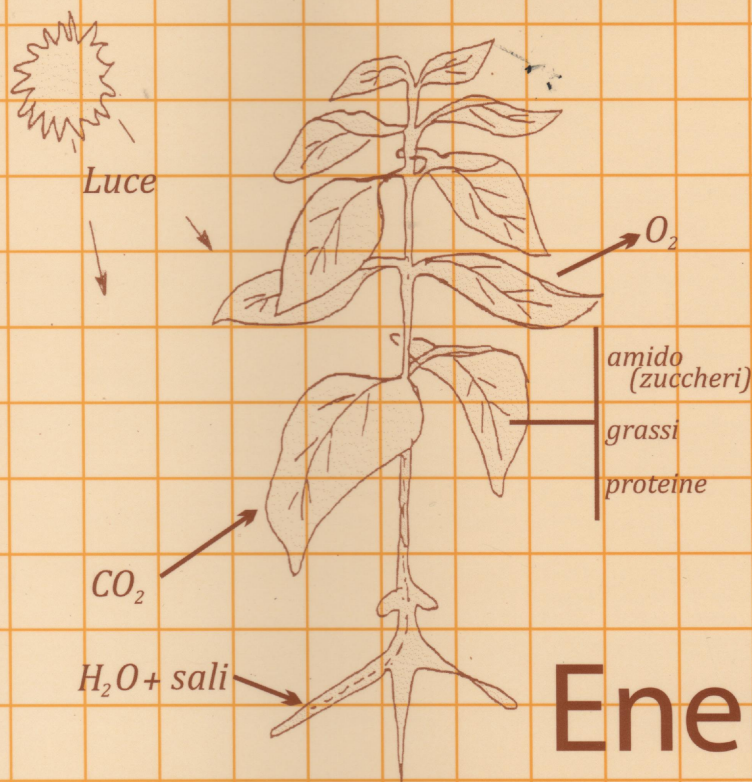




Energia e vita

Cecilia Anguillesi - Luigia Bosman
Isa Grilli - Umberto Penco

Introduzione di Paolo Meletti

Q

Quaderno 20

Bollettino trimestrale dell'Associazione per l'Insegnamento della Fisica

Anno XLII n. 3 Supplemento

luglio-settembre 2009

Cecilia Anguillesi ^② Luigia Bosman ^① Isa Grilli ^② Umberto Penco ^①

Introduzione di Paolo Meletti ^②

Dipartimenti di Fisica ^① e Scienze Biologiche ^② - Università di Pisa

Energia e vita

Spunti di didattica di discipline scientifiche
da integrare: possibili interazioni tra
fisica, chimica e biologia vegetale

Prefazione

Questo lavoro è il primo di una serie, che ci auguriamo lunga, che il Gruppo per la Scuola dell'Obbligo porta all'attenzione dei Soci AIF e più in generale a tutti coloro che abbiano a cuore l'insegnamento scientifico presso i giovani dall'infanzia sino ai quindici anni.

È nostra intenzione prioritaria presentare lavori che possano essere di aiuto e supporto per tutti i colleghi impegnati nel Piano ISS nei diversi momenti di formazione e/o di riflessione, rendendoli così mirati e quindi più efficaci.

Il materiale che vi proponiamo è il frutto di un lavoro realizzato in anni passati da docenti dei Dipartimenti di Fisica e Scienze Biologiche dell'Università di Pisa e utilizzato con successo in molti corsi di aggiornamento. È dunque materiale collaudato sul campo.

Oltre ad una produzione cartacea, attraverso altri Quaderni o articoli sulla Rivista, ci proponiamo di utilizzare la rete per offrire opere in formato elettronico, facilmente scaricabili ed eventualmente stampabili. Il sito, appena allestito, sarà raggiungibile da www.aif.it con apposito link.

Nella speranza di essere utili al vostro lavoro vi auguriamo una buona lettura.

Anna Maria Mancini
Coordinatrice del Gruppo Scuola dell'Obbligo

Questo volumetto è destinato agli insegnanti i quali sono chiamati a verificare la possibilità di utilizzare argomenti di fisica, chimica e biologia per una didattica di tipo interdisciplinare, secondo quanto previsto dai programmi ministeriali. Certo l'impegno degli insegnanti non è di poco conto visto che si trovano di fronte a delle proposte che sono di per sé perfettamente autosufficienti e utilizzabili come tali: ad esempio il sole, l'energia, la fotosintesi. Questa sequenza è scelta di proposito perché dà subito un esempio di ciò che si vuol dimostrare: *il sole fornisce l'energia necessaria per la sintesi di materiali organici attraverso la fotosintesi*.

In altre parole l'insegnante sviluppa inizialmente il discorso su sole ed energia in maniera che i ragazzi familiarizzino con questi argomenti, per passare poi allo studio della fotosintesi, il quale si avvarrà ovviamente delle informazioni già acquisite. Dalla fotosintesi si spazia poi con facilità alla respirazione e al consumo di energia necessaria per le funzioni vitali, dall'accumulo delle riserve alla produttività, ecc.

È chiaro che gli argomenti non vengono qui trattati in modo esauriente. Del sole, per esempio si considera soltanto il moto, ma con una serie di riferimenti che, oltre ad avere una ricaduta sul mondo delle piante – posizione, altezza del sole, luce e ombra, ecc – permettono delle facili verifiche sperimentali. È l'insegnante che deve lavorare intorno alle esperienze proposte in modo da stimolare la curiosità dei ragazzi che sollecitino informazioni più ampie. D'altra parte l'interesse dei giovani aumenta nel momento in cui si dimostra che fisica, chimica e biologia devono essere integrate se si vogliono spiegare compiutamente i fenomeni naturali che riguardano organismi viventi.

Questo tipo di impostazione e i percorsi didattici proposti consentono il livello di approfondimento di cui la scolaresca ha bisogno e/o l'insegnante desidera raggiungere. Si tratta, come è evidente, di argomenti che, a dispetto della loro complessità, possono essere presentati in modo semplice ed efficace mantenendo il discorso all'inizio su un piano generale e generico.

Un esempio:

- 1° livello – l'energia solare, captata dalle foglie, consente alla pianta di sintetizzare la sostanza organica a partire da sostanze inorganiche semplici;
- 2° livello – l'energia solare, captata dai pigmenti fotosensibili delle piante, consente loro di fotosintetizzare gli zuccheri a partire da acqua e anidride carbonica;
- 3° livello – l'energia solare, che eccita le molecole della clorofilla, consente alle piante di fotosintetizzare gli zuccheri che si accumulano sotto forma di amido;
- 4° livello – la sintesi degli zuccheri è la base per la costruzione di tutti i materiali organici (grassi, proteine, ecc.) di cui la pianta ha bisogno per la sua nutrizione;

e così via.

Con questo sistema l'insegnante ha la possibilità di costruire insieme agli allievi il suo percorso senza arrivare peraltro ad un approfondimento eccessivo, ciò che comporterebbe sconfinamenti disciplinari verso la fisiologia vegetale, la biochimica, la biologia molecolare.

Allo scopo di rendere il discorso più esplicito, sono stati allegati al testo i seguenti schemi:

- a) una mappa che comprende i concetti fondamentali trattati – più o meno diffusamente – in questa raccolta e alcune possibili interconnessioni negli itinerari proposti (Tav. I);
- b) una possibile ripartizione funzionale (Tav. II), nell'arco dei tre anni della scuola media, delle varie proposte didattiche che nel testo sono corredate da numerose esperienze ampiamente sperimentate.

Gli autori di questo testo hanno collaborato alla preparazione di quel prezioso contributo alla didattica extrauniversitaria quale è *"La macchina albero"* pubblicato dal Seminario Didattico della Facoltà di Scienze m.f.n. di Pisa nel 1985. Esso è ancora un valido esempio di come si possono integrare scienze fisiche e scienze biologiche e può costituire un ottimo ausilio didattico da utilizzare ad integrazione dei percorsi qui proposti.

Paolo Meletti

Dipartimento di Scienze Botaniche – Pisa

Pisa, Dicembre 1995.

1. Osservazioni sul moto del Sole

Alternarsi del giorno e della notte: il moto apparente del Sole

La vita della maggior parte degli animali, come pure quella dell'uomo, è scandita dall'alternarsi di periodo di luce e periodi di buio, prodotti dal continuo “movimento apparente” del Sole che sorge, si alza nel cielo, torna a scendere ed infine tramonta. Il ripetersi ciclico di queste fasi fornisce il primo strumento naturale per la misura del tempo che passa: il giorno. Di giorno in giorno l'uomo ripete le sue azioni fondamentali: dormire, lavorare, mangiare; la sua vita, quella degli animali e – anche se in modo meno appariscente – quella delle piante è regolata da questo “moto” del Sole.

Scopo di questo capitolo è di descrivere, prima qualitativamente poi in modo più quantitativo, il “moto” del Sole per poterne ricavare delle connessioni con altri aspetti dell'esperienza comune. Per fare questo sarà necessario definire un *referimento*, fare *osservazioni*, eseguire poi delle *misure*. Per quanto ci si richiami in tal modo ad osservazioni che hanno caratterizzato gli albori della civiltà umana, non si vuole con questo tenere un atteggiamento strettamente storico, fino al punto di voler forzatamente ignorare le conoscenze che da molto tempo costituiscono un bagaglio di cultura comune.

Così ad esempio, riferendoci al Sole, abbiamo messo tra virgolette la parola “moto” per sottolineare che si tratta di un fenomeno apparente, essendo noto a tutti – e ai ragazzi d'oggi in primo luogo – che è la Terra a muoversi e non il Sole ^[1].

Ciò non toglie che da un punto di vista cinematico le due descrizioni sono equivalenti; l'esempio noto a tutti della giostra è abbastanza soddisfacente: il bambino seduto sulla giostra vede fermi gli altri bambini accanto a lui e vede girare attorno a sé i genitori che lo osservano da fuori. Analogamente noi vediamo fermi i monti, le case, gli alberi che stanno sulla superficie terrestre e vediamo muovere attorno a noi il Sole, la Luna e le stelle. Parlando quindi di moto del Sole (e d'ora in poi non useremo più le virgolette) non vogliamo ignorare conoscenze acquisite da secoli; vogliamo semplicemente descrivere i fatti come li vediamo, come “appaiono”.

[1] Va detto che spesso si fa confusione su questo punto, quando si obietta che “la Terra gira intorno al Sole e non viceversa”. Qui in realtà occorre considerare il moto di rotazione della Terra sul suo asse, non quello di rivoluzione attorno al Sole; è il primo infatti che produce localmente l'alternarsi della luce e del buio. Del movimento di rivoluzione si tornerà a parlare più avanti.

Osservazioni qualitative

Se proviamo a seguire un aereo che passa alto nel cielo, quasi certamente possiamo avere l'impressione che quello sia fermo, sospeso nell'aria. Guardando l'aereo con un binocolo, ma anche semplicemente attraverso un tubo di cartone, la stessa impressione può essere anche più forte. Anche per una nave in alto mare succede qualcosa di simile e spesso possiamo capire che essa è in movimento solo dalla scia che lascia dietro di sé.

In realtà noi diciamo che un oggetto *si muove* quando si allontana o si avvicina a qualche altro oggetto; così se vediamo un'automobile per la strada ci accorgiamo immediatamente se la sua posizione rispetto ad un albero, ad un cartello, ad una casa sta cambiando. Per l'aereo o la nave la cosa è più difficile perché normalmente non ci sono oggetti vicini cui fare riferimento.

In modo analogo se vogliamo studiare più accuratamente il moto del Sole occorre innanzitutto familiarizzarsi con il paesaggio intorno a noi, rispetto al quale il Sole si muove. Il primo modo di osservare il movimento del Sole è quello di riferirlo al paesaggio. Pur senza voler caricare l'espressione di un preciso contenuto formale, diremo che il paesaggio costituisce il nostro "*sistema di riferimento*". Il primo passo è dunque quello di osservare più attentamente il paesaggio.

Osservare il paesaggio

Innanzitutto – se è possibile – è bene scegliere un luogo che offra un'ampia visuale, da cui sia possibile osservare successivamente il moto del Sole per un lungo tratto. Può andar bene una finestra che non abbia altri edifici a ridosso, un ampio cortile, un prato o un campo da gioco. Fissato il punto di osservazione, occorre dedicare un po' di tempo ad osservare e rappresentare (anche schematicamente) su un foglio il panorama di fronte a noi, individuando gli elementi più caratteristici del paesaggio, quali un campanile, un albero di forma particolare, un palo della luce, una casa più alta, una montagna lontana. In tal modo dovremo coprire almeno una metà dell'intero orizzonte, quella dove "passa" il Sole, o comunque la maggior parte di questa.



Fig. 1: Paesaggio schematico

Si noterà facilmente che la posizione relativa di oggetti a distanza diversa (ad esempio un lampione vicino rispetto ad una casa lontana) può cambiare notevolmente se ci spostiamo da qua a là; è quindi necessario fissare in modo accurato la nostra posizione così da poter fare le osservazioni stando sempre nello stesso punto. Il "*sistema di riferimento*" così ottenuto dovrebbe essere poi riprodotto (fotocopiato) in più esemplari per poter essere utilizzato successivamente.

Riferire al paesaggio la posizione del Sole

Per quanto possa sembrare sorprendente, sono molti i ragazzi che non hanno alcuna familiarità con il fatto che il Sole cambia continuamente posizione durante il giorno. Non è quindi per niente scontata un'esercitazione consistente semplicemente nell'osservare la posizione del Sole più volte durante la giornata e – riferendosi al paesaggio osservato da uno stesso punto – notare che essa è cambiata. Il passo successivo consiste nel riprodurre la posizione del Sole, nel modo più accurato possibile, sul disegno schematico del paesaggio.

