l .

$$\langle \underline{p}_m \rangle = \alpha_0 E_l$$

12 ordini
di grandezza

- ✓ Per la molecola d'acqua $\alpha_0 \cong 3 \cdot 10^{39} F \cdot m^2$ due ordini di grandezza più alto che quella per deformazione
- ✓ Esiste anche una polarizzazione per deformazione insieme a quella per orientamento ma quest'ultima è in genere dominante.

è la costante molare
del mom di dip. ed essere
prop. ad E_l

$$P_{\text{d. defocus}} = \alpha_0 \bar{E} \ell$$

$$P_{\text{d. strain}} = \langle \underbrace{P_m}_{\text{average mode}} \rangle = \alpha_0 \bar{E} \ell$$

comp. electron localp