



Università degli Studi di Pavia  
Facoltà di Ingegneria

# Principi e Applicazioni di Elettrotecnica

## Esposizione al campo elettromagnetico

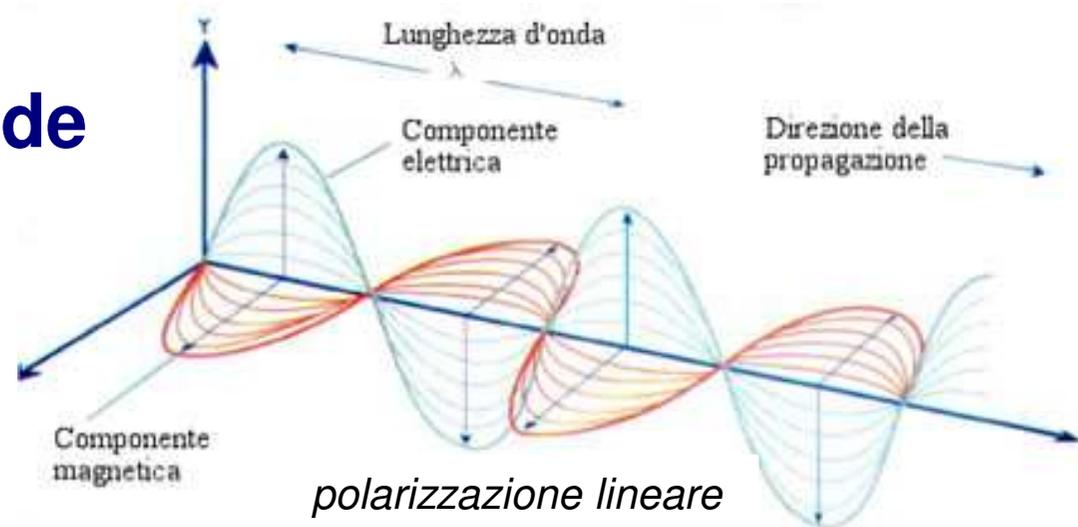


# ■ INTRODUZIONE

## In alta frequenza: propagazione per onde

$$v = \lambda f$$

$$E / H = Z_0 = 377 \Omega$$



$$\bar{\nabla} \cdot \bar{D} = \rho$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J}_0 + \sigma \bar{E} + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}$$