Dopo i primi tentativi forse insoddisfacenti, si dovrebbe poter rappresentare senza troppa difficoltà il percorso del Sole, come una successione di posizioni ad intervalli possibilmente uniformi di tempo, notando che nel corso della giornata la direzione in cui si vede il Sole cambia continuamente mentre il Sole “sale” durante la mattinata e “scende” nel pomeriggio.

Pur senza specificarne fin d'ora l'esatta definizione si può già parlare di *altezza* del Sole, per esempio dicendo che “il Sole è alla stessa altezza della cima del campanile” oppure che “è sulla verticale del terzo lampione ad un'altezza doppia di questo”. È chiaro fin d'ora che l'*altezza* del Sole non si potrà misurare in metri o in chilometri e quindi pur usando la stessa parola non si intende la stessa cosa dell'altezza del campanile o del lampione, ma su questo si potrà tornare più avanti.

Un'altra osservazione importante può essere fatta relativamente al punto in cui il Sole sorge (se è possibile osservarlo) e a quello in cui tramonta (questo dovrebbe essere più agevole, specialmente in inverno). Di questa osservazione conviene prendere nota per poterla confrontare con quello che succederà col passare del tempo.

Anche le ombre, durante la giornata, cambiano continuamente posizione ed aspetto; neppure questa per molti ragazzi è un'osservazione scontata e può valer la pena dedicare un po' di tempo a seguire il cambiamento di un'ombra [2].

Parlando di ombre, cominceremo con la considerazione che la direzione individuata dall'ombra è collegata alla posizione in cielo del Sole, cosicché è possibile studiare il moto del Sole analizzando il comportamento dell'ombra di un dato oggetto. Ma prima di arrivare a questo punto è bene fare altre osservazioni preliminari, svolgendo un po' di attività pratica in classe con l'ausilio di un'attrezzatura semplice e di facile reperibilità.

Vale la pena sottolineare fin d'ora che le attività proposte non possono essere semplicemente *illustrate*, ma vanno realmente *eseguite*: i risultati di osservazioni basate su prove dirette sono essenziali alla costruzione di concetti astratti (quali le relazioni spaziali tra oggetti fermi o in moto relativo) necessari alla comprensione delle attività successive. Le figure riportate servono quindi solo di aiuto per la costruzione dell'ambiente di lavoro e non sono sostitutive delle prove stesse.

Giocare con le ombre: la luce viaggia in linea retta

Per il lavoro che viene ora suggerito occorrono una o più lampade [3], una serie di piccoli oggetti quali pupazzetti, blocchetti tipo LEGO, sagome di cartoncino ritagliate

[2] Osservando l'ombra di un palazzo o di un palo alto, ed avendo a disposizione degli elementi di riferimento (un pavimento di mattonelle, linee tracciate in terra o altro) è possibile seguire direttamente il movimento dell'ombra, cioè percepire istante per istante il moto del Sole, o – se ci riusciamo – il moto di rotazione della Terra.

[3] Può andar bene qualunque lampada da tavolo, ma sarebbe preferibile inizialmente una lampada da officina che può essere impugnata, spostata e tenuta in mano con più facilità, oppure

e montate *ad hoc* e qualche bacchetta lunga e sottile per individuare il percorso della luce. Si lavora in classe, possibilmente in penombra per poter vedere meglio le ombre prodotte dagli oggetti illuminati dalla lampada.

Si inizia con una discussione qualitativa: se si dispongono gli oggetti su un piano e si illuminano, inizialmente con la lampada ferma in una certa posizione, poi muovendo la lampada. Si può vedere (cfr. figura 2):

a) le ombre degli oggetti sono sempre dalla parte opposta della lampada rispetto agli oggetti stessi;

b) un punto di un oggetto ed il punto corrispondente della sua ombra (ad es. un particolare di un pupazzetto, il suo cappello) sono allineati con la lampada; considerando due o più oggetti, tutte le rette così individuate convergono verso la lampada;

c) l'ombra di un oggetto è tanto più corta quanto più la lampada viene portata sopra l'oggetto (sulla sua verticale), mentre si allunga quando si abbassa la lampada sul piano.

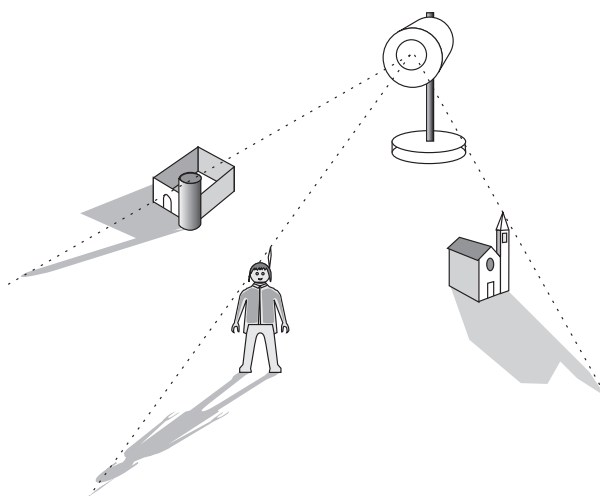


Fig. 2: Osservazioni sulle ombre

Successivamente si può passare ad osservazioni quantitative, per le quali è preferibile usare degli oggetti di forma semplice, ad es. delle sagome di cartoncino di altezza nota del tipo di quelle riportate in figura 3.

Si dispone un certo numero di sagome su un piano, o meglio su un foglio di carta quadrettata, così da poter segnare su questo sia la posizione delle sagome che le relative ombre. Si possono adesso svolgere alcuni esercizi.

a) Si dispongono a caso sul piano un certo numero di sagome; per ogni sagoma si segna sul foglio il piede dello spigolo verticale e il vertice dell'ombra, tracciando

una torcia, non troppo piccola.

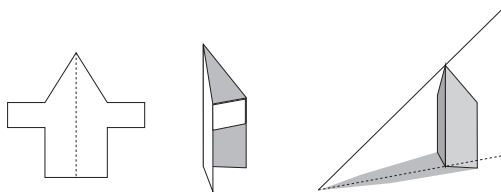


Fig. 3: Sagome di cartoncino

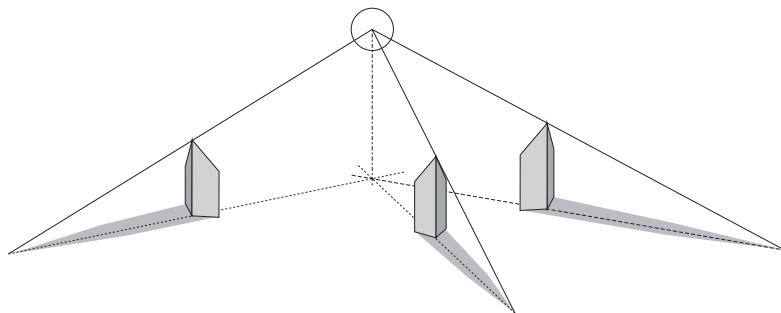


Fig. 4: Posizione della lampada

quindi la retta che passa per questi due punti. Le rette così ottenute convergono tutte (approssimativamente) in un punto che sta proprio sotto la lampada.

b) Si dispone un certo numero di sagome di altezze diverse in fila indiana di fronte alla lampada; si segnano come prima le posizioni delle sagome e delle ombre e si misurano le lunghezze delle ombre. Si riportano in un disegno – eventualmente ridotto in scala – le forme delle sagome nelle loro posizioni relative con le lunghezze delle ombre e si uniscono come prima il vertice dell'ombra con il vertice della sagoma: si ottengono delle rette convergenti: si può determinare (sempre approssimativamente) a che altezza sul piano si trova la lampada.

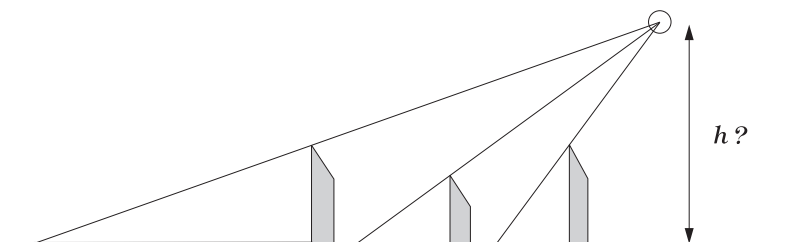


Fig. 5: Altezza della lampada

c) Con le sagome disposte come al punto b), si allontana la lampada – per quanto è possibile – dal piano di lavoro, e si ripete la stessa operazione: si potrà vedere che le rette tendono ad essere parallele cosicché non si può più trovare il punto di convergenza e l'altezza della lampada. Tuttavia anche in queste condizioni, se si alza o si abbassa la lampada tutte le ombre si accorciano o si allungano.

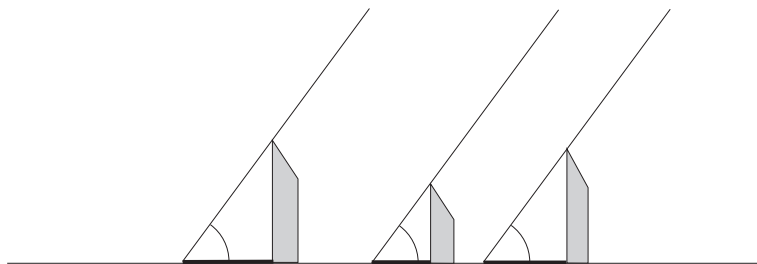


Fig. 6: Lampada a grande distanza

Al contrario delle lunghezze delle ombre (che dipendono dall'altezza delle diverse sagome), gli angoli che i raggi di luce formano con il piano sono tutti uguali e diventano più grandi o più piccoli se si alza o si abbassa la lampada. In qualche modo l'ampiezza di questi angoli dà un'informazione sull'altezza della lampada.

A conclusione di queste esperienze, pur senza aver la pretesa di aver dato una dimostrazione, si dovrebbero essere raggiunti due obiettivi: rendere comprensibile l'espressione *“la luce viaggia in linea retta”* e rendere ragione del fatto che, essendo il Sole a grandissima distanza da noi, i raggi di luce possono essere trattati come paralleli. Di conseguenza sagome uguali danno ombre di uguale lunghezza, mentre in generale la lunghezza delle ombre è proporzionale all'altezza delle sagome ^[4]. Al contrario l'angolo formato dai raggi con il piano orizzontale non dipende dall'oggetto che si considera: esso dà quindi una misura dell'“altezza” del Sole ed anzi esso stesso viene chiamato “angolo di altezza” o più semplicemente “altezza” del Sole.

Ombre definite e sfumate (dimensione della sorgente)

Nelle esperienze di prima si sarà notato che non sempre il vertice dell'ombra si riesce ad individuare con facilità, in particolare quando la lampada è troppo vicina. Questo dipende dal fatto che normalmente le lampade hanno un filamento piuttosto esteso e dunque è come se illuminassimo i nostri oggetti con molte piccole lampadine: ognuna produce una sua ombra e tutte insieme producono un'ombra più o meno sfumata. A riprova di questo, se utilizziamo una lampadina bianca (opaline o “lattata”) o addirittura un globo smerigliato, possiamo vedere la sfumatura in modo molto più evidente, tanto da non poter più riuscire a individuare e misurare le ombre; in quel caso ogni porzione

[4] Nel coordinare questa attività con lo sviluppo dei programmi scolastici, appare evidente la connessione con la proporzionalità in matematica e la similitudine in geometria.

del vetro della lampadina è una sorgente di luce e solo se la lampadina o il globo è lontana le ombre tornano ad essere abbastanza nitide.

L'esperienza fatta suggerisce quindi di sostituire la lampada comune che si è usata prima con una più piccola, come quella di una torcia, ma altrettanto luminosa. Possono andar meglio le lampadine (dette "dicroiche") che spesso si vedono nelle vetrine, montate come faretto.

Osservazioni quantitative

Dopo questa parentesi svolta in classe, si torna ad osservare il Sole cercando ora di "quantificare" le osservazioni, attraverso delle "misure", che devono essere poi opportunamente elaborate. Indipendentemente dalla precisione con cui queste misure potranno essere fatte, ciò che conta è che si cominci a lavorare su dati oggettivi che possono essere registrati, conservati, confrontati, messi in relazione tra loro.

Per far questo dobbiamo per prima cosa introdurre l'uso di semplici strumenti: l'assunto è che la modesta precisione delle misure che si potranno fare è comunque sufficiente per ottenere risultati interessanti di per sé e gratificanti per i ragazzi.

Gnomone, plinto, strumento autocostruito

Lavorando in classe con le sagome di cartoncino si è visto che la misura della lunghezza dell'ombra, in rapporto all'altezza dell'oggetto, dà un'indicazione dell'altezza della sorgente di luce; se la sorgente è posta a grandissima distanza, come il caso del Sole, si misurerà l'angolo tra il piano orizzontale e il raggio identificato come la retta che unisce un punto dell'oggetto con il corrispondente dell'ombra.

La sagoma costituisce quello che viene chiamato uno *gnomone* verticale, che – con buona probabilità – è stato il primo strumento di osservazione astronomica: ad esempio un palo piantato in terra. Si possono trovare o costruire numerosi altri esempi di gnomone: da un semplice chiodo su una basetta di legno a un listello montato verticalmente, da un palo di recinzione a un lampione. I requisiti per utilizzare uno di questi oggetti come gnomone sono: che sia facilmente individuabile un suo punto e il corrispondente punto dell'ombra (ad esempio il punto più in alto); che si possa determinare con la maggior precisione possibile il piede della verticale condotta per quel punto; che lo spazio circostante ove cade l'ombra sia accessibile, piano e orizzontale.

