

Fisica Generale III con Laboratorio

Campi elettrici e magnetici nella materia

Lezione 3

Polarizzazione permanente

Formula di Langevin - I

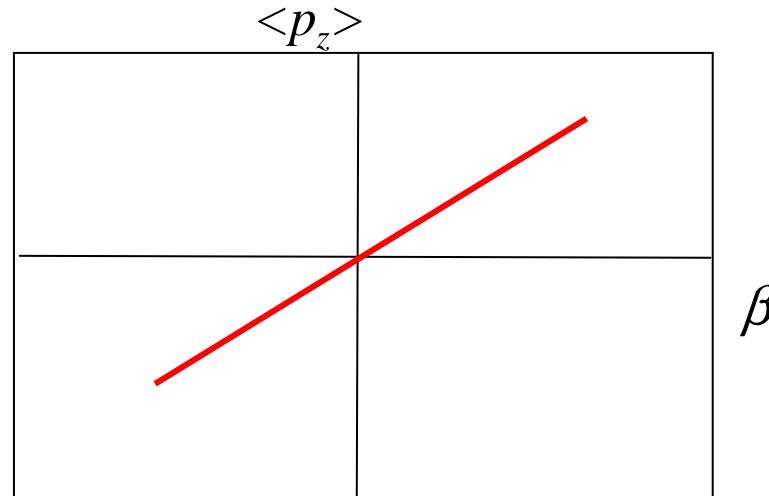
Polarizzazione per orientamento: Molecole polari

Relazione approssimata fra mom. di dipolo medio e campo elettrico:

$$\langle p_z \rangle \simeq \frac{p^2 E}{3kT} = p \frac{1}{3\beta}$$

Valida quando

$$\beta = \frac{pE}{kT} \ll 1 \quad \rightarrow \quad \text{En. elettrostatica} \ll \text{En. termica}$$

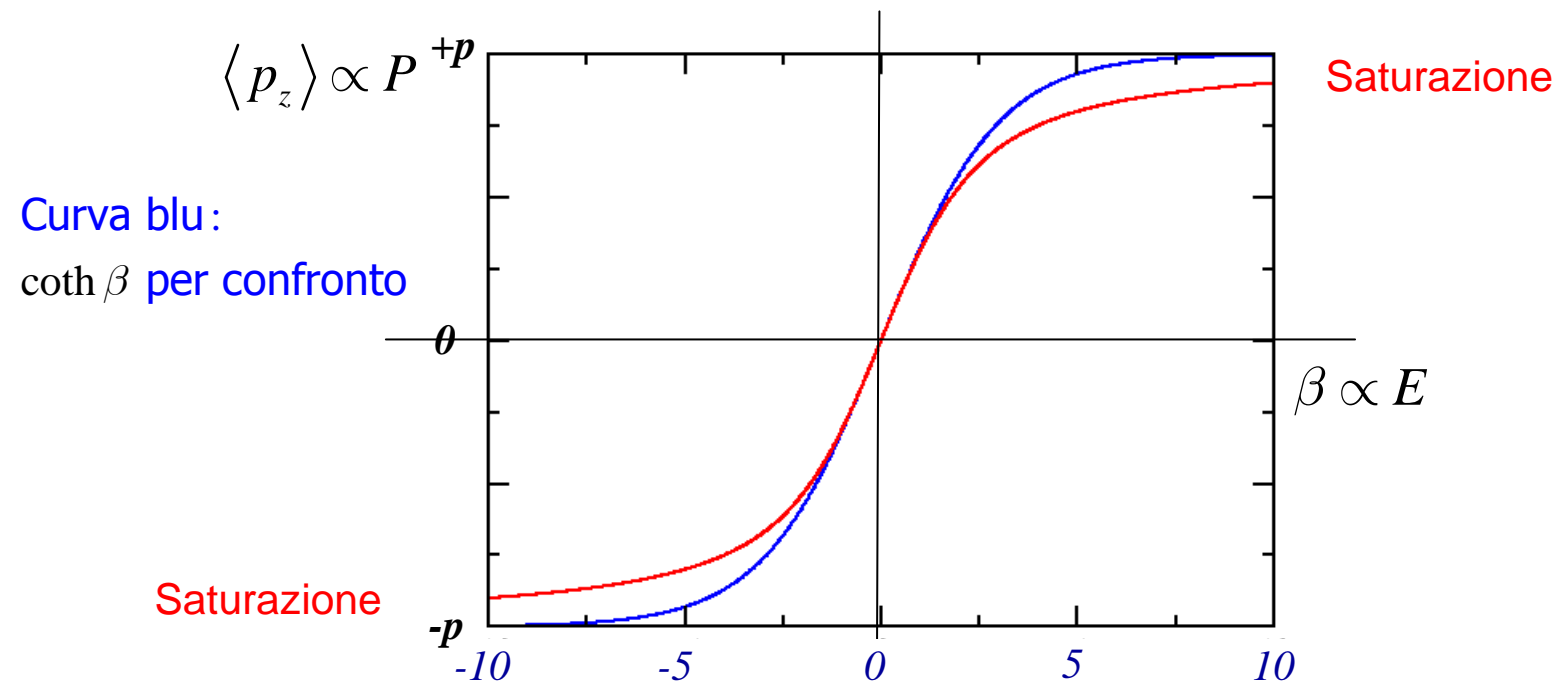


Formula di Langevin - II

Formula corretta, senza approssimazioni:

Mom. di dipolo medio e campo elettrico:

$$\langle p_z \rangle = p \left(\frac{e^\beta + e^{-\beta}}{e^\beta - e^{-\beta}} - \frac{1}{\beta} \right) = p \left(\coth \beta - \frac{1}{\beta} \right), \quad \beta = \frac{pE}{kT} \quad \text{Funzione di Langevin}$$



Polarizzazione permanente, etc

Elettreti:

Polarizzazione permanente
(analoghi ai magneti permanenti)

Materiali ferroelettrici:

Relazione piu' complicata fra P e E
(ciclo di isteresi, polarizzazione spontanea)

[Non discussi:

Materiali piezoelettrici: Polarizzazione da deformazione meccanica

Materiali piroelettrici, antiferroelettrici,]