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_E)$$

$$B_x = B_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_B)$$

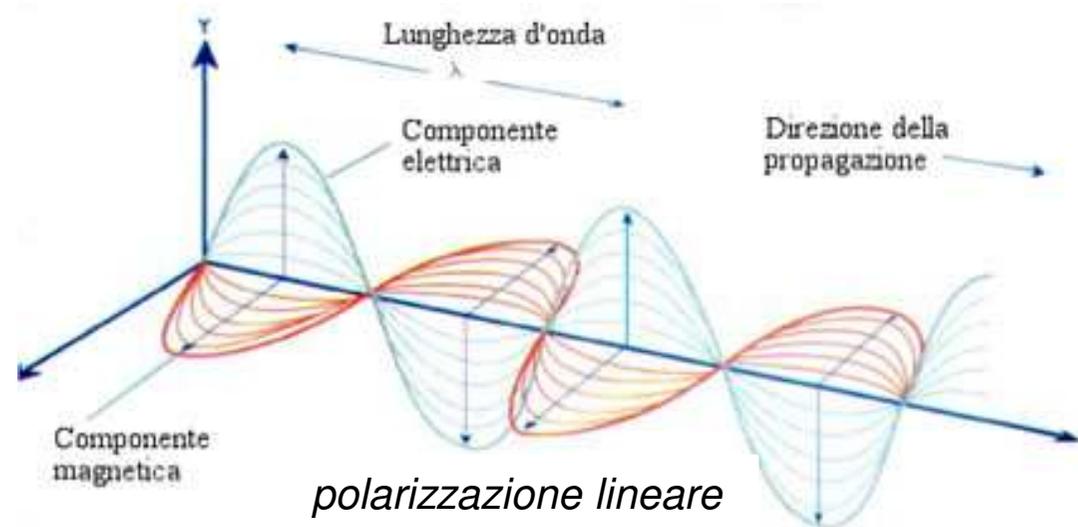
Equazioni di Maxwell



campo  
elettromagnetico



# Campo elettromagnetico



Velocità di propagazione

$$v = \lambda f$$

Impedenza del mezzo

$$E / H = Z_0 = 377 \Omega$$

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_E)$$

$$B_x = B_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_B)$$

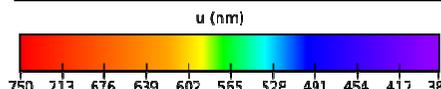


# INTRODUZIONE

## Lo spettro elettromagnetico

**Frequenze radio (Italia)**  
 FM: 87,5MHz - 108 MHz  
 AM: 500kHz ~ 1,5 MHz  
 Radioamatori:  
 144MHz - 146MHz  
 Trasmissioni forze armate:  
 30MHz-300MHz

Violetto	380-450nm	Giallo	570-590nm
Blu	450-495nm	Arancione	590-620nm
Verde	495-570nm	Rosso	620-750nm



$E=12.9$  eV media pesata di elementi che formano tessuti umani

ELF	SLF	ULF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF
3Hz	30Hz	300Hz	3kHz	30kHz	300kHz	3MHz	30MHz	300MHz
30Hz	300Hz	3kHz	30kHz	300kHz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz

ELF: Extremely Low Frequency  
 SLF: Super Low Frequency  
 ULF: Ultra Low Frequency  
 VLF: Very Low Frequency  
 LF: Low Frequency  
 MF: Medium Frequency  
 HF: High Frequency  
 VHF: Very High Frequency  
 UHF: Ultra High Frequency

**SPETTRO ONDE RADIO**

**LUCE VISIBILE**  
(400nm - 700nm)

$E_{lim}=12$  eV =  $1.9 \cdot 10^{-18}$  J

$E=h f=4.1 \cdot 10^{-15} f$   
 $f_{lim}=3 \cdot 10^{15}$  Hz

**Non-Ionizing Radiations NIR**

**TELEFONI MOBILI**  
 GSM: 900-1900MHz  
 Banda Uplink Downlink (MHz) (MHz)  
 GSM 900 890 - 915 930 - 960  
 GSM 900 870 - 915 921 - 960  
 GSM 1800 1710-1785 1805-1880  
 GSM 1900 1850 1910 1930 1990  
 UIM 1x/HSRPA:  
 Downlink: 2.10-2.200MHz  
 Uplink: 1.875-2.075MHz

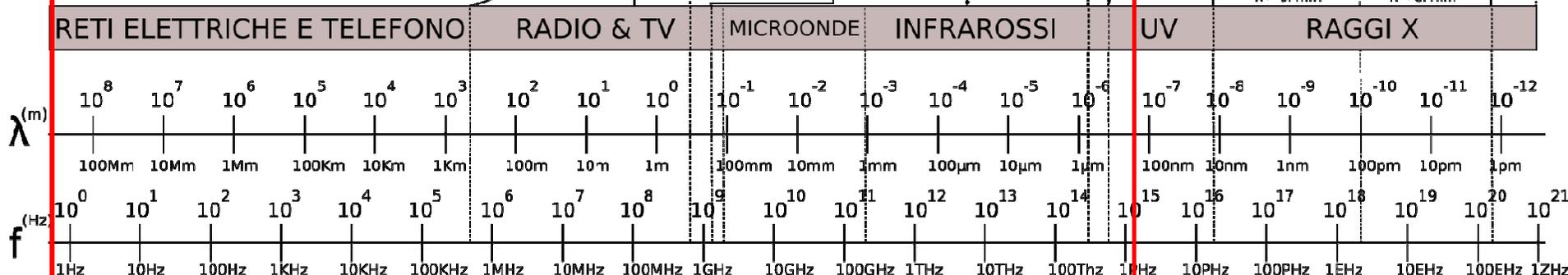
IR vicino [NIR]:  
 700/750nm - 5µm  
 IR medio:  
 75µm - 25/40µm  
 IR lontano [FIR]:  
 25/40µm - 200/350µm