La scelta migliore potrebbe consistere in un paletto di 10-15 cm di altezza che possa essere disposto verticalmente su un foglio (meglio se quadrettato) ove si possano segnare le posizioni delle ombre in diversi momenti. In tal modo è possibile vedere, dalle registrazioni effettuate, che l'ombra del Sole cambia continuamente direzione e lunghezza; come si era già fatto con le sagome di cartoncino si potrà determinare, per via geometrica, con un disegno in scala, l'angolo alla base del triangolo rettangolo formato dal paletto verticale, l'ombra (orizzontale) e il raggio di luce, che come si è detto è l'altezza del Sole ad ogni osservazione.

Un altro strumento noto fin dall'antichità è il cosiddetto "plinto di Tolomeo", una pietra squadrata che, disposta con un'orientazione opportuna (se ne riparlerà più avanti), consentiva di misurare direttamente l'altezza del Sole a mezzogiorno, leggendo il corrispondente angolo su una scala graduata. Prendendo spunto da questo, si propone di costruire con un cartoncino uno strumento portatile (che per analogia chiameremo "*plinto*") con cui misurare facilmente l'altezza del Sole ^[5].

[5] Insieme al plinto viene fornita una base che è sostanzialmente un goniometro a 360° per la

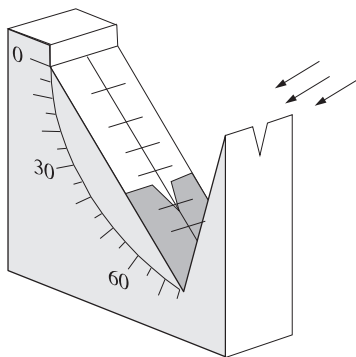


Fig. 7: “Plinto” di cartoncino

Lo strumento potrà essere riprodotto nel numero necessario di esemplari cosicché ogni ragazzo possa fare le sue misure, non solo durante le ore di scuola ma anche quando è a casa (pomeriggi, giorni di festa, periodi di vacanza). Si potranno così raccogliere dati in modo più completo ed ottenere risultati più interessanti.

Allegato a questo volume (v. Tavv. III e IV, fuori testo) si trova il modello del plinto: questo può essere usato direttamente, ma sarebbe molto più conveniente riprodurlo in fotocopia su cartoncino nelle stesse proporzioni o, meglio ancora, ingrandito. Seguendo le istruzioni allegate si ritaglia e si incolla il modello; l'intera operazione non richiede più di mezz'ora.

L'uso di questo piccolo strumento è immediato e le misure sono sufficientemente buone se si seguono le semplici prescrizioni che vengono date qui di seguito.

Innanzitutto è essenziale che il plinto venga appoggiato su un piano orizzontale ^[6]; si orienta quindi la faccia più stretta in direzione del Sole in modo che l'ombra della tacca triangolare vada a sovrapporsi alla linea mediana disegnata sulla scala graduata (v. figura 7). Il bordo superiore di tale faccia determina un'ombra sulla scala in corrispondenza della quale si legge direttamente l'altezza del Sole in gradi.

Misura dell'altezza in momenti diversi del giorno

Sia che si usi un semplice gnomone, sia che si usi il plinto, la prima applicazione consiste nel misurare la variazione giornaliera dell'altezza del Sole. Il periodo più favorevole è quello invernale: le giornate sono più brevi ed è possibile seguire l'intero corso del Sole dal suo sorgere al tramonto. Lo strumento può essere spostato, in modo da esporlo al Sole, e l'unico accorgimento da prendere è che sia sempre appoggiato su un piano orizzontale.

misura dell'azimut del Sole: di questo ripareremo più avanti.

[6] Per verificare che il piano sia orizzontale basta utilizzare una livella a bolla d'aria (facendo due prove in direzioni tra loro perpendicolari) oppure, più semplicemente, procurarsi un piatto piano del tipo di quelli da picnic che hanno un bordo ben definito e riempirlo d'acqua.

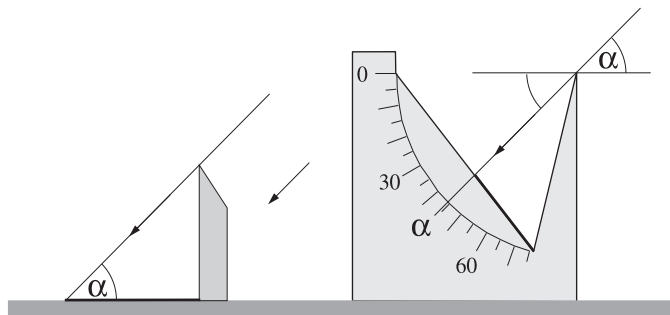


Fig. 8: Misura dell'altezza del Sole con lo “gnomone” e con il “plinto”

Le determinazioni di altezza dovranno essere fatte possibilmente ad intervalli di tempo regolari, non superiori ad un'ora per avere un numero di punti sufficiente; d'altra parte osservazioni troppo frequenti rendono pesante il lavoro e rischiano di annoiare: un intervallo di tempo dell'ordine di mezz'ora rappresenta una buona scelta.

Si costruisce quindi un grafico nel piano cartesiano riportando in ascissa i tempi (istanti) in cui si sono fatte le misure e in ordinata i valori trovati dell'altezza del Sole; l'insieme dei punti si dovrebbe distribuire lungo una linea curva che presenta un massimo centrale, rispetto al quale è simmetrica.

Da questo grafico si può trarre una grande quantità di spunti per una discussione, ma sarebbe importante fare almeno queste considerazioni:

- Se ogni ragazzo ha potuto fare una misura indipendente, i valori trovati non saranno tutti uguali; la dispersione dei valori dà un'indicazione e una stima degli errori di misura (strumentali e accidentali), mentre la media dei valori potrà essere assunta come migliore determinazione della misura di altezza (in assenza di errori sistematici).
- Si può cercare di tracciare una linea continua sul grafico per rappresentare l'altezza del Sole ad ogni istante. La linea deve essere la più “regolare” possibile, e non necessariamente deve passare esattamente per i punti determinati sperimentalmente, essendo questi – come si è detto sopra – affetti da errori di varia natura.
- Si può tentare adesso di stimare l'altezza del Sole ad un istante in cui non si era fatta alcuna misura (interpolazione) o ad un istante precedente o seguente tutte le misure (estrapolazione). O analogamente determinare a che istante il Sole era ad una certa altezza fissata.
- Ancora per estrapolazione si potrebbe cercare di stimare l'ora in cui il Sole è sorto e l'ora in cui è tramontato: basta prolungare la curva fino ad intersecare l'asse delle ascisse.
- Si può ancora stimare a che istante il Sole ha raggiunto la massima altezza nell'arco della giornata (culminazione) e quanto vale questa massima altezza ^[7]. La determi-

[7] Poiché il massimo della curva appare sempre piuttosto piatto, sfruttando la simmetria si potrebbe procedere in questo modo: fissato un certo valore dell'altezza del Sole, inferiore al

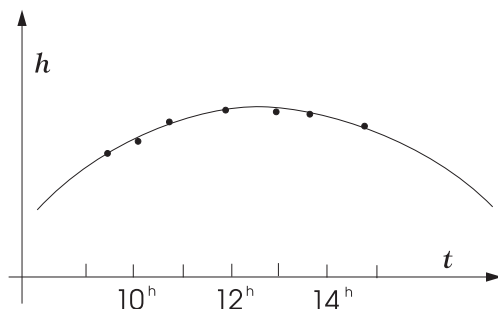


Fig. 9: *Variazione dell'altezza del Sole in un giorno*

nazione potrà essere affetta da un errore dell'ordine di 1° in altezza e di alcuni minuti in tempo; in particolare si noterà che, contrariamente a quanto molti si aspettano, la culminazione non avviene a mezzogiorno (secondo il nostro orologio), un fatto questo su cui torneremo più avanti.

In che direzione si vede il Sole? La misura dell'azimut

Le misure di altezza, completate con le osservazioni e le analisi che saranno svolte più avanti, danno già molte informazioni sul moto del Sole o – se si preferisce – sul moto della Terra e possono costituire un'unità di lavoro autosufficiente. Tuttavia la ricerca sarà più completa se oltre alle misure di altezza si introduce, e si misura, la seconda coordinata che descrive la posizione del Sole sulla sfera celeste: l'azimut.

Possiamo ricollegarci al lavoro già svolto quando è stato osservato il panorama, individuandone gli elementi caratteristici, e riferendo a questi la posizione del Sole. Come abbiamo fatto per l'altezza, vogliamo adesso quantificare la “direzione” in cui si osserva il Sole ad un certo istante, intendendo con questo la direzione del punto dell'orizzonte che sta, verticalmente, sotto il Sole. In altre parole se, ad esempio, il Sole sta esattamente sulla verticale di un campanile che spunta in lontananza tra le case, la direzione che ci interessa è quella del campanile, indipendentemente dal fatto che il Sole sia più o meno alto sull'orizzonte.

Ora, gli elementi del paesaggio danno solo alcune particolari direzioni: passato un po' di tempo il Sole si troverà magari in direzione di una ciminiera, e così via. Potrà anche succedere che per un certo tratto non ci sia nessun oggetto significativo sull'orizzonte e allora potremmo dire che il Sole sta *un po' più a destra* della ciminiera o qualcosa del genere. Per essere più precisi potremmo allora misurare, sul piano orizzontale, l'angolo tra la direzione della ciminiera e quella del Sole.

Questo è proprio quello che si fa quando si misura l'azimut del Sole, che è l'angolo – sul piano orizzontale – tra una direzione di riferimento (la cui scelta è convenzionale) e la direzione del Sole.

Come direzione di riferimento possiamo, in un primo momento, fissarne una qualunque scegliendo un elemento del paesaggio particolarmente significativo, come la cimi-

massimo, si determinano approssimativamente i due istanti in cui il Sole era a quell'altezza e se ne calcola il valor medio; è bene ripetere l'operazione più volte con altezze diverse e mediare i risultati ottenuti per tener conto della presenza degli errori di misura.

niera dell'esempio. La cosa più importante da tenere presente è che le misure devono essere fatte rimanendo – quanto più possibile – nello stesso punto; se infatti proviamo a spostarci notiamo che “il panorama cambia”, nel senso che le direzioni relative degli oggetti che vediamo cambiano progressivamente, e gli oggetti più vicini sembrano muoversi rispetto ai più lontani; di conseguenza le misure di azimut fatte in questo modo, da due postazioni diverse, non sono confrontabili [8].

Per misurare l'azimut si usa la base del plinto che – come detto – riporta un goniometro a 360° . La cosa più semplice all'inizio è misurare l'angolo di azimut *per differenza* operando come segue. Si dispone la base su un piano orizzontale senza preoccuparsi dell'orientamento, ma badando solo di non spostarla per tutta la durata dell'osservazione. Usando la mira triangolare si orienta il plinto puntandolo sulla direzione prescelta (la ciminiera dell'esempio), in modo che una delle due facce laterali si appoggi sul centro del goniometro ed intersechi il cerchio graduato (vedi figura 10); si legge sul cerchio il valore dell'angolo.

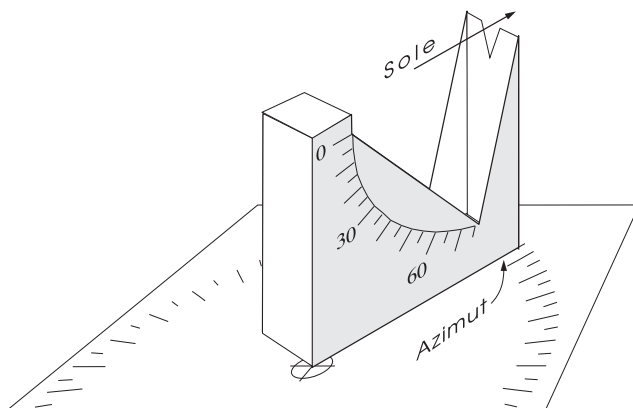


Fig. 10: Posizione del plinto per misurare gli azimut

Si ripete il puntamento orientando adesso il plinto verso il Sole, così come si è fatto per le misure dell'altezza, facendo però attenzione che una sua faccia laterale si appoggi sul centro del goniometro; si legge nuovamente il valore dell'angolo. La differenza dei due angoli dà l'azimut del Sole riferito alla direzione della ciminiera.

In alternativa, dopo aver puntato la ciminiera, si ruota la base in modo che l'angolo segnato dal plinto sia esattamente 0° , dopodiché il goniometro dà direttamente la misura dell'azimut (sempre riferito alla stessa ciminiera).

[8] Vedremo tra breve come scegliere diversamente la direzione di riferimento così da poter utilizzare le misure fatte separatamente dai ragazzi, ciascuno a casa sua.

Misura dell'azimut in momenti diversi del giorno

Se si vuole misurare l'azimut del Sole durante tutta una giornata, ad intervalli regolari come si è fatto per l'altezza, occorre ripetere ogni volta la stessa successione di operazioni, a meno che lo strumento non venga mai spostato.

Se si usa lo gnomone si fisserà sia lo strumento che il foglio quadrettato su un piano orizzontale (ad esempio sul pavimento della classe o del cortile) e sullo stesso foglio si riporteranno le posizioni successive dell'ombra. Se si sceglie come direzione fissa quella della prima ombra registrata, si possono misurare direttamente con un goniometro le variazioni di azimut.