Elettreti

Proprietà analoghe a quelle dei magneti:
Polarizzazione permanente

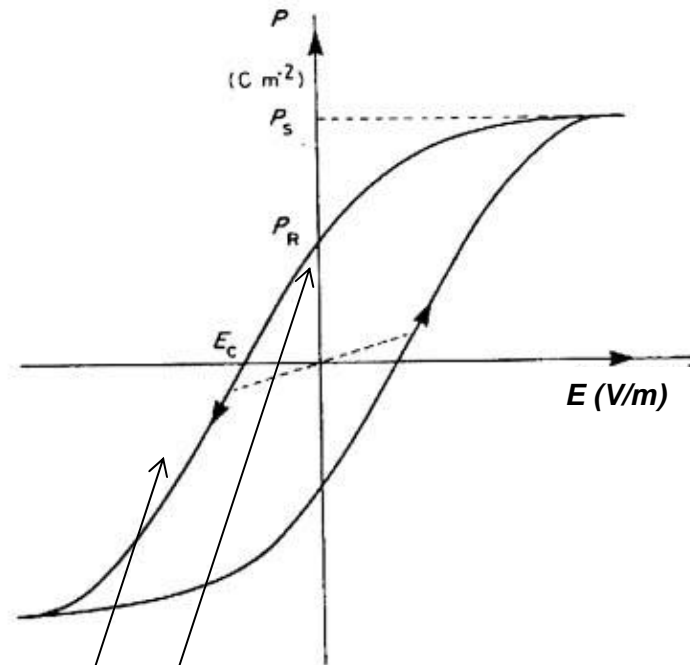
Origine diversa:

Sostanzialmente, tipi di cere costituite da grosse molecole polari
Lasciate solidificare in presenza di un campo elettrico esterno, sviluppano una polarizzazione permanente a causa dei vincoli strutturali agenti sulle molecole all'interno del solido

Applicazioni limitate
(Microfoni, misuratori di Radon,..)

Ferroelectrici - I

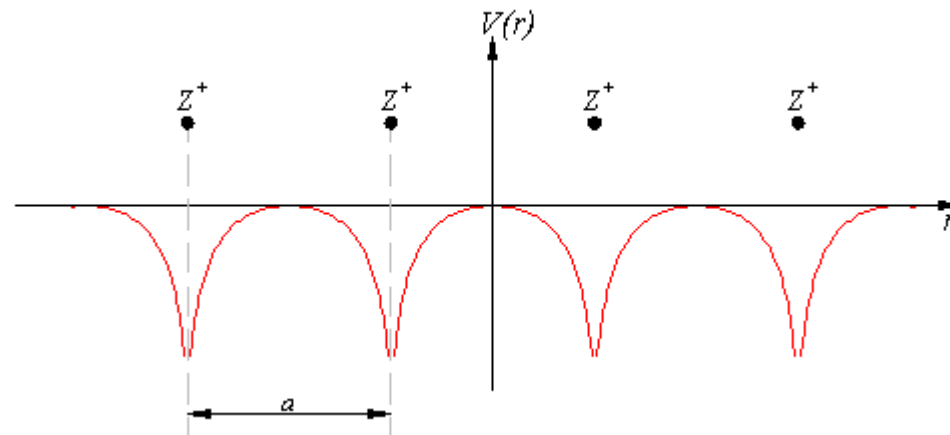
Relazione fra P ed E per un ferroelettrico:



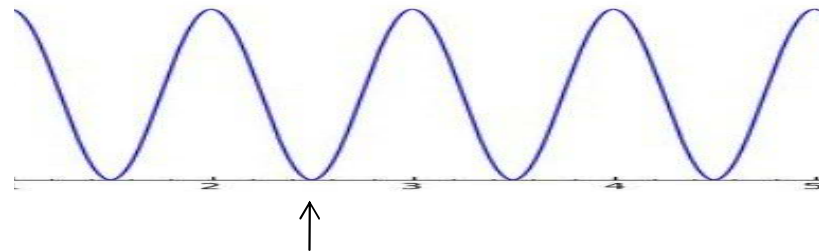
- 1) Relazione non 1-1 fra P ed E : Ciclo di isteresi
- 1) Polarizzazione spontanea anche se $E = 0$

Ferroelectrici - II

Potenziale 'coulombiano' periodico nel reticolo cristallino:



Sviluppo in serie di Fourier, prima approssimazione:

