

4. ENERGIA: un approccio - ONDE

R. Che cosa è l'*energia*?

D. Domanda da un miliardo di euro. Nel linguaggio comune, talvolta l'*energia* viene confusa con la *potenza* che, come abbiamo visto, è il lavoro effettuato in un determinato tempo e la cui unità di misura SI è il joule al secondo (J/s) o *watt* (W). L'errore è dovuto, probabilmente, al fatto che i contatori domestici dell'*energia elettrica* sono tarati in *kilowattora* (kWh). E' questa una unità di misura non SI dell'*energia*, energia assorbita in 1 h da un dispositivo che impiega la potenza di 1 kW ($1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ kJ}$). C'è poi chi crede che kilowatt significhi energia elettrica, come quel cronista che ha scritto: «Il kilowatt è la forma più costosa di energia».

Il fisico scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879) ha definito l'*energia* (dal greco *érgon*, azione): «una grandezza di cui non si conosce il valore assoluto ma della quale si può soltanto verificare l'aumento o la diminuzione quando un oggetto passa da una condizione ad un'altra». Secondo Albert Einstein (1879-1955), massa ed energia sono due aspetti della medesima entità: la massa è una forma di energia che si potrebbe considerare «energia congelata».

L'*energia* si può definire anche come tutto ciò che prende origine da un lavoro o si può trasformare in lavoro; la sua unità di misura SI è quella del lavoro, il *joule* (J); unità non SI sono la *kilocaloria* (kcal) e il *kilowattora* (kWh), come vedremo più avanti

$$1 \text{ kcal} \approx 4,19 \text{ kJ} \quad 1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ kJ}$$

In qualunque processo fisico o chimico, l'*energia* può cambiare forma ma si conserva, non può scomparire né nascere dal nulla. E' questo il *principio della conservazione dell'energia*.

L'*energia* si presenta in varie forme.

4.1. Energia cinetica (E_c)

Per un oggetto di massa m è l'*energia* associata allo stato di movimento dell' oggetto

$$E_c = \frac{m v^2}{2}$$

Nel *moto rotatorio*, l'energia cinetica diventa $E_c = I \omega^2 / 2$, dove I è il momento d'inerzia e ω la velocità angolare.

Esempi. a) Un proiettile sparato ad una certa velocità produce effetti più devastanti dello stesso proiettile sparato a velocità inferiore. b) Un masso che cade ad una certa velocità produce effetti più devastanti di un sassolino che cade alla stessa velocità.

Calcoli l'energia cinetica di un autoveicolo di 1 t alla velocità di 39,6 km/h (11 m/s) e a velocità doppia.

$$\mathbf{R.} \quad E_c = 10^3 \text{ kg } (11 \text{ m/s})^2 / 2 = 60,5 \text{ kJ} \quad E_c = 10^3 \text{ kg } (22 \text{ m/s})^2 / 2 = 242 \text{ kJ}$$

D. Come vede, raddoppiando la velocità, essendo l'energia cinetica direttamente proporzionale *al quadrato* della velocità, l'energia cinetica non raddoppia ma quadruplica.

4.2. Energia potenziale (E_p)

E' l'energia immagazzinata da un oggetto di massa m rispetto ad un altro (energia potenziale *gravitazionale*); accumulata in un arco teso, in una molla compressa e simili (energia potenziale *elastica*); accumulata in un corpo carico di elettricità o magnetizzato. L'energia potenziale gravitazionale di un oggetto di massa m che si trova ad un' altezza h rispetto ad un punto di riferimento è

$$E_p = m \times g \times h$$

4.3. Energia a riposo (E_0)

E' l'energia posseduta da un oggetto soltanto per il fatto di avere una massa ed è, secondo la celebre equazione di Einstein, $E = m_0 c^2$, dove m_0 è la *massa a riposo* (secondo la teoria della relatività la massa aumenta con la velocità) e c la velocità della luce ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Esempio. Se un grammo di materia si convertisse totalmente in energia si avrebbe, applicando l'equazione di Einstein: $E = m c^2 = 10^{-3} \text{ kg} \times (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$.

R. Nei testi in cui si parla di problemi energetici compaiono talvolta le sigla «tep» e «tec». Che cosa significano?

D. *Tep* è acronimo di *tonnellata equivalente di petrolio*, unità di misura non SI dell'energia prodotta in una centrale termoelettrica; $1 \text{ tep} = 4,18 \cdot 10^7 \text{ kJ}$. *Tec* è acronimo di *tonnellata equivalente di carbone*; $1 \text{ tec} \approx 39,3 \text{ GJ}$.