Se invece si utilizza il plinto occorre fissare il cartoncino di base su cui è riportato il goniometro per la misura dell'azimut; naturalmente se la base viene fissata su un tavolino questo non deve essere spostato, né urtato accidentalmente; può essere conveniente segnare con strisce di nastro adesivo colorato le posizioni delle zampe per poter riposizionare il tavolo qualora venga spostato. Così facendo si potranno confrontare anche misure eseguite in giorni diversi, con errori tanto minori quanto più si riesce a mantenere fissa la posizione del tavolo; in questo caso non c'è neppure bisogno di fissare una particolare direzione di riferimento: la cosa importante è che questa sia sempre la stessa.

Anche per l'azimut, al termine delle osservazioni di una giornata, si può ottenere un grafico che ne mostra la variazione in funzione del tempo.

Registrazione in giorni diversi: direzione fissa Sud-Nord

Le osservazioni fatte (altezza ed azimut del Sole) non si possono esaurire nell'arco di una giornata; le stesse misure devono essere ripetute in giorni diversi per poter essere confrontate tra loro.

Perché le differenze tra le osservazioni siano apprezzabili occorre effettuarle a distanza di una settimana circa; il periodo più favorevole da questo punto di vista è quello all'inizio della primavera o dell'autunno, come si vedrà meglio nel seguito.

Gli effetti principali che possono essere facilmente osservati sono:

- la diversa altezza raggiunta dal Sole alla culminazione;
- la diversa durata del periodo di luce, cioè dell'intervallo tra il sorgere del Sole e il suo tramonto;
- la diversa ampiezza – in azimut – dell'arco coperto dal Sole nel suo moto diurno.

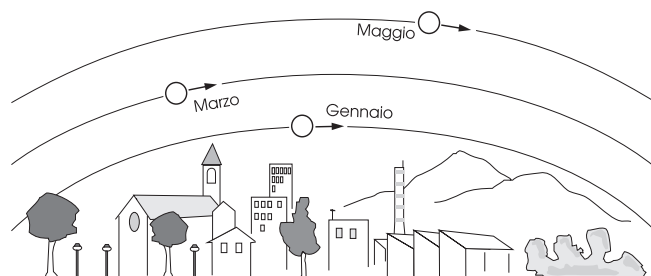


Fig. 11: Il "percorso del Sole" in giorni diversi

Cercando di riportare il più fedelmente possibile il percorso del Sole sulla rappresentazione del paesaggio che ci eravamo preparati all'inizio, ci si potrà rendere conto che il Sole descrive in cielo percorsi paralleli e ciò spiega come le tre grandezze citate aumentano o diminuiscono tutte insieme.

Altre due osservazioni sono importanti: la prima è che l'istante in cui il Sole culmina varia anch'esso col passare dei giorni; la seconda è che l'azimut del Sole alla culminazione rimane sempre lo stesso (entro gli errori di misura e di riposizionamento che possono essere stati fatti). Quest'ultima osservazione è molto importante perché definisce in modo oggettivo una direzione "speciale", quella in cui il Sole raggiunge sempre la massima altezza; sul piano orizzontale tale direzione è – per definizione – quella del *Sud*, mentre da parte opposta sulla stessa retta si trova il *Nord*; la retta perpendicolare a questa dà poi la direzione dell'*Est* e dell'*Ovest*.

Il *Plinto di Tolomeo* serviva appunto a misurare l'altezza del Sole al momento della culminazione; per questo la pietra era orientata con le facce rivolte ai quattro punti cardinali. Quando la luce colpiva solo la faccia rivolta a Sud e in modo radente quelle laterali, si poteva misurare l'altezza del Sole.

Siamo ora in grado di fissare una convenzione per la misura dell'azimut del Sole; la scelta più diffusa è di assegnare al Nord l'azimut zero e di misurare gli angoli in verso orario. Di conseguenza la direzione dell'*Est* ha azimut di 90° , il Sud sta a 180° e l'*Ovest* a 270° .

Un'ultima annotazione: se è vero che il Sole culmina sempre esattamente a Sud ^[9], non è quasi mai vero – salvo due casi eccezionali (equinozi) – che il Sole sorga o tramonti esattamente ad Est e ad Ovest. È facile vedere dalle misure già eseguite che la differenza di azimut tra l'alba e la culminazione o tra la culminazione e il tramonto non è (quasi) mai 90° .

Registrazione in momenti diversi dell'anno

Avendo esplorato che cosa succede al passare dei giorni ci si pone il problema di spiegare perché il Sole si "comporta" in questo modo apparentemente complicato. Per questo occorre però continuare a fare periodicamente delle osservazioni per un periodo di tempo molto più lungo.

La situazione ideale sarebbe quella di programmare una serie di osservazioni durante tutto un anno solare; quanto meno sarebbe necessario coprire il periodo che va dall'inizio dell'inverno all'inizio dell'estate, almeno una volta ogni due o tre settimane.

I dati che occorre conservare per l'analisi finale sono ^[10]:

- l'altezza del Sole alla culminazione;
- gli istanti del sorgere e del tramonto e quindi la durata del periodo di luce;
- gli azimut del Sole al sorgere e al tramonto;
- l'istante della culminazione.

[9] Si dovrebbe dire: culmina sempre nella stessa direzione che chiamiamo Sud.

[10] Quando si fanno le osservazioni, si fa riferimento alla lettura dell'orologio; perché i dati siano direttamente confrontabili nel corso di tutto l'anno occorre evitare l'uso della cosiddetta "ora legale"; nel periodo in cui questa è in vigore bisogna ricordarsi di sottrarre sempre un'ora dal tempo letto sull'orologio.

A conclusione dell'intero ciclo di osservazioni si potranno costruire alcuni grafici significativi per rappresentare le grandezze sopra indicate, tutte in funzione del tempo, avendo riportato sull'asse delle ascisse il numero progressivo dei giorni trascorsi dall'inizio dell'esperienza, o meglio le date dell'anno con indicazione dei diversi mesi.

Il primo grafico mostra che l'altezza del Sole alla culminazione varia tra un minimo, raggiunto verso il 22 Dicembre, e un massimo al 21 Giugno; l'aspetto del grafico è sinusoidale: il valore medio si ha attorno al 21 Marzo e al 23 Settembre, quando l'altezza varia più rapidamente da un giorno all'altro.

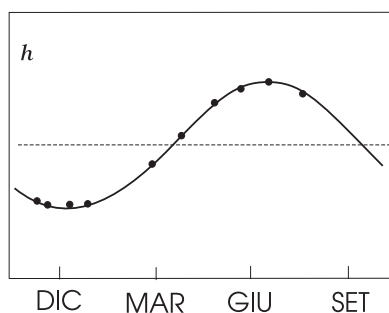


Fig. 12: Altezza del Sole, alla culminazione, durante l'anno

Il grafico che riporta la durata del periodo di luce appare molto simile al primo, nel senso che anche in questo caso l'andamento è di tipo approssimativamente sinusoidale e che le date del minimo, del massimo e dei valori intermedi corrispondono a quelle già trovate. Tali date, come noto, sono denominate rispettivamente *solstizi* ed *equinozi* ^[11].

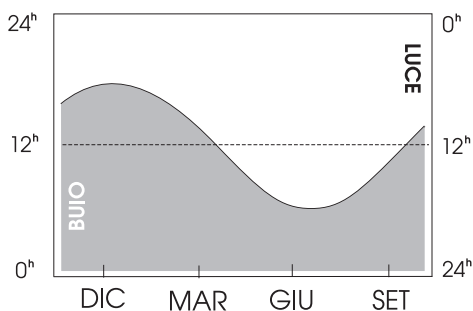


Fig. 13: Durata del periodo di luce e di buio

^[11] A margine di questa discussione può trovare spazio anche un cenno all'etimologia di queste definizioni. Il primo grafico mostra – ed è ovvio – che nei giorni prossimi ai punti di minimo e di massimo l'altezza del Sole non varia apprezzabilmente: il Sole è “stazionario” da cui il termine *solstizio*. Il secondo mostra invece che quando l'altezza del Sole ha un valore intermedio la durata della notte è uguale a quella del periodo di luce: di qui il termine *equinozio*.

Confronto tra osservazioni in luoghi diversi (scambio di dati)

Tutto quanto è stato fatto finora è consistito nella raccolta di una grande quantità di dati relativi ad una sola località, né del resto si sarebbe potuto fare altrimenti. Tuttavia ci si può chiedere se un altro gruppo di ragazzi, stando in una diversa località, avrebbe ottenuto esattamente gli stessi risultati, o risultati simili, o qualcosa di completamente diverso.

Anche questo tipo di confronto sarebbe estremamente utile per la nostra successiva discussione e dunque sarebbe bene, nel programmare un'attività di questo tipo, prendere contatti ed accordi con insegnanti di altre località per poter scambiare con essi i dati raccolti. A titolo indicativo, tenuto conto con ottimismo dei possibili errori di misura, la cosa comincia ad avere senso se le località distano tra loro almeno 250-300 km.

Ricostruzione del movimento spaziale del Sole rispetto alla Terra

Il compito che ci attende adesso è quello di spiegare, in un unico quadro coerente e possibilmente semplice, la molteplicità delle osservazioni che si son potute fare. Per questo ci serviremo di un globo terrestre, possibilmente di grandi dimensioni, di alcune sagome del tipo di quelle già usate per rappresentare degli gnomoni sulla superficie del globo, e di una lampada che simula il Sole: in questo caso la scelta migliore è di utilizzare una torcia che produca una luce intensa e concentrata; in questo modo l'ambiente può rimanere in penombra e le luci e le ombre sul globo che rappresenta la Terra sono più facilmente percepibili.

Come si è avuto modo di dire all'inizio, lo scopo non è quello di far scoprire ai ragazzi quello che già sanno benissimo; non si tratta di una ricostruzione storica delle conoscenze astronomiche dell'uomo. Possiamo quindi dare per noto che il movimento del Sole è solo apparente ed è dovuto alla rotazione della Terra sul suo asse, mentre risulta istruttivo far vedere che nel modello della Terra si possono riprodurre gli stessi fenomeni osservati.

Normalmente i globi terrestri sono montati su un supporto che mantiene l'asse terrestre "inclinato"; tutti i ragazzi sanno che l'asse terrestre è inclinato, ma quasi nessuno saprebbe dire rispetto a che cosa, o meglio, in quale sistema di riferimento esso è inclinato. Un'altra consuetudine (almeno per noi che abitiamo l'emisfero boreale) è di mostrare il globo con il polo Nord rivolto in alto e questo non di rado porta ai gustosi interrogativi circa la scomodità degli australiani di dover stare sempre a testa in giù!

Per questi ed altri motivi sarebbe opportuno, in questa fase, smontare il globo dal suo supporto così che possa essere disposto in qualunque modo secondo l'esigenza del discorso. In particolare, un utile esercizio iniziale potrebbe essere quello di far orientare il globo esattamente come la Terra: nel punto più alto dovremo mettere la nostra località, perché per noi tutta la Terra è sotto i nostri piedi; qui possiamo fissare (con nastro biadesivo) la sagoma di un piccolo gnomone. Resta poi da orientare correttamente la direzione Nord-Sud e il gioco è fatto.

Questa disposizione del globo terrestre è forse la più utile anche per chiarire il concetto di piano orizzontale e per mostrare che ogni località ha un suo piano orizzontale. Con la lampada si può mostrare che il Sole illumina una data località solo quando è sopra il suo orizzonte ed ancora ritrovare nel modello le definizioni degli angoli di altezza ed azimut e vedere come dovrebbe muoversi il Sole in modo da riprodurre l'andamento dell'ombra dello gnomone. La variazione giornaliera si ottiene facendo ruotare la lampada attorno al globo oppure ruotando il globo in verso opposto, attorno ad un asse polare.

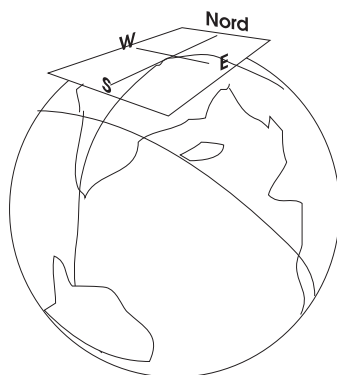


Fig. 14: Orientare il globo come la Terra

Inclinazione dell'asse terrestre sul piano dell'orbita

Per ottenere la variazione annua dell'altezza del Sole alla culminazione occorre invece alzare o abbassare la lampada rispetto al piano orizzontale fissato prima. In realtà per spiegare questo movimento non sono sufficienti i dati fin qui raccolti, ma non sembra opportuno includere ulteriori osservazioni al solo scopo di dedurre un fatto ben noto a tutti, che la Terra compie in un anno un giro attorno al Sole (quello che di solito viene definito come moto di *rivoluzione*).

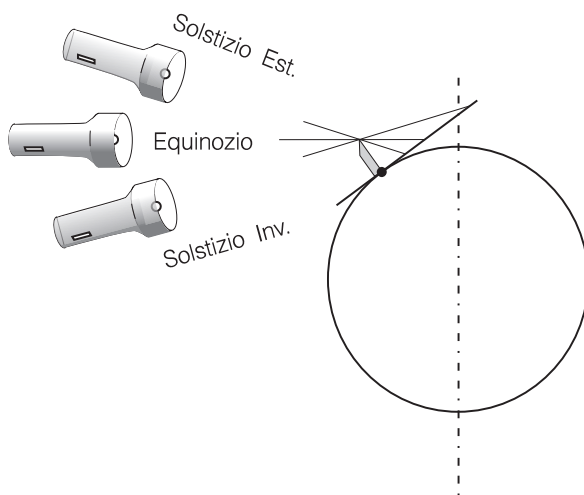


Fig. 15: Variazioni dell'altezza del Sole durante l'anno

Del resto è sufficiente aver individuato una periodicità annuale nei grafici precedenti, per richiamare immediatamente nella mente dei ragazzi che la Terra, dopo un giro attorno al Sole, è tornata nella “posizione di partenza”.