UV-A:  
 400-315nm  
 UV-B:  
 315-280nm  
 UV-C:  
 280-10nm

RAGGI X MOLLI  
 $\lambda > 0.1$ nm

RAGGI X DURI  
 $\lambda < 0.1$ nm

RAGGI GAMMA





# ■ INTRODUZIONE

## Lo spettro elettromagnetico

Sorgente	Lunghezza d'onda	Frequenza
Elettrodotti	6000 km	50 Hz
Radio AM	300 m	1 MHz
Radio FM	3 m	88 - 108 MHz
Televisioni VHF	1 - 6 m	47 - 230 MHz
Televisioni UHF	35 - 60 cm	470 - 862 MHz
SRB GSM	30 cm	900 - 960 MHz
SRB UMTS	15 cm	2000 - 2170 MHz
SRB 4G	11.5 - 16.7 - 37.5 cm	800 - 1800 - 2600 MHz
Ponti radio	1 - 15 cm	2 - 30 GHz
Radar	< 1 cm	> 30 GHz

*Caso LTE*  
*800 MHz*  
*1800 MHz*  
*2000 MHz*  
*2600 MHz*



## ■ LEGISLAZIONE

### Limiti, valori di attenzione ed obiettivi di qualità

- **D.P.C.M. 8 luglio 2003** *“Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai **campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz)** generati dagli elettrodotti”*
- **D.P.C.M. 8 luglio 2003** *“Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a **campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz**”*



## ■ LEGISLAZIONE

### D.P.C.M. 8 luglio 2003 – GU 200/03

**Limite di esposizione:** valore del campo magnetico o elettrico da non superare in alcuna condizione di esposizione della popolazione, ai fini della tutela della salute da effetti acuti.

$$B < 100 \mu\text{T}$$

$$E < 5 \text{ kV/m}$$

**Nota** - ICNIRP 1998:  $B < 100 \mu\text{T}$ ,  $E < 5 \text{ kV/m}$   
ICNIRP 2010:  $B < 200 \mu\text{T}$ ,  $E < 5 \text{ kV/m}$



## ■ LEGISLAZIONE

### D.P.C.M. 8 luglio 2003 – GU 200/03

**Valore di attenzione:** valore del campo elettrico o magnetico, considerato come valore di immissione, da non superare nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere.

**$B < 10 \mu T$**  da intendersi come mediana nell'arco delle 24 ore, nelle normali condizioni di esercizio dell'elettrodotto



## ■ LEGISLAZIONE

### **D.P.C.M. 8 luglio 2003 – GU 200/03**

**Obiettivi di qualità:** criteri da rispettare per quanto riguarda la progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e la progettazione di nuovi insediamenti, e di nuove aree di cui sopra, in prossimità di installazioni elettriche già presenti nel territorio.

**$B < 3 \mu T$**  da intendersi come mediana nell'arco delle 24 ore, nelle normali condizioni di esercizio dell'elettrodotto



## ■ LEGISLAZIONE

### D.P.C.M. 8 luglio 2003 – GU 199/03

I limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità devono essere mediati su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su qualsiasi intervallo di sei minuti.

**Aggiornamento: Decreto legge n. 179 del 12/10/2012**

**Limite di esposizione:** valore del campo elettrico, magnetico o elettromagnetico da non superare in alcuna condizione di esposizione della popolazione, ai fini della tutela della salute da effetti acuti. Le misure devono essere mediate su qualsiasi intervallo di sei minuti e **rilevate ad altezza pari a 1,5 m.**

Frequenza	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di Potenza D (W/m <sup>2</sup> )
$0,1 < f \leq 3$ MHz	60	0,2	-
$3 < f \leq 3000$ MHz	20	0,05	1
$3 < f \leq 300$ GHz	40	0,1	4



## ■ LEGISLAZIONE

### D.P.C.M. 8 luglio 2003 – GU 199/03

**Valore di attenzione:** valore del campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico da non superare a titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine eventualmente connessi con le esposizioni ai campi generati alle suddette frequenze all'interno di edifici adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, e loro pertinenze esterne, che siano fruibili come ambienti abitativi quali balconi, terrazzi e cortili esclusi i lastrici solari.

Le misure devono essere mediate su qualsiasi intervallo di 24 ore e rilevate ad altezza pari a 1,5 m.