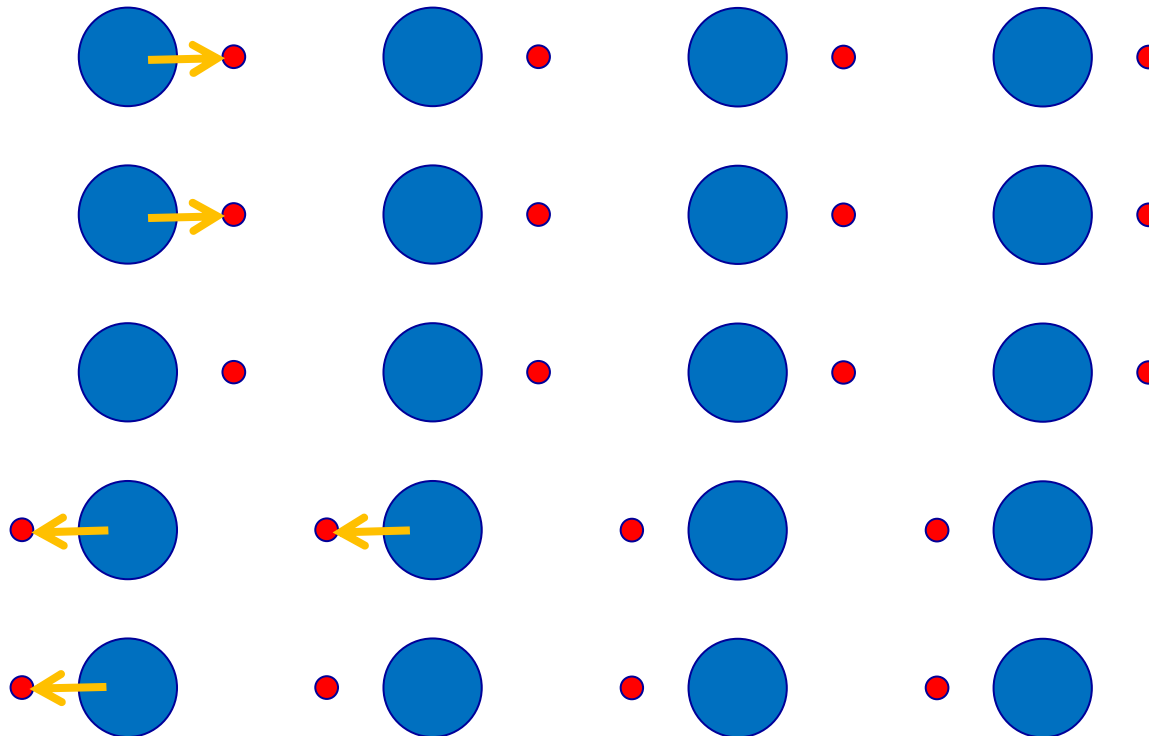


Vicino ai minimi, andamento parabolico \rightarrow Osc. armonico

Ferroeletttrici - III

Reticolo ionico a bassa simmetria: doppia possibilita' di posizione relativa

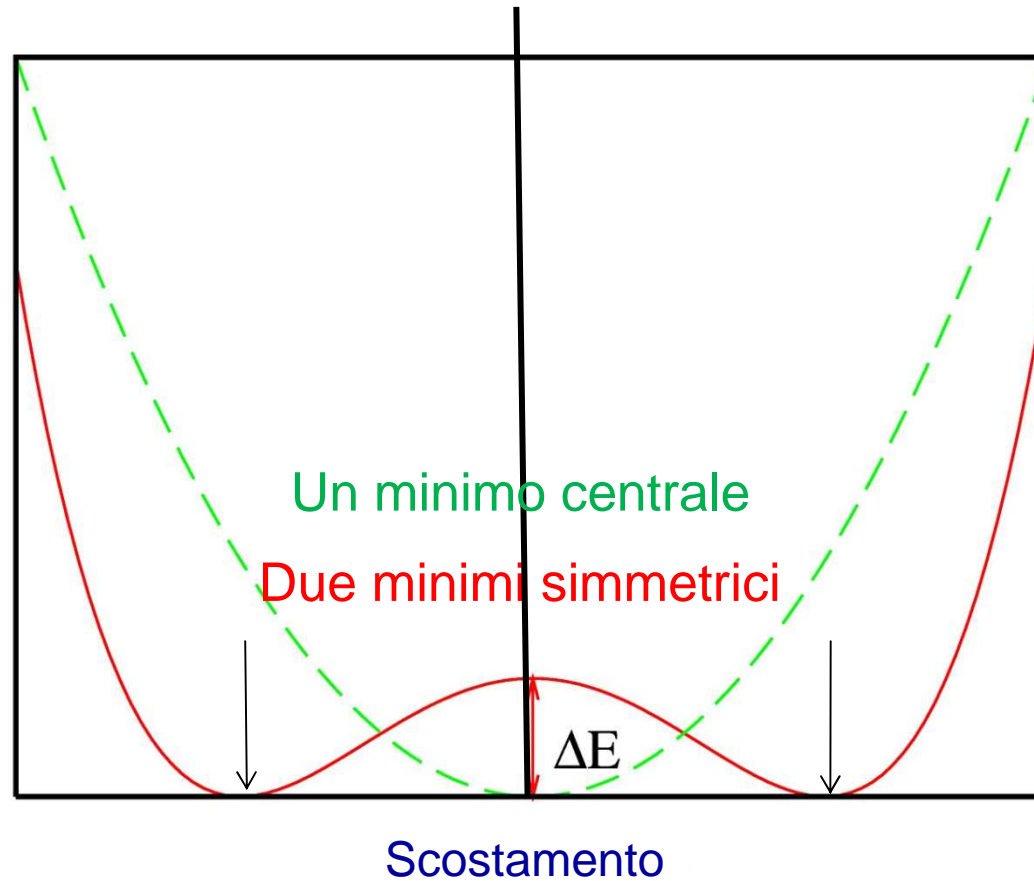
→ Modello semplice: *dipoli ionici*



Ferroelectrici - IV

A causa della (a)simmetria del reticolo cristallino, ora non c'è una sola posizione di equilibrio per ogni ione, ma due

Energia elettrostatica



Ferroelectrici - V

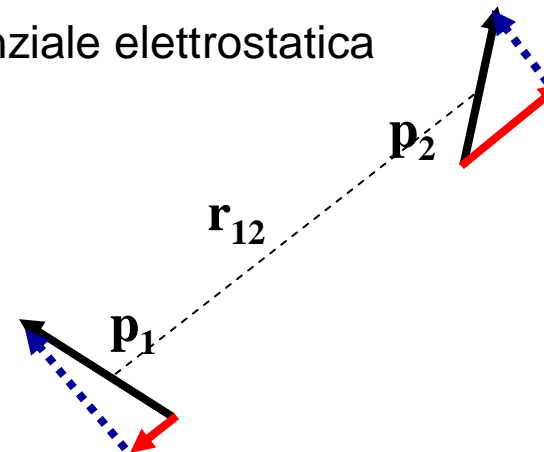
Tendenza dei dipoli ad assumere la stessa direzione:
Conseguenza dell'interazione dipolo-dipolo (non dimostrata)

$$U(r_{12}) = C \frac{1}{r_{12}^3} \left[\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 - \frac{3(\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{r}_{12})(\mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{r}_{12})}{r_{12}^2} \right] \text{ En. potenziale elettrostatica}$$

$$\mathbf{p}_1 = p_{1\parallel} \hat{\mathbf{r}}_{12} + \mathbf{p}_{1\perp}$$

$$\mathbf{p}_2 = p_{2\parallel} \hat{\mathbf{r}}_{12} + \mathbf{p}_{2\perp}$$

$$\rightarrow U(r_{12}) = C \frac{1}{r_{12}^3} \left[\mathbf{p}_{1\perp} \cdot \mathbf{p}_{2\perp} - \frac{2p_{1\parallel} p_{2\parallel}}{r_{12}^2} \right]$$



En. potenziale negativa \rightarrow Forza attrattiva

$p_{1\perp}, p_{2\perp}$ discordi (peso = 1)