4.4. Onde

Parliamo adesso di *onde*. Le **onde meccaniche** sono perturbazioni che si propagano attraverso un mezzo, con trasporto di energia e senza trasporto di materia, in quanto le particelle del mezzo vibrano intorno alla loro posizione di equilibrio.

Esempio. Quando una folata di vento investe un campo di grano, le prime spighe colpite dal vento si piegano urtando le spighe successive e curvandole; il fenomeno si propaga lungo tutto il campo. Ogni spiga rimane al proprio posto limitandosi ad oscillare: attraverso il campo si è propagata un'onda.

Nelle *onde trasversali* le particelle del mezzo vibrano perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda. Nelle *onde longitudinali* (onde di pressione) le particelle del mezzo vibrano nella direzione di propagazione dell'onda.

Esempi. Le *onde sfigmiche* arteriose sono onde meccaniche longitudinali dovute alla contrazione del ventricolo sinistro del cuore, che provoca una dilatazione delle pareti dell'aorta. La dilatazione si propaga lungo le pareti vasali alla velocità di 5-8,5 m/s secondo l'età. I battiti del polso arterioso sono dovuti alla propagazione dell'onda sfigmica.

D. La **lunghezza d'onda** (λ) è la distanza compresa tra due punti corrispondenti di due onde adiacenti; le unità di misura SI più usate sono il

metro per le radioonde, il *micrometro* per le radiazioni IR e il *nanometro* per le radiazioni VIS, UV, X, γ .

Il **periodo** (T) è il tempo che intercorre tra due configurazioni successive identiche dell'onda. In altre parole, è il tempo impiegato da una particella per compiere una oscillazione completa. L'unità SI è il *secondo*.

La **frequenza** (f) è il numero di ripetizioni del fenomeno ondulatorio nell'unità di tempo

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{L'unità SI è il } \textit{secondo reciproco} \text{ (s}^{-1}\text{) o } \textit{hertz (Hz)}$$

Aumentando la lunghezza d'onda diminuisce la frequenza.

L' **ampiezza** (A) è il massimo spostamento dell'oscillazione dalla posizione di equilibrio. L'unità SI è il *metro*.

La **velocità** (v) è il prodotto della frequenza f per la lunghezza d'onda λ e dipende dalla natura del mezzo di propagazione

$$v = f \times \lambda \quad \text{L'unità di misura SI è il } \textit{metro al secondo}.$$

Il **numero d'onda** (n) è il numero di lunghezze d'onda contenute in un centimetro e la sua unità di misura è il *centimetro reciproco* (cm^{-1}).

Una boa, per azione delle onde, sale e scende ritmicamente ogni 5 s. Calcoli la frequenza e la velocità dell'onda se la distanza tra una cresta e una cresta adiacente è 20 m.

$$\mathbf{R.} \quad f = 1 / 5 \text{ s} = 0,2 \text{ Hz (ovvero s}^{-1}\text{)} \quad v = 20 \text{ m} \times 0,2 \text{ s}^{-1} = 4 \text{ m/s}$$

4.5. Onde acustiche

D. Le *onde acustiche* sono onde meccaniche longitudinali prodotte da un oggetto in vibrazione. Si trasmettono nel mezzo di propagazione creandovi zone di compressione e rarefazione. Si possono trasmettere in un solido, in un liquido e in un gas ma non nel vuoto. La velocità del suono dipende dalla natura del mezzo di propagazione, dalla temperatura e, se il mezzo è gassoso, anche dalla pressione. La velocità del suono, nell'aria secca, a 1 atm, è 331 m/s a 0°C e 343 m/s a 20 °C. Nell'acqua la velocità è maggiore (1 584 m/s a 20 °C) e nei metalli è molto alta (es.: nell'acciaio è 5 100 m/s).