Frequenza	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo Magnetico H (A/m)	Densità di Potenza D (W/m <sup>2</sup> )
0,1 MHz < f ≤ 300 GHz	6	0,016	0,10 (3 MHz - 300 GHz)

Valido anche ai fini di protezione da effetti a lungo termine



## ■ LEGISLAZIONE

### D.P.C.M. 8 luglio 2003 – GU 199/03

**Obiettivi di qualità** : criteri da rispettare ai fini della progressiva minimizzazione della esposizione ai campi elettromagnetici, calcolati o misurati all'aperto nelle aree intensamente frequentate. Per aree intensamente frequentate si intendono anche superfici edificate ovvero attrezzate permanentemente per il soddisfacimento di bisogni sociali, sanitari e ricreativi. **Le misure devono essere mediate su qualsiasi intervallo di 24 ore e rilevate ad altezza pari a 1,5 m.**

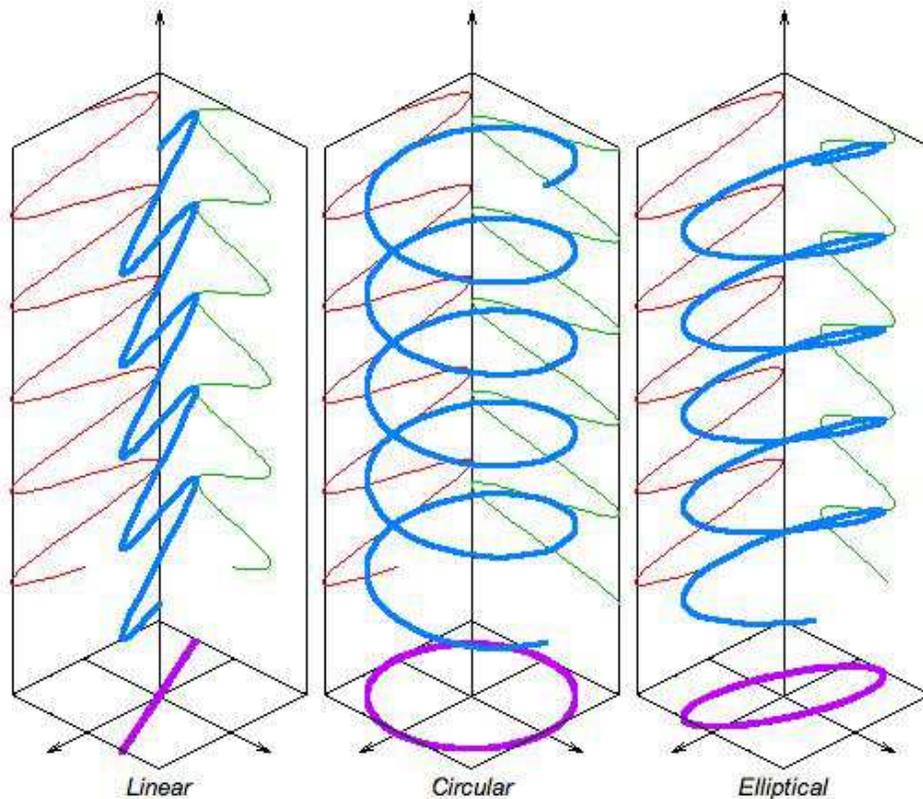
<b>Frequenza</b>	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo Magnetico H (A/m)	Densità di Potenza D (W/m <sup>2</sup> )
0,1 MHz < f ≤ 300 GHz	6	0,016	0,10 (3 MHz - 300 GHz)

**Tecniche di misurazione e di determinazione dei livelli d'esposizione** : norma CEI 211-7, data pubblicazione 2001-01, “Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell’intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all’esposizione umana” e successivi aggiornamenti.