$p_{1\parallel}, p_{2\parallel}$ concordi (peso = 2) \rightarrow Dominante

Energia minima \leftrightarrow *Tutti i dipoli puntano nella stessa direzione*

Ferroelectrici - VI

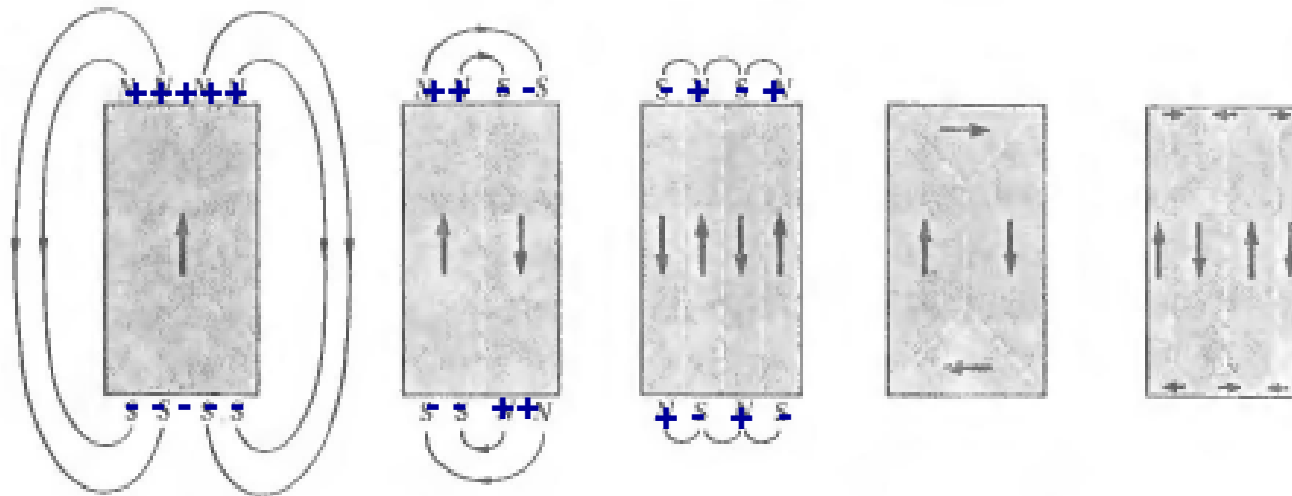
In generale: stato polarizzato piu' stabile di quello non polarizzato

→ *Polarizzazione spontanea*, in assenza di campo polarizzante

Configurazione della polarizzazione nel campione:

Quella che minimizza l'energia totale

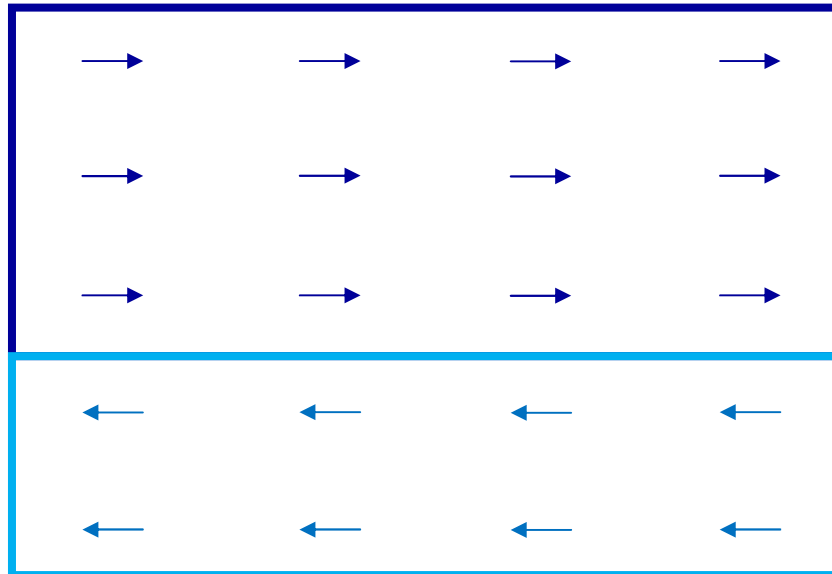
Differenza fra configurazioni dominata da *en. elettrostatica esterna*



Configurazione con diversi *domini* favorita

Ferroelectric - VII

Quindi: *energeticamente favorita* la formazione di *domini*:
regioni di solido con polarizzazione uniforme



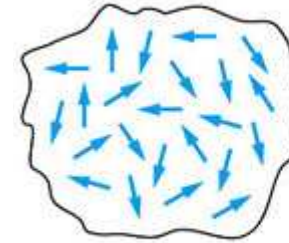
Origine della struttura a domini: interazione dipolo-dipolo, natura elettromagnetica

Ferroelettrici - VIII

T_c *Temperatura critica, o T. di Curie*

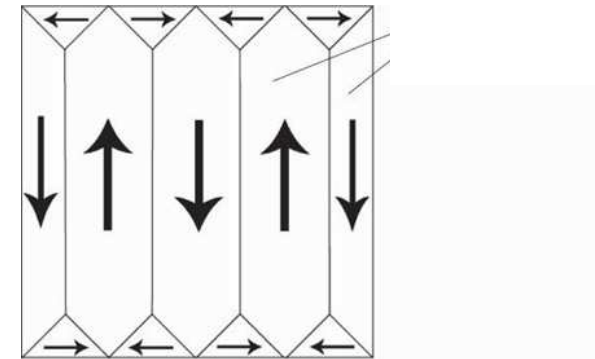
In assenza di campi polarizzanti:

Sopra T_c , polarizzazione *nulla*



Sotto T_c , polarizzazione *non nulla*:
energeticamente favorita

→ Polarizzazione spontanea
Struttura a domini



Polarizzazione totale di un campione: ??
Dipende dalla sua storia passata...