Il nostro apparato auditivo percepisce, attraverso la vibrazione della membrana del timpano, onde sonore aventi frequenze comprese tra ~ 16 Hz (rombo) e ~ $2 \cdot 10^4$ Hz (fischio acutissimo). Così ad esempio, la frequenza della nota più bassa del pianoforte è ~ 27 Hz e quella più alta è ~ 3 480 Hz. I sottosuoni ($f < 16$ Hz) e gli ultrasuoni ($f > 2 \cdot 10^4$ Hz) non sono percettibili dall'orecchio umano. Gli elefanti comunicano tra loro anche con sottosuoni; i pipistrelli e i delfini emettono ultrasuoni che raggiungono frequenze rispettivamente di 100 000 Hz e 150 000 Hz.

Gli ultrasuoni trovano numerose applicazioni (sonar, ecografia, lavatrici a US, umidificatori, ecc.).

Esempi. Per effetto di una esplosione si propagano, nell'aria e nell'acqua, onde sonore. Nella *deflagrazione* sono prodotte onde subsoniche, con velocità intorno a 300 m/s; nella *detonazione* onde supersoniche, a velocità di migliaia di metri al secondo.

Il periodo di un onda sonora è $7,8 \cdot 10^{-5}$ s. Potrà essere percepita dall'orecchio umano?

R. Sì perché $f = 1 / 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ s} \approx 13\,000$ Hz.

Anni orsono, un ministro ha accusato gli autisti dei mezzi di soccorso di «abuso di sirena in atti d'ufficio». Come si valuta l'inquinamento acustico?

D. Il sibilo (necessario) che accompagna il rapido passaggio di un'autoambulanza non è nulla confrontato con le urla prolungate nel tempo delle infernali sirene di allarme, maltarate, installate sugli autoveicoli privati.

La *potenza sonora* è la potenza trasmessa da un' onda acustica per unità di area perpendicolare alla direzione di propagazione; la sua unità di misura SI è il *watt al metro quadrato* (W/m^2). La *sensazione sonora*, soggettiva, non è direttamente proporzionale alla potenza sonora ma aumenta e diminuisce con essa.

Il *livello di sensazione sonora* (L) è il logaritmo del rapporto tra la potenza sonora P_s e la potenza sonora P_0 di un'onda sonora avente le stesse caratteristiche, percepita al limite dell'audibilità, $L = \lg P_s / P_0$. L'unità di misura non SI è il *bel* (B) (in onore dell'inventore statunitense Alexander Graham Bell, 1847-1922) ma è più usato il suo sottomultiplo *decibel* ($1 \text{ dB} = 10^{-1} \text{ B}$), anche se gli schiamazzi, gli stereo e i televisori ad alto volume, i dispositivi di allarme che si attivano ad ogni stormir di fronde, l'uso improprio del clacson e altri rumori prodotti da una minoranza violenta, l'hanno reso ormai una unità di misura troppo piccola.

Esempi. a) Un decreto legge fissa i decibel al disopra dei quali il rumore del traffico è dannoso per i degenti in ospedale: 50 dB di giorno e 40 dB di notte. In un ospedale romano accerchiato dal traffico, a finestre chiuse, sono stati misurati 70 dB.

b) Gli effetti del rumore sono cumulativi per cui è soggetto a rischio chi ascolta musica in cuffia ad alto volume (90÷95 dB) anche per brevi periodi ma frequentemente.

Tab. 4/1. Ordine di grandezza di alcuni livelli di sensazione sonora.

dB	
0	silenzio
10	caduta di una foglia, respiro
20	stormire di fronde
30	ticchettio d'orologio
40	pompa di frigorifero a 1 m
50	conversazione normale
60	conversazione animata
70	radio e TV a medio volume, traffico urbano
80	ciclomotore a 10 m
90	musica rock in cuffia
100	elicottero a 30 m, sirena
110	sega circolare
120	martello pneumatico a 1 m, concerto rock, clacson vicino
130	reattore in partenza a 50 m, mitragliatrice
140	reattore in partenza a 25 m (soglia del dolore)
150	gravi lesioni all'orecchio
> 160	rottura del timpano

4.6. Onde elettromagnetiche

Il campo elettrico e il campo magnetico si possono definire regioni dello spazio in cui si manifestano forze di attrazione e repulsione di natura elettrica e magnetica. Una carica elettrica in riposo genera un campo elettrico ma se è in movimento genera anche un campo magnetico.