# ■ INTRODUZIONE

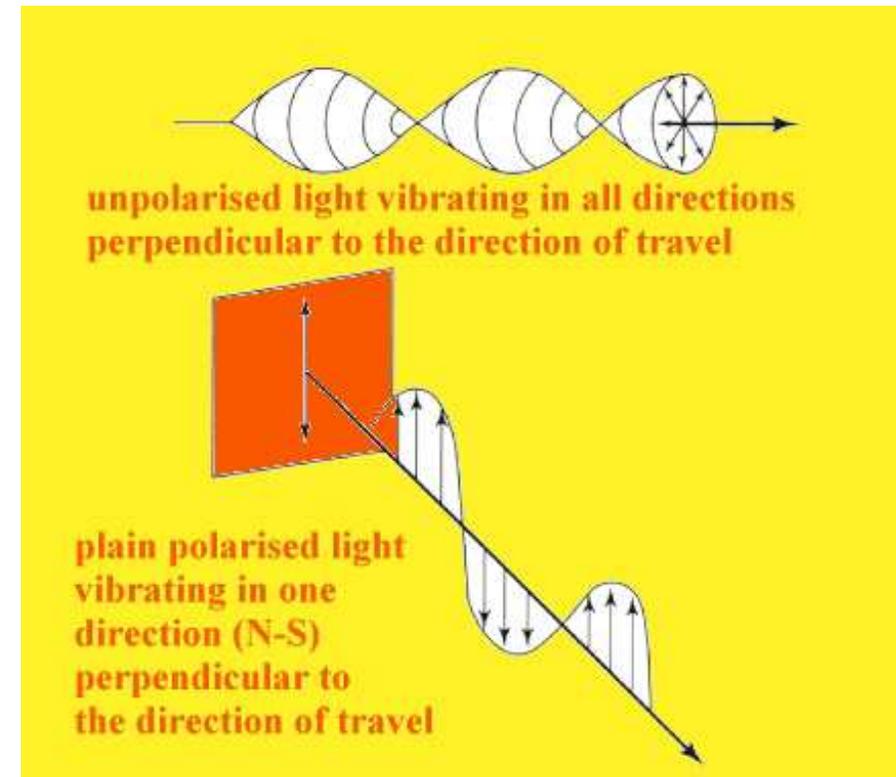
## La polarizzazione



$$\varphi = 0^\circ$$

$$\varphi = 90^\circ$$

$$\varphi = 90^\circ$$



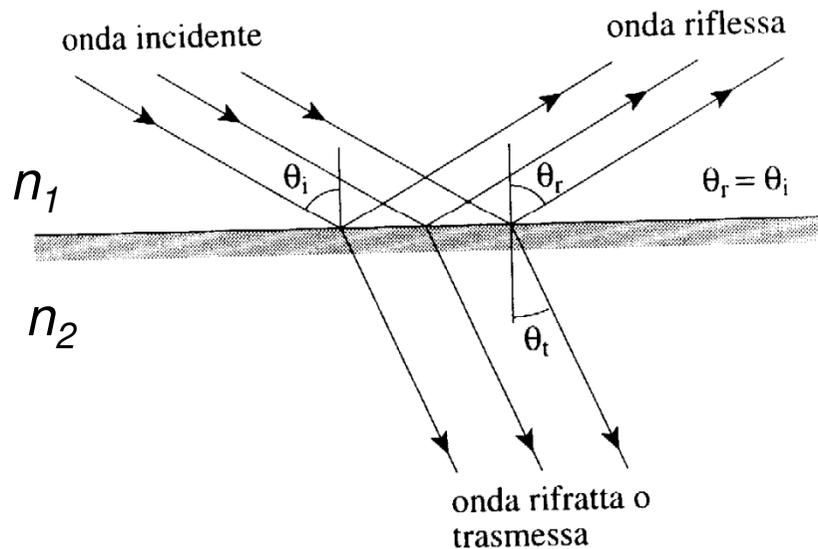
unpolarised light vibrating in all directions perpendicular to the direction of travel

plain polarised light vibrating in one direction (N-S) perpendicular to the direction of travel