Ciclo di isteresi - I

$P(1) = 0, E(1) = 0$

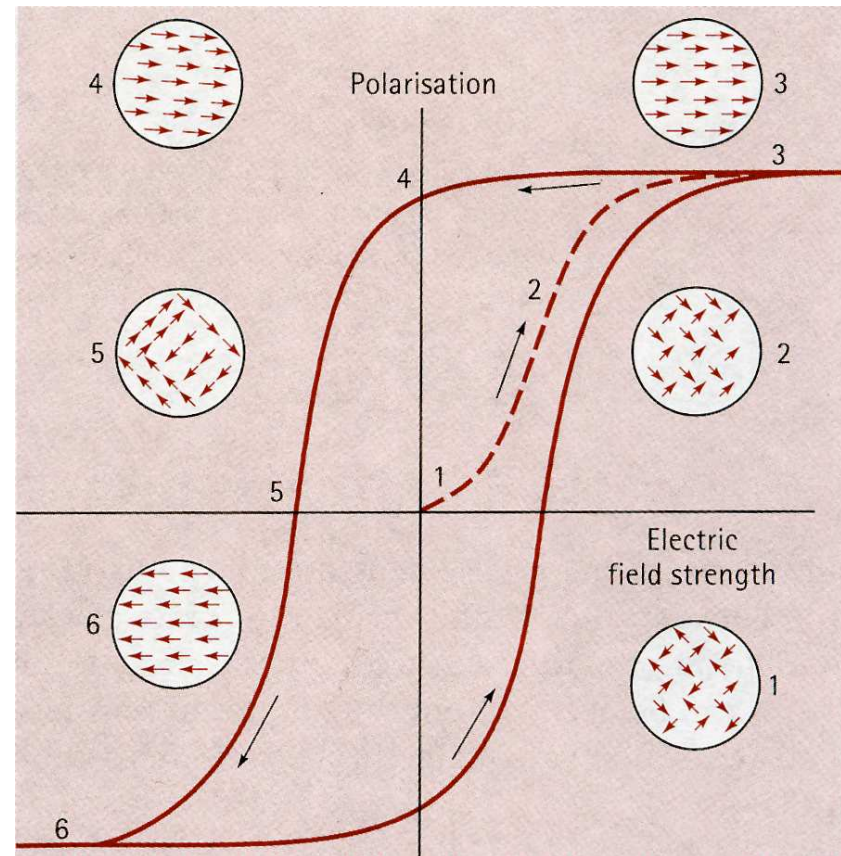
$P(2)$ non lineare in E

$P(3)$ saturazione

$P(4)$ polarizzazione spontanea

$E(5)$ campo coercitivo

$P(6)$ saturazione (opposta)



Ciclo di isteresi - II

Esempio: dati sperimentali

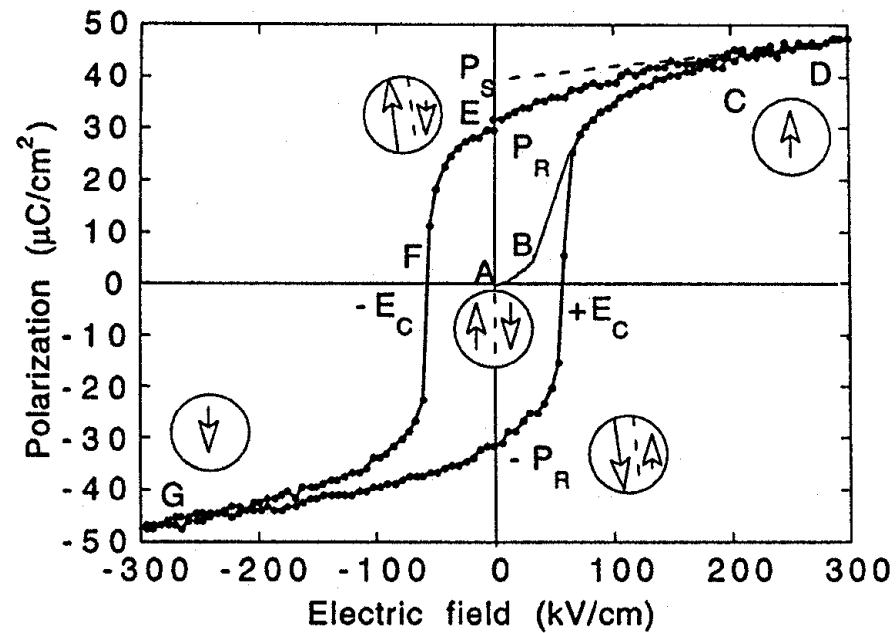
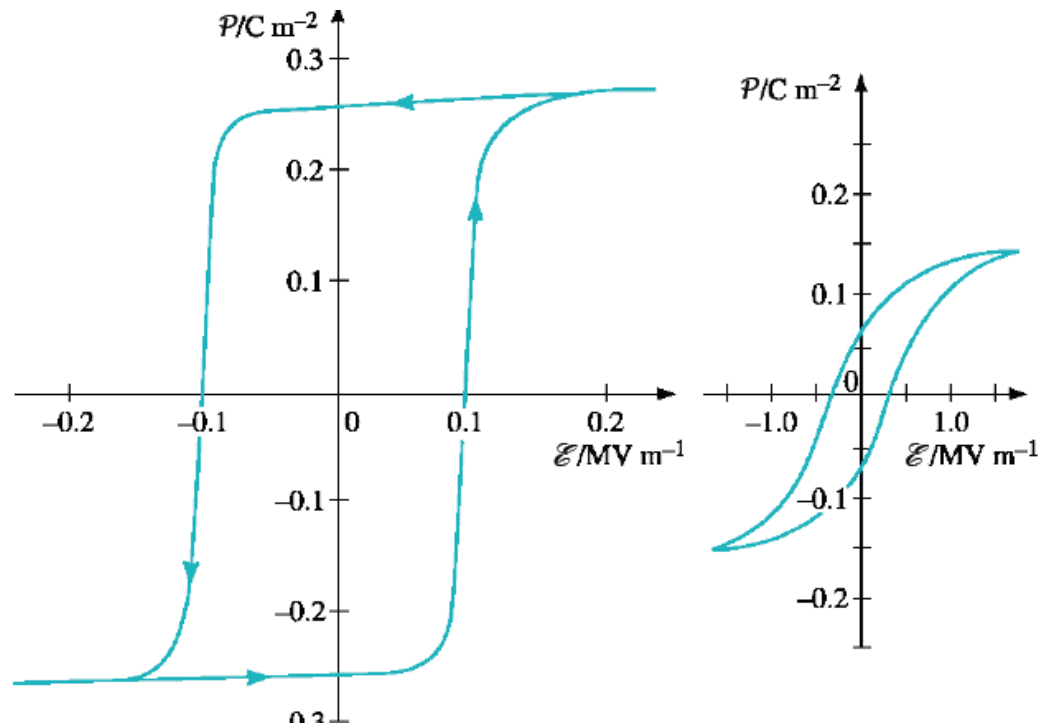


Figure 8. Ferroelectric (P - E) hysteresis loop. Circles with arrows represent the polarization state of the material at the indicated fields. The symbols are explained in the text. The actual loop is measured on a (111)-oriented $1.3 \mu\text{m}$ thick sol-gel $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55})\text{O}_3$ film. (Experimental data courtesy of D V Taylor.)