La simulazione può essere svolta efficacemente in questo modo: la torcia (il Sole) viene

tenuta in posizione fissa al centro della stanza e viene fatta ruotare in modo da seguire i movimenti del globo e tenerlo sempre illuminato. Il globo (la Terra) – tenuto adesso con il suo asse in direzione verticale – viene fatto muovere intorno alla posizione della lampada, ma al tempo stesso spostato ora più in alto della lampada, ora più in basso, in modo che l'altezza misurata con lo gnomone riproduca quella osservata. Ci si accorge facilmente che il moto del globo deve avvenire su un piano che non può essere orizzontale (cioè perpendicolare all'asse terrestre), ma inclinato e che l'angolo d'inclinazione – che corrisponde all'angolo tra l'asse terrestre e la normale al piano dell'orbita – può essere ricavato dalle misure fatte dell'altezza del Sole.

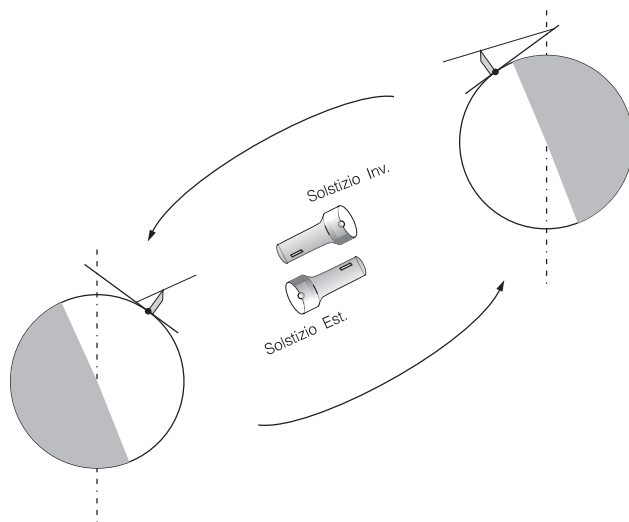


Fig. 16: Inclinazione dell'asse terrestre sul piano dell'orbita

Dalla figura 15, con l'aiuto di semplici relazioni geometriche, si vede che l'angolo di inclinazione corrisponde alla differenza tra l'altezza del Sole all'equinozio e quella al solstizio, e risulta di 23.5° circa.

Determinazione della latitudine dell'osservatore

Nella figura seguente è riportata la situazione all'equinozio; anche qui, con un po' di geometria, si vede facilmente che l'angolo di altezza del Sole misurata nel giorno dell'equinozio, oppure ricavata come valore medio dal grafico della variazione annua dell'altezza (figura 17), è complementare all'angolo che dà la latitudine del luogo di osservazione.

Questo risultato, per quanto poco preciso a causa degli errori di misura, è tuttavia di grande interesse per i ragazzi ed ancor più se, potendo confrontare i grafici ottenuti in due località diverse, essi possono toccare con mano uno degli effetti più importanti della sfericità della Terra.

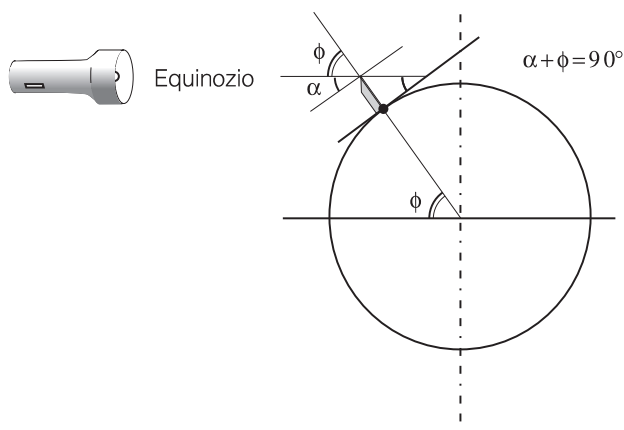


Fig. 17: Determinazione della latitudine del punto di osservazione

Definizione delle stagioni

In questo primo capitolo ci siamo limitati a registrare dei dati relativi all'altezza e all'azimut del Sole in momenti diversi della giornata e in giorni diversi dell'anno; questi, ed altri fatti supposti noti per semplicità, sono stati utilizzati solo per ricostruire i movimenti principali della Terra.

Altre considerazioni possono essere svolte partendo dalla constatazione che le date dei solstizi e degli equinozi dividono l'intero ciclo annuale in quattro parti – dette *stagioni* – che, da un punto di vista climatico, sono diversamente caratterizzate proprio a causa del fatto che l'altezza del Sole varia continuamente.

Attualmente la primavera inizia con l'equinozio del 20 (o 21) di marzo, l'estate con il solstizio del 21 giugno, l'autunno con l'equinozio del 22 (o 23) settembre e l'inverno con il solstizio del 21 (o 22) dicembre. La doppia data deriva dal fatto che la durata di un anno non corrisponde ad un numero intero di giorni: da un anno al successivo gli equinozi ritardano di circa 6 ore che, in un ciclo di 4 anni, vengono recuperate con l'inserimento dell'anno bisestile.



2. Ciclo diurno e stagionale dell'illuminamento

La durata dell'illuminamento solare

Nel capitolo precedente abbiamo raccolto delle osservazioni e trovato la durata del periodo di luce nell'arco di una giornata e come questa durata varia durante l'anno.

Il risultato si riferisce ovviamente alla località ove ci troviamo e per capire se e come le cose vanno diversamente in un'altra località occorrerebbe spostarsi oppure scambiare le osservazioni con quelle di un altro gruppo che opera altrove.

Ma come si potrebbe determinare la durata del periodo di luce in qualunque giorno e località, senza ricorrere alle osservazioni?

Il metodo che viene qui mostrato fa uso di semplici elementi di geometria, ma ciò nonostante consente di ottenere risultati di grande utilità pratica, per quanto approssimati. Al tempo stesso ci si può rendere conto come anche gli antichi potessero avere grandi capacità di calcolo e previsione in campo astronomico, pur non disponendo delle moderne strumentazioni di osservazione e di calcolo.

Durata del giorno e della notte: un calcolatore... geometrico.

Il calcolo esatto della durata del periodo di luce è molto complicato e richiede conoscenze e tecniche che esulano dall'ambito di questa presentazione. Ma se ci si accontenta di una stima – con un'approssimazione dell'ordine di diversi minuti – sufficiente a capire come vanno le cose in una qualunque località, si può utilizzare il metodo qui presentato che al posto della necessaria matematica (algebra, analisi, trigonometria...) fa uso di semplici figure geometriche.

Per ridurre al minimo le difficoltà si devono naturalmente operare certe semplificazioni, come quella di considerare che la Terra si muova attorno al Sole su un'orbita circolare, a velocità uniforme. Si trascura quindi l'eccentricità dell'orbita, cioè il fatto che l'orbita in realtà è ellittica.

È bene precisare che per *periodo di illuminamento* si intende il tempo in cui il Sole, o una porzione di esso, è al di sopra dell'orizzonte; non si tiene quindi conto dei periodi detti di "crepuscolo" in cui il cielo è ancora più o meno luminoso mentre il Sole non è ancora sorto o è già tramontato. Ma, a parte questo, altri due importanti fatti verranno trascurati: la dimensione apparente del Sole e la presenza dell'atmosfera. Il Sole non è puntiforme (in una giornata di cielo densamente velato o di nebbia, quando sia possibile guardare verso il Sole senza abbagliarsi, si vede chiaramente un dischetto luminoso grande all'incirca quanto la Luna, con un diametro angolare di circa mezzo grado) e per questo motivo impiega un certo tempo a scomparire del tutto dietro l'orizzonte. L'atmosfera fa apparire gli oggetti celesti un po' più alti sull'orizzonte e dunque anche per questo motivo la durata effettiva del periodo di luce sarà sempre più lunga di quella calcolata con questo metodo. La differenza, che per i due effetti è di almeno 7 minuti, dipende sia dalla data che dalla latitudine del luogo; può essere di una decina di minuti, a latitudini intermedie, e aumenta andando verso le zone polari; di questo si potrà tener conto nel risultato finale.

Calcolo della durata del giorno e della notte

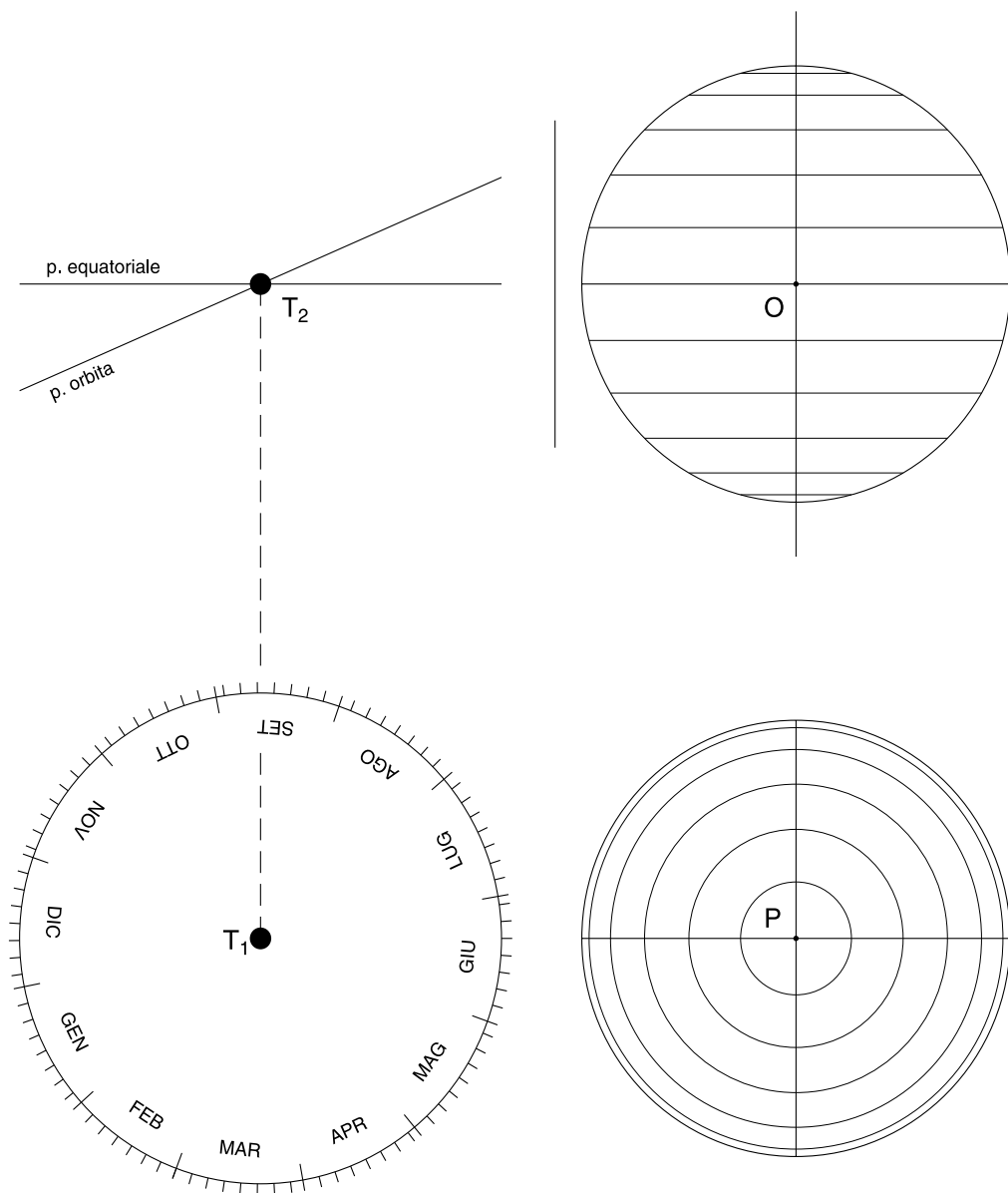


Fig. 18: Il calcolatore "geometrico". Originale da fotocopiare.

La determinazione della durata del giorno e della notte sarà tanto migliore quanto più precisa viene fatta la figura – ciò che richiede una certa cura – fermo restando che comunque il risultato, per quanto detto sopra, è approssimato ^[12].

La figura 18 contiene tutto ciò che occorre; essa rappresenta il nostro “calcolatore”: potrà essere fotocopiata in più esemplari per essere utilizzata quante volte si vuole. Prima di mostrare come si usa cerchiamo di capire che cosa rappresenta.

Il calcolatore è costituito di 4 elementi. I due a sinistra rappresentano il moto “apparente” del Sole attorno alla Terra: l’orbita è vista nel suo piano (in basso) e “di taglio” (in alto) inclinata di circa 23.5° rispetto al piano equatoriale terrestre. I due elementi di destra rappresentano invece la Terra vista “di lato”, ovvero in proiezione equatoriale (sopra), e vista “dall’alto”, cioè in proiezione polare (sotto). ^[13]

L’uso del “calcolatore” è molto semplice; i dati necessari sono la data dell’anno e la latitudine della località considerata. La data determina la posizione del Sole sull’orbita “apparente”; si tratta quindi di individuare nelle due proiezioni della Terra quale parte risulta illuminata e quale in ombra e successivamente i rispettivi periodi di luce e buio durante la rotazione terrestre.