# ■ INTRODUZIONE

## Onda riflessa e rifratta



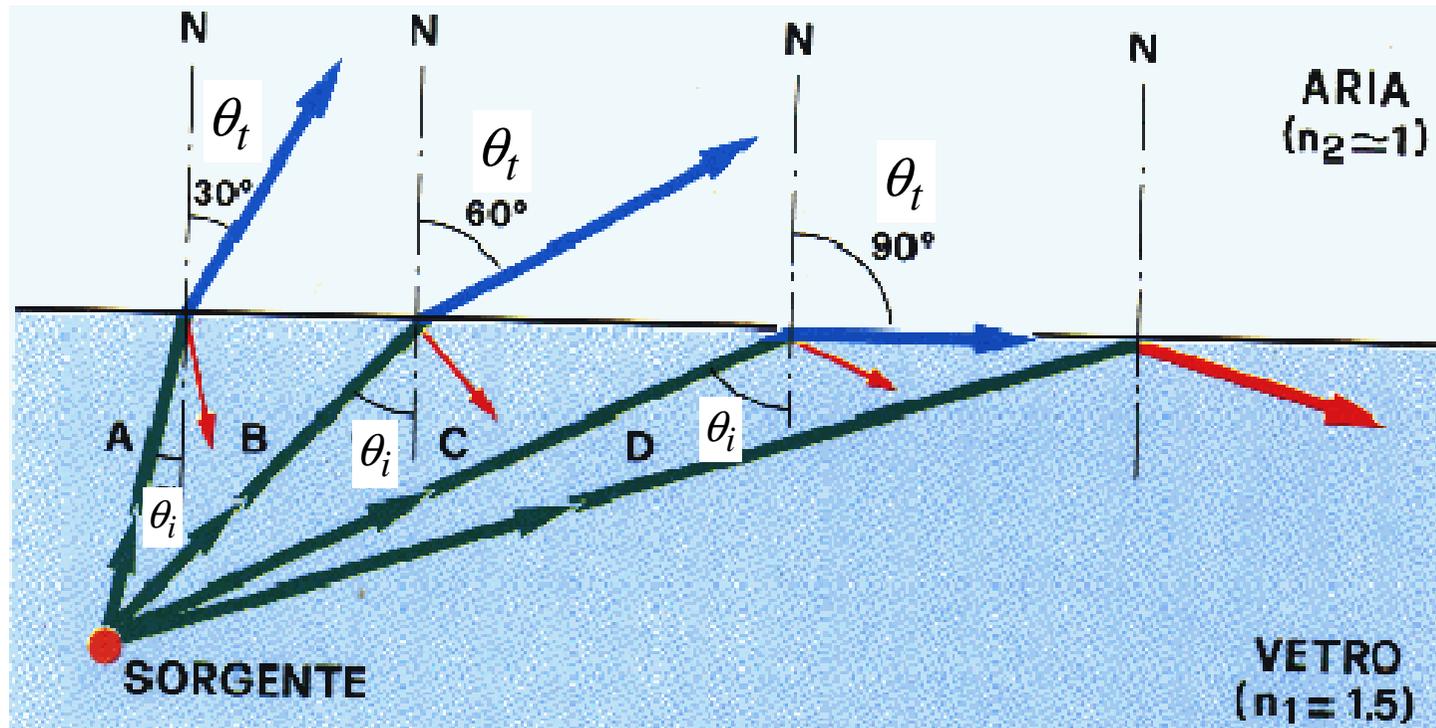
$$\theta_i = \theta_r$$

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{Legge di Snell}$$



## ■ INTRODUZIONE

### Onda riflessa e rifratta



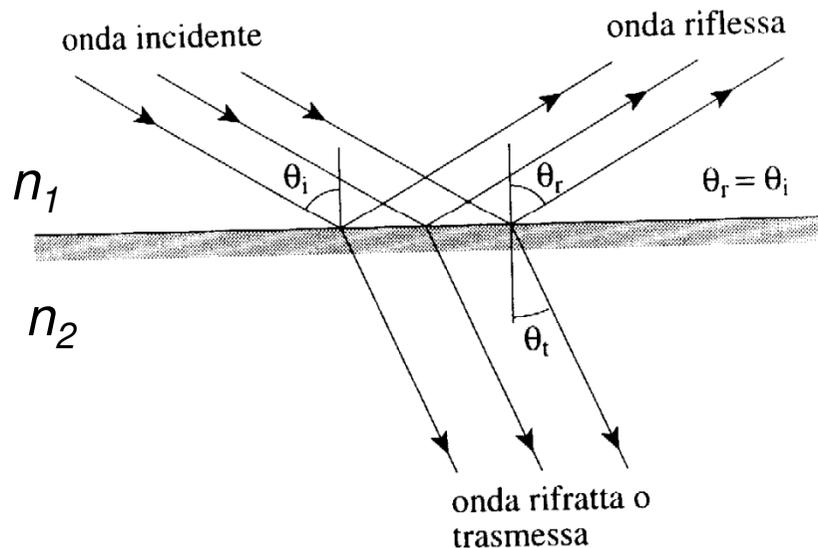
$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} \quad \theta_t = 90^\circ \quad \rightarrow \quad \theta_i = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \text{Angolo limite}$$