L'intensità del campo magnetico che si crea intorno ad un filo percorso da corrente elettrica continua (elettroni che «viaggiano» nella stessa direzione) non varia con il tempo. Se nel filo circola corrente alternata (elettroni che invertono periodicamente la direzione del loro movimento) si genera un campo magnetico di intensità variabile. Un campo elettrico variabile E genera un campo magnetico variabile H , il quale genera un campo elettrico variabile e così via. La concatenazione dei campi $E-H-E-H...$ costituisce un campo elettromagnetico dove l'energia si propaga come *onda elettromagnetica*. Il campo magnetico e il campo elettrico vibrano in fase su piani tra loro ortogonali e la loro intersezione è la direzione di propagazione dell'onda: le onde elettromagnetiche sono onde trasversali. Un'onda non polarizzata vibra su tutti i possibili piani contenenti l'asse di propagazione; un'onda è *polarizzata* quando vibra su un solo piano.

Non essendo legate alla vibrazione di particelle, le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto. La velocità delle onde elettromagnetiche di qualsiasi frequenza, *nel vuoto*, è la velocità della luce, $c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8$ m/s, ovvero circa 300 000 km/s. In altri mezzi la velocità della luce è minore.

Esempi. Nell'aria, si considera $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, nell'acqua $\approx 2,25 \cdot 10^8$ m/s, nel vetro la velocità della luce è compresa tra $2,0 \cdot 10^8$ e $1,5 \cdot 10^8$ m/s, nel diamante è $\approx 1,24 \cdot 10^8$ m/s.

Frequenza e lunghezza d'onda sono legate dalla relazione

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{da cui} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

Poichè la velocità della luce varia secondo il mezzo attraversato, essendo la frequenza una costante che dipende soltanto dalla sorgente della

radiazione, anche la lunghezza d'onda di una radiazione varia secondo il mezzo di propagazione dell'onda.

La lunghezza d'onda di una radiazione UVB, nel vuoto, è 200 nm. Calcoli la frequenza.

R. $f = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} / 200 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$

D. La frequenza di una radiazione arancione è 500 THz. Calcoli la lunghezza d'onda nel vuoto esprimendola in nanometri.

R. $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} / 500 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m} \times 10^9 = 600 \text{ nm}$

D. Calcoli il numero d'onda, espresso in cm^{-1} , di una radiazione avente $\lambda = 2 \mu\text{m}$.

R. $2 \mu\text{m} \frac{10^{-6} \text{ m}}{1 \mu\text{m}} \frac{10^2 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \quad n = 1 / 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 5000 \text{ cm}^{-1}$

Consideri ora una ipotetica antenna in cui sia possibile aumentare progressivamente la frequenza (e quindi diminuire la lunghezza d'onda) delle onde elettromagnetiche da essa irradiate. A basse frequenze (10^4 Hz) la sorgente lancerebbe nello spazio *radioonde*, lunghe, che diventerebbero via via più corte aumentando la frequenza fino a $\approx 10^{12} \text{ Hz}$. A questo punto, l'antenna inizierebbe ad irradiare onde calorifiche, da $\approx 10^{12} \text{ Hz}$ a $\approx 10^{14} \text{ Hz}$, le *radiazioni infrarosse* (IR). Successivamente le onde diventerebbero *visibili* (VIS) e l'antenna apparirebbe prima rossa, poi arancione, gialla, verde, azzurra, violetta. Con l'aumentare della frequenza il violetto scomparirebbe ma l'antenna continuerebbe a irradiare onde ancora più corte, le *radiazioni ultraviolette* (UV) e poi, ad una frequenza di $\approx 10^{17} \text{ Hz}$, le *radiazioni X*. Infine, ad una frequenza intorno a 10^{20} Hz l'antenna emetterebbe onde cortissime, le micidiali *radiazioni gamma*. L'insieme della radiazioni descritte costituisce lo *spettro* delle radiazioni elettromagnetiche, suddiviso in *bande di frequenza* senza confini netti.

Tab. 4/2. Onde elettromagnetiche.

f (Hz)	$3 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{22}$
λ (m)	10^6	10^4	10^2	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-14}
	radioonde				IR e VIS		UV	X	γ		

Tab. 4/3. Radioonde.

f (Hz)	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$
λ (m)	10^5	10^4	10^3	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF	

Onde lunghe: VLF, *very low frequency*. LF, *low frequency*. Onde medie: MF, *medium frequency*. Onde corte: HF, *high frequency*. Onde ultracorte: VHF, *very high frequency*. UHF, *ultra high frequency*. SHF, *supra high frequency*. Microonde: EHF, *extremely high frequency*.