Vediamo dunque come si opera in un caso specifico, preso ad esempio. In figura 19 è riprodotto lo stesso “calcolatore” usato per determinare la durata dei periodi di luce e di buio a Torino (posta a circa 45° di latitudine nord), il 25 luglio.

Occorre seguire questi passi:

- 1) Determinare la posizione del Sole sull’orbita apparente, nella data considerata.

Si parte fissando il punto S_1 sul cerchio in basso a sinistra ove sono indicate le date: i tratti lunghi indicano il primo giorno di ogni mese; gli altri, intervallati di 4 giorni, indicano il 5, 9, 13... Per le date intermedie occorre interpolare.

- 2) Individuare il parallelo della località nelle due proiezioni della Terra.

Sulle due proiezioni della Terra sono già riportati i paralleli di latitudine 15° , 30° , 45° ... Per le località poste a latitudini diverse occorre tracciare – con cura – il relativo parallelo.

- 3) Determinare la direzione dei raggi (paralleli) che provengono dal Sole.

A partire dal punto S_1 si determina il punto S_2 tracciando la parallela a $T_1 T_2$, e successivamente il punto S_3 parallelamente al piano equatoriale. Il segmento che unisce S_3 con il centro O della Terra dà la direzione dei raggi solari nella data considerata (l’angolo, rispetto al piano equatoriale, è la “declinazione” del Sole).

- 4) Indicare, nella proiezione equatoriale la parte illuminata e la parte buia della Terra.

Poiché si suppone (con ottima approssimazione) che il fascio dei raggi solari sia parallelo, questi illuminano esattamente un emisfero della Terra; la linea di demarcazione tra la parte illuminata e quella al buio (detta “terminatore”) nella proiezione equatoriale è un diametro perpendicolare alla direzione del fascio; si traccia dunque il

[12] Si noti che la stima della durata del giorno potrebbe essere migliore se si tenesse conto dell’eccentricità dell’orbita terrestre; qui si è preferita la semplicità alla precisione.

[13] Polo Nord o Sud a seconda della necessità.

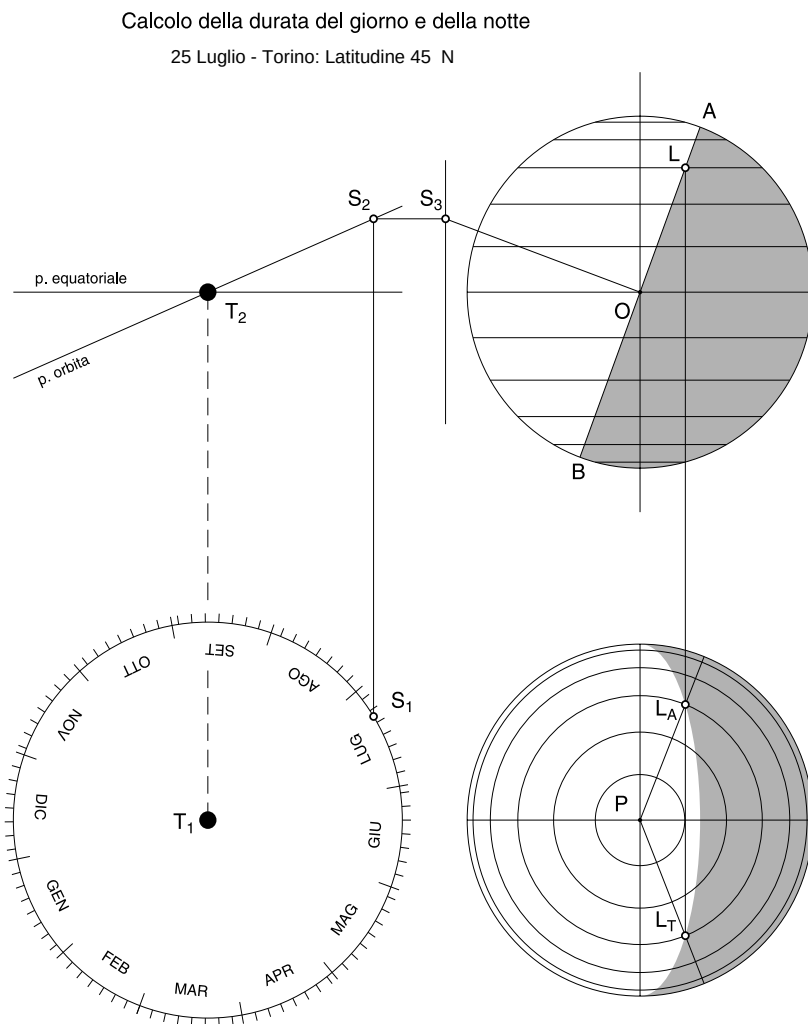


Fig. 19: Durata del giorno e della notte a Torino, il 25 luglio.

diametro AB perpendicolare a S_3O . Il punto L, intersezione del terminatore con il parallelo della località considerata, indica quindi la posizione della località nel momento in cui – a causa della rotazione terrestre – passa dalla luce al buio, cioè al tramonto del Sole, oppure, dalla parte opposta della Terra, quando passa dal buio alla luce (alba).

- 5) Indicare, nella proiezione polare la posizione della località considerata al momento del tramonto e dell'alba.

Tracciando per L la parallela all'asse terrestre, fino ad intersecare il parallelo considerato nella proiezione polare in basso, si determinano i punti L_A e L_T che rappresentano

le posizioni di Torino all'alba e al tramonto del 25 luglio ^[14].

- 6) Misurare, con un goniometro, l'angolo al centro della parte di parallelo illuminato dalla luce (o quello della parte al buio).

Nel caso considerato si troverebbe un angolo di circa 222° per la parte illuminata o di 138° per la parte al buio.

- 7) Convertire la misura dell'angolo in misura di tempo.

La rotazione della Terra è uniforme, con un periodo – rispetto al Sole – di 24 ore; dunque la Terra ruota di 1° ogni 4 minuti. Ne segue che una rotazione di 222° avviene in un tempo di 888 minuti, pari a 14 ore e 48 minuti: tanto dura – all'incirca – il periodo di luce. Al contrario il periodo di buio risulta di 552 minuti, pari a 9 ore e 12 minuti ^[15].

Confrontando adesso, per questa stessa data, quello che accade in località diverse della Terra, in particolare al variare della latitudine, notiamo che a latitudini superiori la durata del giorno cresce, mentre a latitudini inferiori decresce fino ad arrivare a circa 6 ore (in qualunque stagione dell'anno) all'equatore.

Nello stesso giorno, a latitudini meridionali la notte ha una durata maggiore del giorno, cosicché mentre in Europa, Asia e Nord America siamo nella stagione estiva, in Australia, Sud America e Sud Africa siamo nel periodo più freddo.

Intorno al Polo Nord c'è poi una regione che durante un'intera rotazione della Terra rimane sempre esposta al Sole; là il periodo di luce dura 24 ore e dunque il Sole non tramonta mai. Al contrario, nella corrispondente regione attorno al Polo Sud, il Sole non sorge mai e l'intera giornata trascorre al buio (o nel crepuscolo).

Avendo trovato la durata del periodo di luce, possiamo anche dire a che ora (approssimativamente) sorge e tramonta il Sole in una data località?

Se la culminazione del Sole capitasse sempre e ovunque a mezzogiorno esatto la risposta sarebbe positiva e il calcolo immediato; purtroppo non è così, per due motivi.

Il primo è che adesso non possiamo trascurare il fatto che l'orbita della Terra, oltre ad essere inclinata sull'equatore, non è circolare ma ellittica. L'effetto può arrivare a oltre un quarto d'ora in più o in meno nei vari periodi dell'anno, ma su questo non possiamo dire di più.

Il secondo motivo è che l'ora segnata dagli orologi è un'ora “convenzionale”: in qualunque località d'Italia gli orologi segnano il mezzogiorno allo stesso istante e lo stesso vale per tutte le nazioni europee comprese tra il Portogallo e la Polonia ^[16]. Tuttavia è facile rendersi conto che il Sole culmina a Lisbona circa due ore dopo che è culminato a Varsavia, a causa della differente longitudine. Dunque per trovare – anche approssimativamente – l'ora del sorgere e del tramonto del Sole occorre conoscere il

[14] Vista dal Polo Nord, la Terra ruota in verso antiorario.

[15] Il calcolo esatto dà un periodo di luce di 14 ore e 59 minuti, ma trascurando l'effetto dell'atmosfera e trattando il Sole come puntiforme si avrebbe esattamente 14 ore e 48 minuti: la differenza, per difetto, è di circa 10 minuti, come previsto.

[16] Escluse la Gran Bretagna e l'Irlanda.

momento del transito del Sole al meridiano, tenendo conto delle differenze di longitudine tra le varie località.

Questo ci consente di accennare al fatto che, se – al contrario – si può determinare in qualche modo la differenza tra i tempi di culminazione del Sole in due diverse località, si ottiene subito la differenza delle longitudini, ovvero la longitudine di un luogo conoscendo quella dell'altro.

Effetti sulla temperatura

La luce “riscalda”

Abbiamo visto che la rotazione della Terra su se stessa produce, come fenomeno di gran lunga più appariscente, l'alternarsi del giorno e della notte. Un'altra variazione periodica è quella della temperatura ambiente. Senza preoccuparci di darne una definizione rigorosa, ci limitiamo ad osservare che durante le 24 ore anche la temperatura cambia continuamente, che “mediamente” essa è maggiore di giorno e minore di notte e che ancora “in media” essa è maggiore d'estate e minore d'inverno.

Naturalmente per fare queste osservazioni è necessario misurare regolarmente la temperatura dell'ambiente (tenendo il termometro sempre nello stesso luogo all'aperto, in ombra e possibilmente lontano dalle pareti), ma occorre poi operare delle medie perché la temperatura dipende da molti fattori che la fanno variare in modo complicato.

Non è difficile tuttavia riconoscere la tendenza di fondo che si è detta sopra e che in qualche modo lega i due fenomeni: l'andamento medio della temperatura appare correlato all'illuminazione del Sole. Quello che adesso vogliamo fare è di scoprire qualcosa di più a questo proposito.

Un analogo meccanico: il recipiente bucato

Si consideri un recipiente cilindrico con un piccolo foro, vicino al fondo. Se lo riempiamo d'acqua e successivamente liberiamo il foro si nota che inizialmente il livello scende rapidamente, poi sempre più piano. La velocità dipende dall'altezza.

Adesso, al contrario partiamo con il recipiente vuoto e cerchiamo di riempirlo tenendo aperto il foro, con un flusso costante d'acqua. Man mano che il livello sale, il flusso d'acqua che esce aumenta, ma quando questo arriva ad essere uguale al flusso del rubinetto il livello raggiunge una posizione di “equilibrio” e non sale più.

Il livello raggiunto dall'acqua nel recipiente è dunque legato al flusso d'acqua che arriva dal rubinetto. Se questo è maggiore il livello è più alto, se è minore il livello è più basso.

Qualcosa di simile avviene quando cerchiamo di riscaldare un corpo immerso in un ambiente più freddo.

Quando riscaldiamo un corpo usiamo energia, cioè – per meglio dire – trasferiamo energia da una sorgente (un fornello se scaldiamo il latte, il movimento rapido se si stropicciano le mani, il Sole . . .) al corpo. Tuttavia, se il corpo non è isolato, tende a riportarsi alla temperatura dell'ambiente circostante cedendo parte dell'energia che ha ricevuto, con una rapidità che aumenta con l'aumentare della differenza di temperatura.

Alla fine la temperatura del corpo – esattamente come il livello dell'acqua nel recipiente – dipenderà dal flusso di energia ricevuta.

Esperimenti con due o più termometri.

Proviamo a verificare quanto detto con qualche semplice esperienza.

Nella forma più immediata è sufficiente esporre un termometro al Sole, o alla luce di una lampada collocata a pochi centimetri di distanza, per accorgersi che la temperatura aumenta; per questo per misurare la temperatura ambiente il termometro deve essere sempre collocato *all'ombra*.

Tuttavia è preferibile misurare la temperatura di un oggetto capace di riscaldarsi rapidamente, in modo controllato e apprezzabile, così da valutare differenti flussi di calore, variandone ad esempio la disposizione rispetto alla sorgente di luce.

Un'idea particolarmente semplice è di utilizzare una moneta messa direttamente a contatto con il bulbo di un comune termometro da ambiente come quello mostrato in figura 20, avendo l'accortezza di far incidere la luce solo sulla superficie metallica e non sul termometro.

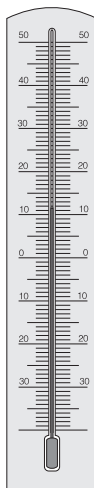


Fig. 20: Termometro da ambiente con il bulbo scoperto.

Per mezzo di alcuni supporti di cartoncino o compensato opportunamente sagomati, come in figura 21, è possibile esporre la superficie della moneta alla radiazione, controllandone l'inclinazione rispetto alla direzione da cui proviene la luce.

Per fare questo è opportuno costruirsi (va sempre bene il cartoncino) un supporto ad inclinazione variabile, sulla quale appoggiare il termometro. In figura 22 è mostrata una possibile costruzione, il cui schema è riprodotto nella Tav. V, fuori testo.

Come sorgente luminosa, nelle prove che di seguito vengono proposte, si può utilizzare una lampada abbastanza potente (100 W o meglio una da 250 W alogena). Le prove possono essere fatte indipendentemente dalla presenza del Sole (dentro una stanza, con il cielo coperto o di sera) e si può anche variare la distanza della sorgente dall'oggetto, cosa che con il Sole non è ovviamente possibile.