# ■ INTRODUZIONE

## Onda riflessa e rifratta

*in approssimazione di onda piana, campo E parallelo al piano di incidenza*



$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad \text{Coefficiente di riflessione}$$
$$|\Gamma| < 1$$

$$\text{se } \theta_i = 0 \quad \Gamma = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

$$T = \frac{E_t}{E_i} \quad \text{Coefficiente di trasmissione}$$

$$\text{se } \theta_i = 0 \quad T = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

*Grande salto di valore negli indici di rifrazione* 

*Onda riflessa grande*

# ■ INTRODUZIONE

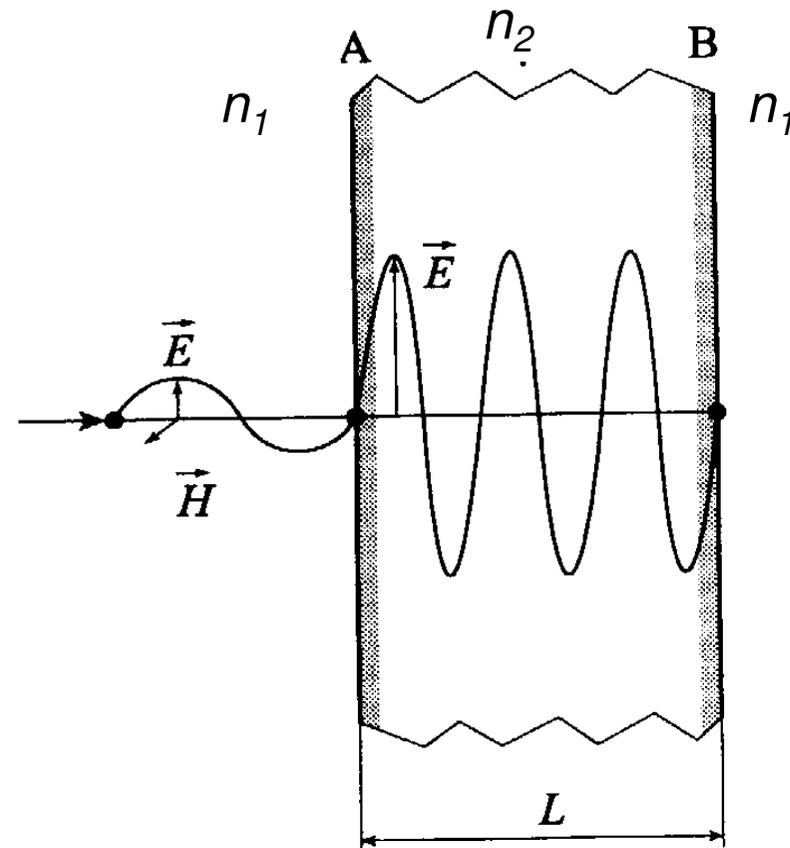
## Risonanza

$$L \cong k \frac{\lambda}{2}$$

$L$  dimensione spaziale  
 $k$  numero intero  
 $\lambda$  lunghezza d'onda

$$\Gamma_A = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

$$\Gamma_B = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2}$$



Se  $n_1 < n_2$ , in B onda incidente e riflessa sono in fase (mentre prima riflessione in A sfasati di  $180^\circ$ )

Aumento di ampiezza di onda nel mezzo 2 fino a quando si raggiunge una condizione di equilibrio tra energia immessa da onda incidente e quella perduta verso l'esterno e per fenomeni dissipativi



## ■ INTRODUZIONE

### Risonanza: esempio

Si consideri una lastra di vetro  
( $n_2=1.5$ ) in aria ( $n_1=1$ )

$$L \cong k \frac{\lambda}{2}$$

$$n_1 < n_2$$

$$L = 0.2 \text{ m}$$

$k$  numero intero

si calcoli  $\lambda$  tipica per avere  
risonanza

$$\Gamma_A = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = -0.2 \quad \Gamma_B = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} = 0.2$$

$\lambda$  deve essere 0.4 m se  $k=1$  quindi  $f=500$  MHz ( $f=v/\lambda=c/(n\lambda)$ )

$\lambda$  deve essere 0.2 m se  $k=2$  quindi  $f=1$  GHz