Ciclo di isteresi - III

Ba Ti O₃: effetto dello stato macroscopico



Monocristallo

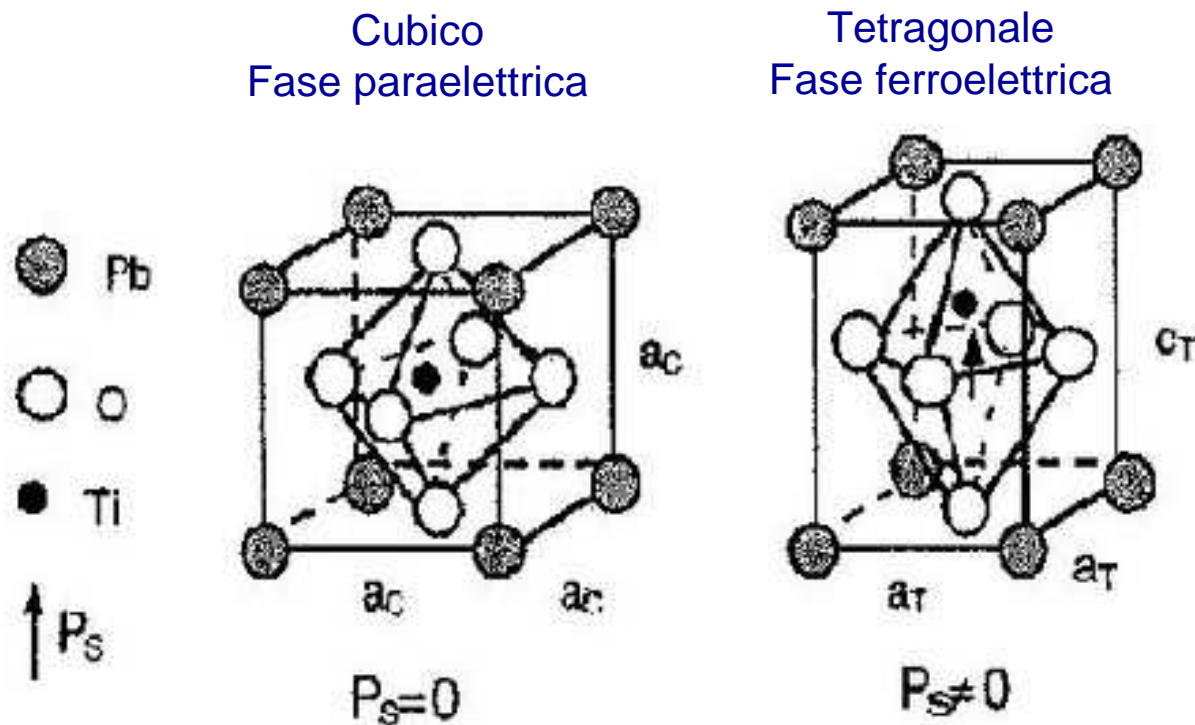
Policristallino

BaTiO₃ - I

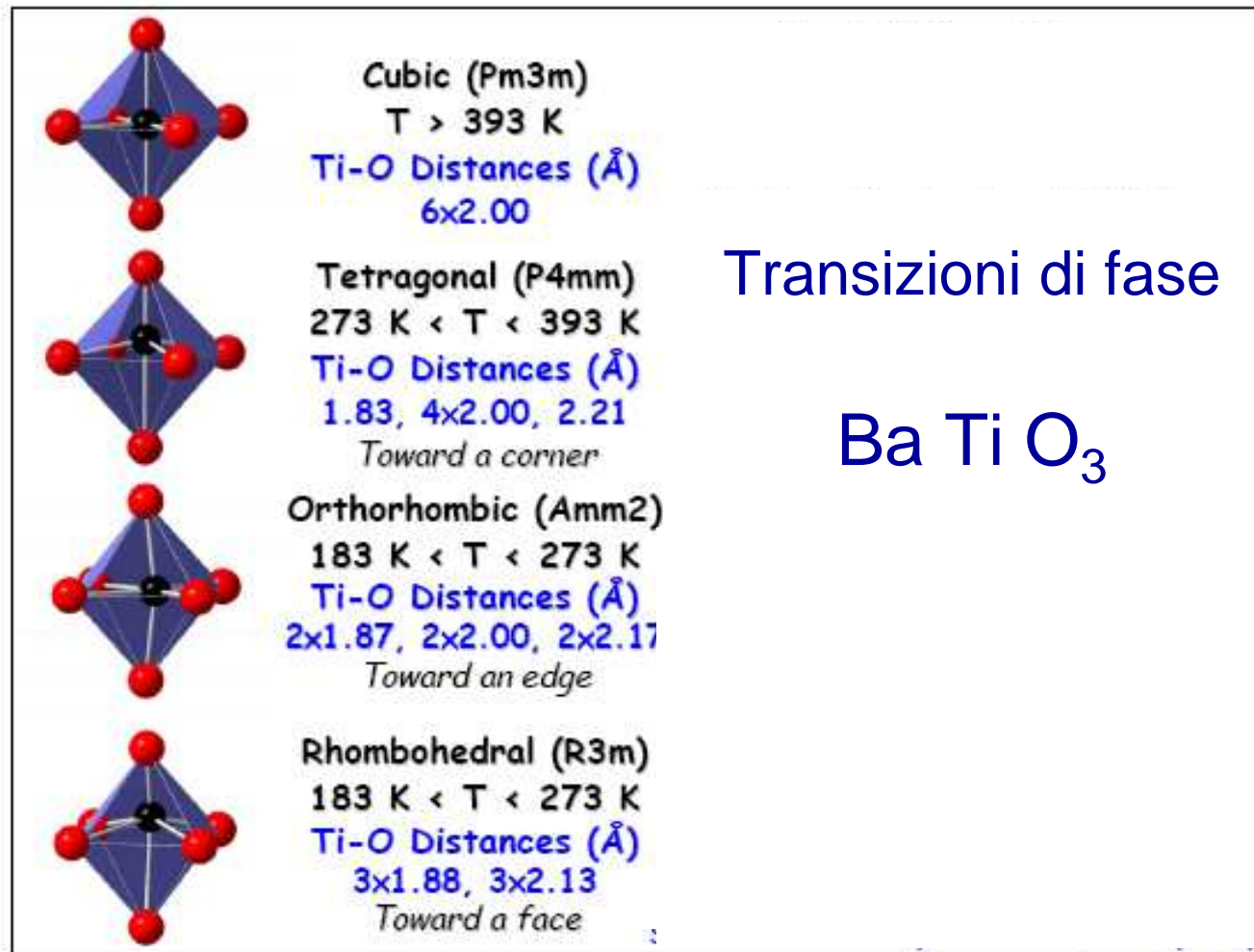
Esempio realistico: titanati

Diversa struttura cristallina a T diverse: transizioni di fase

Es. PbTiO₃



BaTiO₃ - II



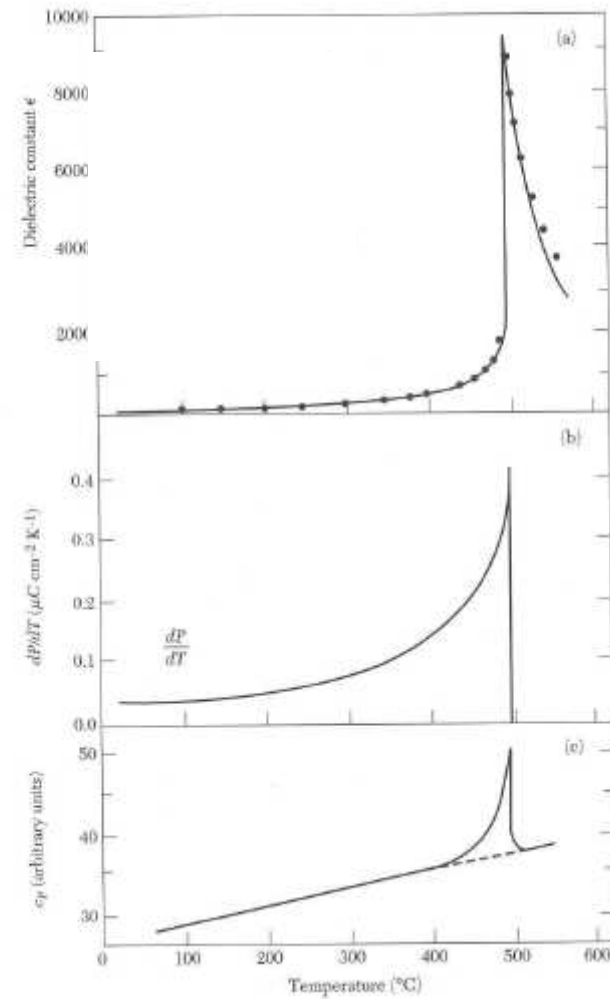