Notare ancora che l'esposizione diretta al Sole, in giornate particolarmente calde, rende la prova più difficoltosa in quanto la stessa temperatura ambiente risulta più elevata.

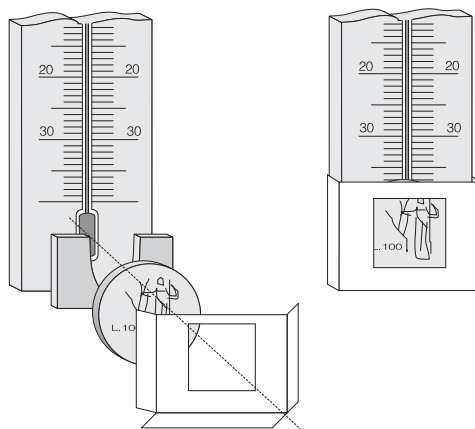


Fig. 21: Montaggio della moneta sul bulbo del termometro.

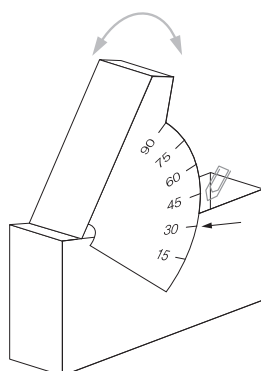


Fig. 22: Supporto del termometro ad inclinazione variabile.

- Dipendenza dalla distanza.

Come si è detto, la temperatura raggiunta all'equilibrio dalla moneta è legata al flusso di calore che dalla sorgente raggiunge la superficie della moneta. Secondo la schematizzazione più semplice, la differenza di temperatura con l'ambiente dovrebbe essere proporzionale al flusso di energia ricevuto dalla superficie esposta. Nell'esperienza pratica la relazione esatta tra le due grandezze in esame può essere molto più complicata. Per questo, nel caso nostro, ci accontenteremo di osservazioni poco più che qualitative. Così è facile osservare che, mantenendo la superficie esposta sempre perpendicolare alla direzione in cui si propaga la luce, la temperatura di equilibrio decresce con la distanza.

Il grafico in figura 23, a sinistra, mostra il risultato di una serie di osservazioni che conferma sostanzialmente la previsione.

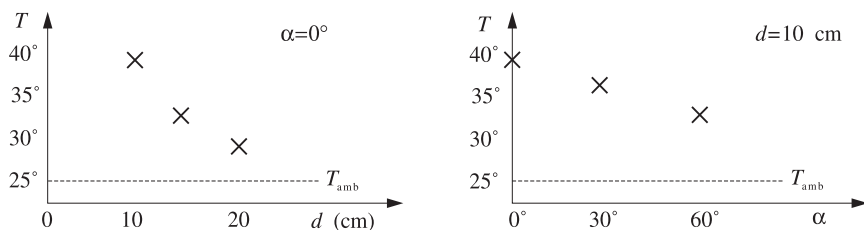


Fig. 23: Temperatura di equilibrio al variare della distanza e dell'inclinazione.

- Dipendenza dall'inclinazione.

Una diversa serie di osservazioni si può fare variando l'angolo α tra la normale alla superficie della moneta e la direzione di propagazione della luce, mantenendo costante la distanza tra la lampada e la moneta sul termometro.

Il grafico in figura 23, a destra, mostra l'insieme delle osservazioni. In particolare si nota che per un angolo di circa 60° si ottiene approssimativamente lo stesso risultato di quando si aumenta la distanza di un fattore 1.4.

Questo risultato non è difficile da spiegare, da un punto di vista teorico, ed è giusto che le cose vadano proprio così.

Spiegazione dei risultati: un po' di teoria.

L'esperienza ha mostrato che il termometro o la moneta illuminati ricevono energia dalla sorgente di luce; dunque la luce – o per meglio dire *la radiazione* di cui la luce è la parte visibile – trasporta energia attraverso lo spazio.

Se si considerano due superfici sferiche di diverso raggio attorno alla sorgente, l'energia che le attraversa in un certo intervallo di tempo è la stessa che dunque si distribuisce (in media) in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza. In particolare, se la distanza tra la superficie illuminata e la lampada viene aumentata di un fattore 2 il flusso di energia che raggiunge la moneta dovrebbe essere circa un quarto (vedi figura 24).

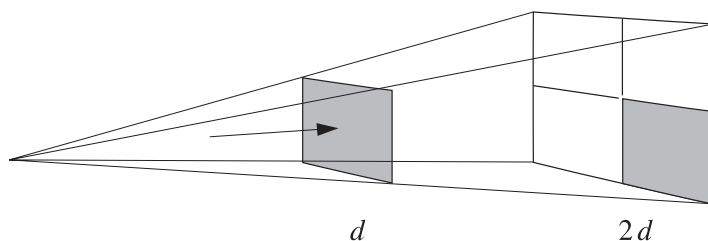


Fig. 24: Variazione del flusso di energia con la distanza.

Per quanto riguarda l'inclinazione della superficie rispetto alla direzione dei raggi di luce, si consideri innanzitutto un oggetto a forma di parallelepipedo a sezione quadrata; per la verità, parlando di sezione quadrata bisognerebbe precisare “sezione normale”,

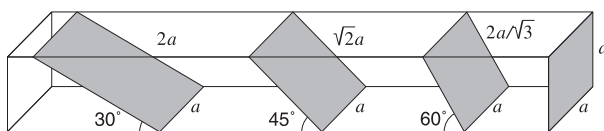


Fig. 25: Sezioni diverse di uno stesso parallelepipedo.

perché a seconda dell'inclinazione con cui si effettua il taglio la sezione ha una forma e un'area diversa (vedi figura 25)

Consideriamo ora, nello spazio, un parallelepipedo a sezione quadrata, il cui spigolo maggiore (molto più lungo degli altri) sia parallelo ai raggi di luce che incidono su una superficie. La figura 26 mostra che, fissato un certo intervallo di tempo, la stessa energia trasportata dalla luce si distribuisce su aree diverse a seconda dell'angolo di inclinazione o viceversa una stessa superficie riceve meno energia quanto più piccolo è l'angolo tra i raggi di luce e il piano della superficie. Ad esempio, per un angolo di 30° l'area della sezione è doppia rispetto al caso di incidenza perpendicolare e dunque l'energia ricevuta su una stessa area è la metà.

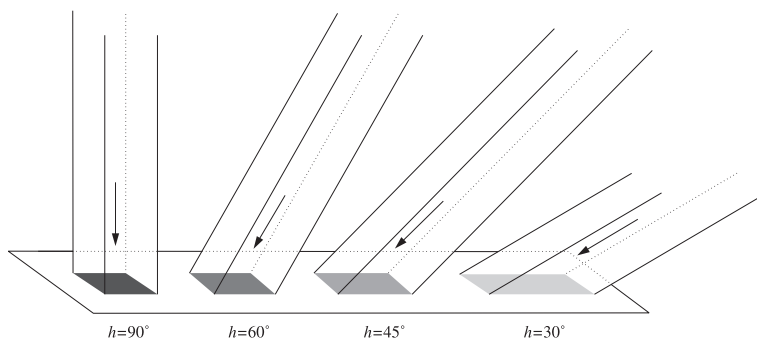


Fig. 26: Un fascio di raggi incidente con inclinazioni diverse.

In questo caso l'angolo tra la direzione dei raggi e la normale alla superficie è 60° : la nostra esperienza ha mostrato che si aveva all'incirca la stessa temperatura mantenendo la superficie perpendicolare e aumentando la distanza di un fattore 1.4: la legge “dell'inverso del quadrato della distanza” ci dice appunto che il flusso di energia diminuisce di un fattore $1.4^2 \approx 2$.

Tornando a parlare dell'effetto dell'illuminazione solare sulla temperatura media, a cosa va attribuita la differenza tra la stagione calda e quella fredda?

L'esperienza mostra che ai ragazzi viene più spontaneo pensare al fatto che, a causa dell'eccentricità dell'orbita terrestre, la distanza Terra-Sole varia periodicamente durante l'anno. Questo è vero, tuttavia per avere l'effetto osservato, occorrerebbe una variazione di distanza molto grande e di conseguenza si dovrebbe poter osservare il disco solare ora più grande, ora più piccolo.

Oltre a ciò bisogna notare che la minima distanza Terra-Sole (si dice che la Terra è al *perielio*) si ha ai primi di Gennaio e la massima (*afelio*) ai primi di Luglio... proprio il

contrario di quello che si vorrebbe. Questo conferma che le variazioni di distanza sono inessenziali per quanto riguarda il ciclo delle stagioni.

Se invece pensiamo all'effetto della diversa inclinazione dei raggi sulla superficie sferica della Terra, come mostrato in figura 27, si deduce che l'energia si distribuisce in modo molto diverso sulle diverse regioni della Terra; le regioni che si riscaldano di più sono quelle in cui i raggi incidono con piccoli angoli rispetto alla verticale, cioè quelle in cui il Sole è molto alto sull'orizzonte.

L'altezza del Sole sull'orizzonte è dunque il fattore determinante per il riscaldamento, sia perché il flusso di energia per unità di superficie è maggiore, sia perché la durata dell'illuminamento aumenta con l'altezza del Sole alla culminazione.

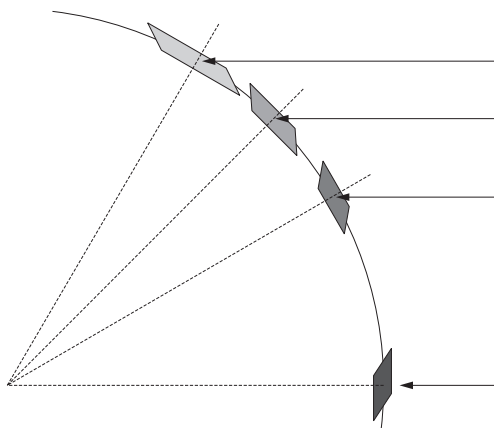


Fig. 27: Diversa illuminazione al variare dell'altezza del Sole.

Variazioni termiche annue e diurne in una data località

Abbiamo visto che la massima durata di illuminazione – nell'emisfero nord – si ha nel giorno del solstizio d'estate, cioè il 20-21 giugno; contemporaneamente il Sole raggiunge la sua massima altezza sull'orizzonte, attorno ai 70° nell'Italia centrale. Se l'illuminazione è massima in questo giorno anche il flusso di calore è massimo: perché allora fa più caldo nel periodo tra luglio e agosto, quando le giornate sono più corte e l'altezza massima del Sole è già diminuita apprezzabilmente?

Esercizio: La cassa del pizzaiolo.

Un pizzaiolo guadagna diversamente nei vari giorni della settimana; in media incassa di più nel fine settimana e di meno negli altri giorni, cosicché fissa il giorno di chiusura al mercoledì. I suoi ricavi sono in media i seguenti (espressi in un'unità arbitraria che chiameremo "Moneta"):

Giorno	Incasso (in “Monete”)
Lunedì	130
Martedì	40
Mercoledì	0
Giovedì	40
Venerdì	110
Sabato	270
Domenica	250
In totale	840

Come si nota il massimo incasso si ha il sabato (270 Monete) e il minimo il mercoledì (0, essendo chiuso), mentre l'incasso medio è di 120 Monete.

Il pizzaiolo decide di versare in banca una quota fissa giornaliera, lasciando in cassa la somma rimanente.

È chiaro che se verserà meno di 120 Monete al giorno il valore della cassa aumenterà sempre più, mentre se verserà più di 120 Monete al giorno la cassa si prosciugherà. Decide dunque di versare esattamente 120 Monete al giorno cosicché il valore della cassa rimane – in media – lo stesso. Ecco dunque il prospetto del denaro che si trova in cassa all'inizio e alla fine di ogni giornata supponendo, per ipotesi, che il lunedì mattina ci siano 400 Monete.

Giorno	Iniziale	+ incasso	- versamento	Finale
Lunedì	400	+130	-120	410
Martedì	410	+40	-120	330
Mercoledì	330	+0	-120	210
Giovedì	210	+40	-120	130
Venerdì	130	+110	-120	120
Sabato	120	+270	-120	270
Domenica	270	+250	-120	400

La figura 28 rappresenta graficamente, mediante istogrammi, gli stessi dati delle due tabelle; nella sostanza non aggiunge nulla alle tabelle, ma rende più immediata la percezione dell'andamento delle grandezze prese in esame.

Appare dunque evidente che i massimi e minimi degli incassi non coincidono con i massimi e minimi dei soldi che sono in cassa: mentre il massimo incasso si ha il sabato, il valore della cassa aumenta e raggiunge il massimo il lunedì sera; il minimo incasso è di mercoledì ma il minimo in cassa si ha il venerdì sera. Quello che fa “salire” e “scendere” la cassa è infatti la differenza tra l'entrata giornaliera e l'uscita media: finché l'entrata supera l'uscita media la cassa “sale”; la “discesa” inizia solo quando l'incasso è inferiore all'uscita media.

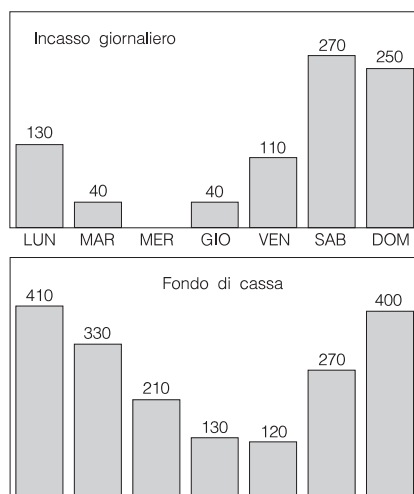


Fig. 28: Gestione settimanale del “pizzaiolo”.