* Le *radiazioni infrarosse* sono le radiazioni calorifiche, più lunghe delle radiazioni visibili ed aventi quindi frequenza più bassa. La loro lunghezza d'onda si esprime comunemente in micrometri ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$). Un'altra unità di misura usata per l'IR è il *numero d'onda* (n) numero di lunghezze d'onda contenute in un centimetro.

R. In un testo si parla di raggi infrarossi, in un altro di raggi ultrarossi: di quali radiazioni si tratta?

D. Si tratta della stessa gamma di radiazioni: avendo frequenza più bassa di quella delle radiazioni rosse sono dette infrarosse (dal latino *infra*, inferiore); avendo lunghezza d'onda più alta di quella delle radiazioni rosse sono talvolta chiamate ultrarosse (dal latino *ultra*, oltre).

Tab. 4/4. Infrarosso (IR).

f (Hz)	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{14}$
λ (μm)	1 000	100	10	1
	lontano		vicino	

* Le *radiazioni visibili* costituiscono una banda strettissima di frequenze, dell'ordine di grandezza di $10^{-14} \div 10^{-15}$ Hz. Ad esse l'occhio umano associa un colore. Quando un oggetto viene illuminato con una radiazione monocromatica, questa può essere diffusa senza che venga alterata la sua frequenza. Così ad esempio, illuminando una foglia fresca, un limone maturo e un papavero con la radiazione gialla di una lampada a

vapori di sodio, all'osservatore i tre oggetti appaiono gialli se sono in grado di diffondere la radiazione gialla o neri se la assorbono. Quando invece i tre oggetti sono illuminati dalla luce solare (luce bianca), policromatica, l'assorbimento è selettivo e all'occhio dell'osservatore appaiono rispettivamente verde, giallo e rosso-arancione.

Tab. 4/5. Luce visibile (VIS).

f (Hz)	$4,0 \cdot 10^{14}$	$4,8 \cdot 10^{14}$	$5,0 \cdot 10^{14}$	$5,2 \cdot 10^{14}$	$6,0 \cdot 10^{14}$	$6,6 \cdot 10^{14}$	$7,4 \cdot 10^{14}$			
λ (nm)	750	620	590	570	500	450	400			
E (eV)	1,65	1,98	2,06	2,14	2,47	2,72	3,05			
	rosso	arancio-rosso	arancio	giallo	giallo-verde	verde	blu-verde	blu	blu-violetto	violetto

Infatti, quando una superficie viene illuminata dalla luce bianca:

- 1) Appare *nera* se assorbe quasi totalmente la luce incidente su di essa.
- 2) Appare *bianca* se la riflette quasi totalmente (l'ossido di magnesio è una delle sostanze più bianche, diffondendo oltre il 99 % della luce incidente).
- 3) Appare *grigia* (o *acromatica*) quando non assorbe totalmente la luce solare ma in parte la riflette, assorbendo in eguale misura le varie radiazioni che la compongono.
- 4) Appare *colorata* quando esercita un'azione selettiva, assorbendo una o più bande di frequenza nell'intervallo visibile e diffondendo il resto della radiazione. Dunque, né la luce diffusa da una superficie illuminata con luce bianca nè quella assorbita sono monocromatiche, mentre i loro colori sono *complementari*, cioè la loro somma è uguale al bianco. Così ad esempio, il colore verde di un prato è il colore complementare del porpora, somma di una banda rossa e una viola assorbite dalla clorofilla.

* Le *radiazioni ultraviolette* aventi lunghezza d'onda intorno a 250 nm sono microbicide, danneggiando il DNA dei microorganismi; sono usate per la sterilizzazione di ambienti. Le lampade abbronzanti emettono radiazioni UV lunghe (UV-A, $\lambda = 310 \div 360$ nm); radiazioni UV più corte sono pericolose per l'uomo.

Tab. 4/6. Ultravioletto (UV).

f (Hz)	$7,4 \cdot 10^{14}$	$8,9 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$3,0 \cdot 10^{16}$
λ (nm)	400	333	200	10
E (eV)	3,1	3,7	12,4	124
	UV-A	UV-B	UV-C	

* Le *radiazioni X* (o radiazioni Röntgen, prodotte decelerando gli elettroni in un tubo a vuoto) e le *radiazioni gamma* (emesse da radionuclidi e prodotte nelle reazioni nucleari e negli acceleratori di particelle) sono più corte delle radiazioni UV ed hanno quindi frequenza ed energia più alte. Trovano applicazioni nell'industria, in diagnostica e in terapia e inducono gravi modificazioni nelle cellule viventi.