BaTiO₃ - III

BaTiO₃: Transizione di fase

Costante dielettrica

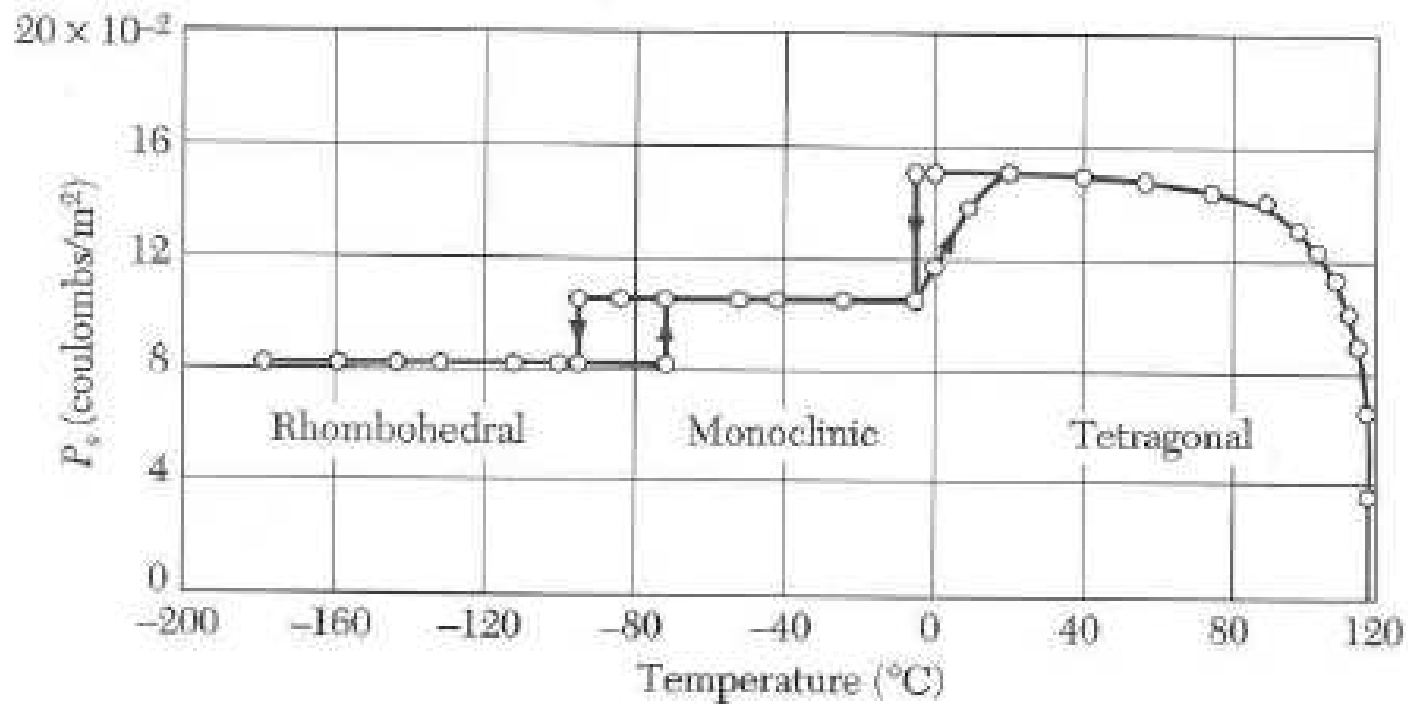
dP/dT

Calore specifico



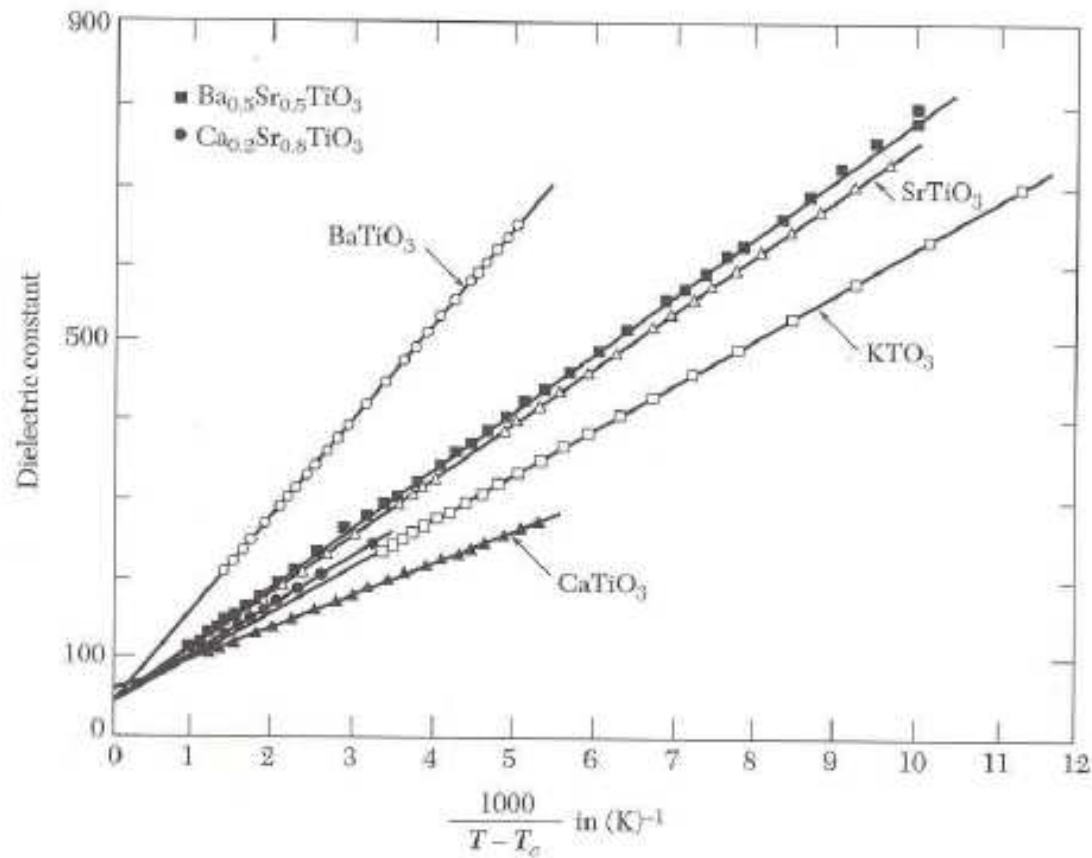
BaTiO₃ - IV

Polarizzazione spontanea vs T

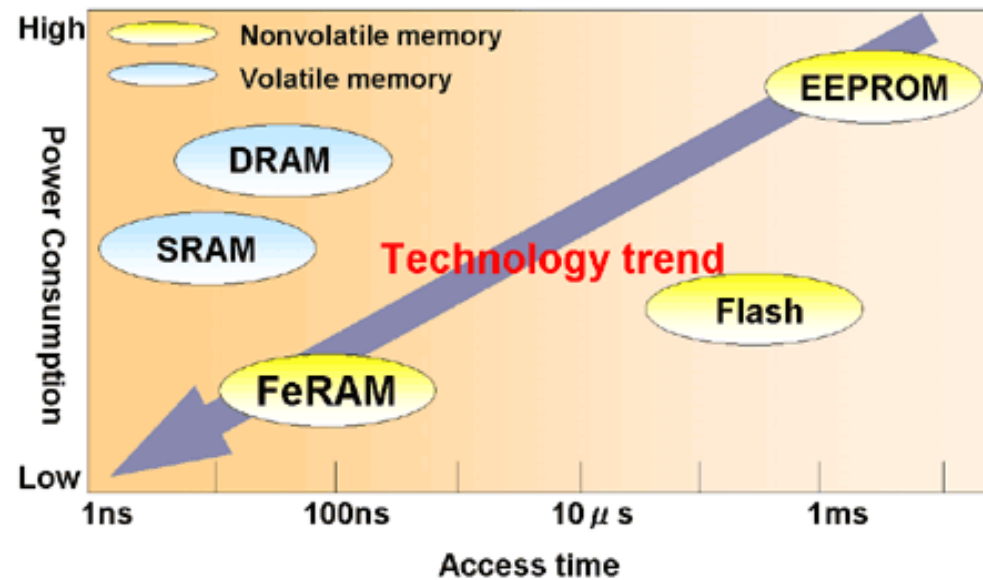


Legge di Curie-Weiss

Foto di famiglia



Applicazioni: RAM non volatili



Usate in smart card



Applicazioni: RAM dinamiche

Costante dielettrica molto grande vicino alla transizione di fase

Condensatori ad alta capacita' e piccole dimensioni

→Elevata integrazione, tipo Flash DRAM

Rispetto a memorie Flash:

- Minor consumo

- Maggior persistenza

- Piu' elevato numero di cicli di read/write