Tab. 4/7. Radiazioni X.

f (Hz)	$3 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{19}$
λ (nm)	10	1	10^{-1}	10^{-2}
E (eV)	124	$1,24 \cdot 10^3$	$1,24 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^5$
	molli	medi	duri	

Tab. 4/8. Radiazioni gamma

f (Hz)	$3 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{21}$	$3 \cdot 10^{22}$	$> 3 \cdot 10^{23}$
λ (nm)	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	$< 10^{-6}$
E (eV)	$1,24 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^6$	$1,24 \cdot 10^7$	$1,24 \cdot 10^8$	$> 10^9$
	molli	medi	duri	raggi cosmici	

Noterà che nelle tabelle delle radiazioni, dal visibile in avanti, oltre alla frequenza e alla lunghezza d'onda, sono riportate anche le energie delle radiazioni stesse, espresse in *elettronvolt* (eV). Torneremo sull'argomento quando studieremo la struttura dell'atomo.

L'energia di una radiazione incidente su un oggetto in parte viene trasmessa, in parte assorbita (trasformandosi in calore) e in parte riflessa.

Una sostanza è *trasparente* verso una determinata radiazione se quasi tutta l'energia incidente viene trasmessa attraverso di essa; è *opaca* se viene in parte assorbita e in parte riflessa. La trasparenza dipende dalla natura e dallo spessore del mezzo attraversato e dalla frequenza della radiazione.

- Esempi.* a) L'acqua, in piccolo spessore, è trasparente alla luce visibile ma lo diventa sempre meno aumentando lo spessore.
- b) Il vetro e il polietene sono trasparenti alla luce visibile ma non alle radiazioni UV e IR.
- c) Il quarzo è trasparente alle radiazioni UV mentre sono trasparenti alle radiazioni IR alcuni sali come il sodio cloruro ed il potassio bromuro.
- d) Nelle serre il vetro o il polietene consentono il passaggio della luce solare ma «intrappolano» le radiazioni infrarosse calorifiche.
- e) Alcuni scienziati prevedono un innalzamento di temperatura della Terra dovuto all'aumento dell'anidride carbonica atmosferica, opaca, come il vetro, alle radiazioni IR (il famigerato «effetto serra»).

4.7. Indice di rifrazione

D. L' *indice di rifrazione* (n) di un mezzo trasparente è il rapporto tra la velocità di una radiazione luminosa monocromatica nel vuoto e la velocità della radiazione in quel mezzo. Così ad esempio, a 20 °C, in riferimento ad una radiazione gialla di 598 nm, per l'aria, $n \approx 1$; per l'acqua, $n = 1,333$; per i vetri, $n = 1,51 \div 1,89$; per il diamante, $n = 2,417$. L'indice di rifrazione si misura con strumenti detti *rifrattometri*.

Esempio. Nelle analisi bromatologiche si usano i butirrorifrattometri, la cui scala è divisa in *gradi rifrattometrici*, compresi per convenzione tra 0 ($n = 1,4220$) e 100 ($n = 1,4895$), alla temperatura di 20° e per la luce gialla del sodio. Il grado rifrattometrico del burro, alla temperatura di 35°C, è compreso tra 44 e 48; quelli degli altri grassi (olio di cocco escluso) sono notevolmente più alti. Tuttavia, l'aggiunta contemporanea di margarina e di olio di cocco non altera sensibilmente il grado rifrattometrico del burro. L'unico modo per scoprire le frodi nel burro è la gascromatografia (di cui parleremo), che permette di individuare i suoi acidi grassi e svelare la presenza di eventuali acidi grassi estranei.

R. Sarà possibile, un giorno, rendere una persona invisibile?

D. Un solido, immerso in un liquido avente lo stesso indice di rifrazione, risulta invisibile. Così ad esempio, immerso in carbonio disolfuro ($n = 1,61 \div 1,68$) un diamante ($n > 2,4$) è visibile mentre un falso diamante in vetro flint pesante ($n = 1,64 \div 1,67$) risulta invisibile.

L'Uomo invisibile di H.G. Wells avrebbe dovuto possedere lo stesso

indice di rifrazione dell'aria.