Per tornare al nostro problema, la temperatura – che abbiamo visto rappresenta il livello di energia assorbita – è l’analogo del valore in cassa, mentre il flusso variabile d’energia che arriva su un certo territorio è l’analogo dell’incasso.

I valori massimi e minimi della temperatura media sono quindi spostati in avanti rispetto ai valori massimi e minimi del flusso di energia, cosicché mentre il massimo del flusso energetico alle nostre latitudini si ha attorno al 21 giugno, solstizio d’estate, i massimi di temperatura si registrano tra luglio e agosto e analogamente, anche se dopo il solstizio d’inverno del 22 dicembre le giornate cominciano ad allungarsi e il flusso di energia torna a crescere, le temperature minime si registrano verso gennaio-febbraio. Nell’emisfero sud succede esattamente il contrario e dunque le stagioni risultano invertite.

In modo del tutto analogo vanno le cose nel ciclo diurno: la temperatura massima si raggiunge intorno alle tre del pomeriggio (e non a mezzogiorno quando si ha il massimo di irradiazione) e la minima verso le 3-4 di notte e non a mezzanotte.

Variazioni globali e ciclo stagionale

Quanto sopra vale, in media, relativamente ad una data località. Da un posto all’altro intervengono molti fattori che qui non sono stati presi in considerazione (morfologia del suolo, altitudine, distanza dal mare, vegetazione, la presenza di comunità umane, per citarne alcuni) e non è possibile spiegare quindi le cose in dettaglio. Globalmente però si capisce che, andando dall’equatore verso il polo, poiché l’inclinazione dei raggi rispetto alla perpendicolare aumenta e dunque l’illuminamento è inferiore, si avranno in media temperature sempre più basse; anche se al Polo Nord il Sole d’estate è visibile per sei mesi senza che tramonti mai, esso è così basso sull’orizzonte che non arriva a riscaldare più che tanto e la temperatura media arriva appena attorno a 0° .

Effetti meteorologici “in grande”

Il diverso riscaldamento alle diverse latitudini determina la circolazione in grande dell'atmosfera. Le zone subsolari, cioè quelle in cui il Sole arriva allo zenit a mezzogiorno, si scaldano molto di più e ciò provoca correnti ascensionali di masse d'aria che si sono riscaldate a contatto con il suolo; al contrario nelle zone fredde polari si avrà una discesa di aria.

La circolazione dell'atmosfera dovrebbe comportare continui venti al suolo dalle zone polari a quelle equatoriali, e venti in quota in direzione opposta (figura 28, a sinistra). Le cose non vanno esattamente così perché il tutto è reso più complicato dal fatto che la Terra ruota su se stessa: la circolazione dell'atmosfera risulta divisa in tre fasce, separate in latitudine ^[17].

Le fasce polari ed equatoriali sono caratterizzate da correnti di aria rispettivamente fredde e calde. La fascia intermedia presenta invece una circolazione il cui verso è invertito e in cui l'aria, in un certo senso “miscelata”, caratterizza le zone “temperate” (figura 29, a destra).

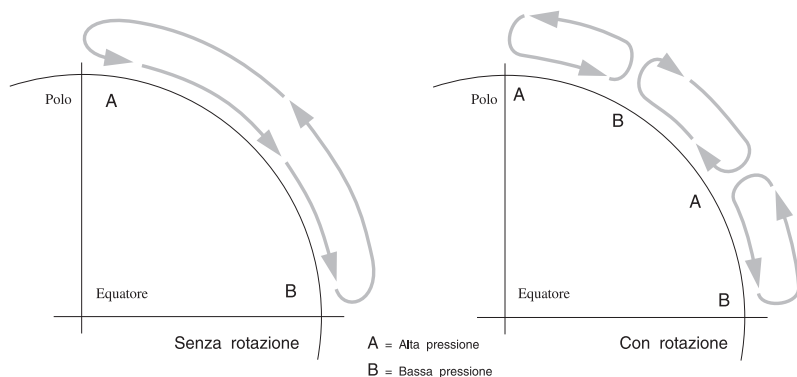


Fig. 29: La circolazione generale dell'atmosfera.

Zone climatiche

La diversa irradiazione solare, assieme alla circolazione generale dell'atmosfera prodotta da quella, sono alla base di una prima, per quanto rozza, classificazione delle zone climatiche, cioè delle porzioni in cui viene divisa la superficie della Terra in relazione al tipo di clima che vi si sperimenta (vedi figura 30):

[17] Quella così descritta è una situazione “media”. I limiti delle fasce in realtà cambiano continuamente e alla circolazione generale si sovrappongono le “perturbazioni” legate a fenomeni di instabilità e alla presenza determinante del vapore acqueo, oltre ai fenomeni locali cui si è già accennato.

- Zona tropicale: è la fascia equatoriale compresa tra i due paralleli di latitudine 23.5° detti rispettivamente “Tropico del Cancro” a nord e “Tropico del Capricorno” a sud. Tutte le località comprese in questa fascia sono caratterizzate dal fatto che il Sole transita allo zenit, cioè sulla verticale del luogo, una o due volte l’anno. Sono quindi le regioni più esposte all’irradiazione solare, ove si raggiungono le temperature massime. In generale la fascia centrale è caratterizzata da climi umidi e ricca vegetazione, mentre i bordi (fasce tropicali) da climi secchi e territori desertificati.
- Zone temperate: come detto hanno caratteristiche climatiche intermedie tra le altre due caratterizzate da una grande variabilità stagionale; pure la vegetazione è molto varia, anche in relazione ad altri fattori già citati: distribuzione dei continenti, distanza dal mare, presenza di montagne, ecc.
- Zone polari: comprendono le calotte polari fino ai paralleli di latitudine 67.3° . Sono quindi le regioni che ai solstizi risultano completamente illuminate (il Sole non tramonta) o al buio. Come si è fatto notare, in ogni caso il Sole è basso sull’orizzonte e la temperatura è tanto bassa da conservare intere distese di ghiacci. La vegetazione è quasi totalmente assente.

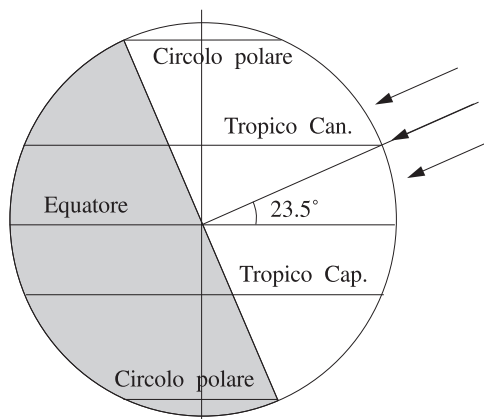


Fig. 30: Zone climatiche della Terra (Illuminazione al sostizio d'estate).

Come detto, quanto sopra vale solo in media. In realtà le cose sono molto più complicate: basta pensare che i limiti delle diverse zone non sono ben definiti, ma variano durante l’anno in conseguenza del fatto che d’estate l’emisfero nord è più irradiato – e quindi più riscaldato – di quello sud e viceversa d’inverno.

Di grande importanza, ai fini della determinazione del clima, è pure la distribuzione delle terre emerse (i continenti, la loro forma ed estensione rispetto ai mari); l’asimmetria tra i due emisferi, da questo punto di vista, fa sì che anche il clima risulti sostanzialmente diverso.

Due esercitazioni per concludere

Prima esercitazione. E se la Terra non fosse “inclinata” ?

Possiamo concludere con una divertente esercitazione: che cosa accadrebbe di diverso se la Terra non fosse inclinata, cioè se l'asse terrestre fosse perpendicolare al piano dell'orbita attorno al Sole?

In poche parole i fatti essenziali sarebbero due:

- 1) In tutti i punti della Terra l'illuminamento durerebbe sempre 12 ore ed altrettanto la notte. In ogni località il Sole raggiungerebbe sempre la stessa altezza alla culminazione.
- 2) Di conseguenza non esisterebbero le stagioni perché in ogni periodo dell'anno si avrebbe la stessa situazione.

In più si potrebbe dire che la zona equatoriale sarebbe in media più calda e quelle polari più fredde e questo comporterebbe una maggiore attività della circolazione atmosferica.

Seconda esercitazione. Il caso di Urano.

Al contrario del caso precedente, Urano è un pianeta “sdraiato” nel senso che il suo asse di rotazione è quasi adagiato sul piano dell'orbita. Al di là del fatto che Urano, per numerosi motivi, non potrebbe essere abitabile dall'uomo, quale ci si aspetta che sia la sua climatologia?



3. Luce e colori: osservazioni e interpretazioni

Luci e ombre

Osservazioni preliminari

Abbiamo già visto, nel capitolo 1, che per avere delle ombre nette, cioè ben definite, occorre che la sorgente sia o molto piccola o molto lontana o, meglio ancora, entrambe le cose: si parla allora di sorgente “puntiforme”.

Se utilizziamo due o tre di queste sorgenti, ognuna produce un’ombra e le diverse ombre in parte si sovrappongono; nei punti comuni di tutte le ombre parziali l’ombra è più scura; ove invece alcune ombre si sovrappongono a punti illuminati c’è solo “penombra”.

Rovesciando il punto di vista – e questo non è ovvio, ma richiede una certa padronanza delle relazioni spaziali – si può notare che i punti in ombra piena sono quelli dai quali non è possibile “vedere” nessuna delle sorgenti di luce; i punti in penombra sono invece quelli da cui è possibile vedere una o più sorgenti.

La situazione mostrata in figura 31 può essere verificata sperimentalmente usando lampade con il filamento molto concentrato, tali cioè da produrre separatamente un’ombra abbastanza netta.

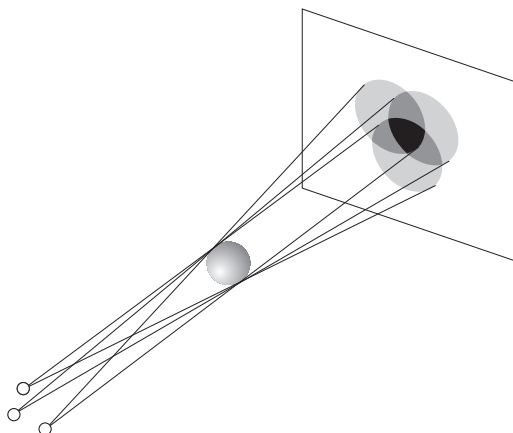


Fig. 31: Zone di ombra e penombra con tre sorgenti.

Il Sole stesso pur essendo molto lontano non è affatto piccolo e le ombre presentano una certa sfumatura ai bordi. In altre parole l’ombra che vediamo è la sovrapposizione di tante ombre, ciascuna dovuta ad una piccola porzione di superficie solare, come se l’oggetto fosse illuminato da molte sorgenti distinte.

Si può ancora notare che la zona di penombra è tanto più grande quanto maggiore è la distanza dell’oggetto dalla sua ombra ^[18]. L’ombra dello spigolo di una casa è più

[18] Come si è visto al cap. 2 il diametro angolare “apparente” è di circa mezzo grado e dunque

netta alla base e mostra una sfumatura crescente allontanandosi da questa. Ma un caso particolarmente evidente e significativo si ha durante un'eclisse di Sole: la Luna produce sulla Terra una grandissima zona di penombra (e da questi punti l'eclisse appare come parziale), mentre la zona d'ombra è molto piccola (solo da questa zona l'eclisse appare totale).

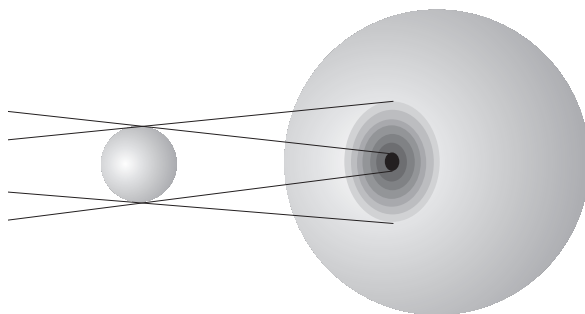


Fig. 32: Eclisse totale di Sole.

Luce senza ombre: luce diretta e luce diffusa

Queste osservazioni consentono di capire perché in certe occasioni pur essendoci luce non ci sono ombre: è il caso di una stanza ben illuminata ma non esposta al Sole, oppure se ci troviamo sul lato in ombra di un edificio, o ancora meglio se il cielo è nuvoloso.

Questo accade perché la luce solare non ci arriva sempre e solo “direttamente”, cioè viaggiando in linea retta, come abbiamo più volte detto, ma assai più spesso arriva per strade più complicate.

Se possiamo vedere un oggetto è perché questo emette almeno un po' di luce nella direzione in cui lo si guarda: dunque tutto quello che ci circonda, per il fatto stesso che lo vediamo, ci “illumina” con un po' di luce da tutte le direzioni (figura 33); di conseguenza l'ombra di ogni sorgente elementare è illuminata da altre sorgenti e l'effetto complessivo è di non poter vedere nessuna ombra. Si parla allora di illuminazione “diffusa” [19].

Il comportamento dei materiali

Più esattamente dovremmo dire che la luce viaggia in linea retta finché sul suo cammino non incontra qualcosa, un qualche tipo di materiale con il quale essa interagisce.

La straordinaria ricchezza e varietà della natura che ci circonda dipende proprio dal fatto che ogni tipo di materiale, anche in questa situazione, ha un comportamento caratteristico e diverso dagli altri.

Tuttavia, per orientarsi e capire occorre, come sempre, rinunciare alle descrizioni minuziose e classificare in modo più grossolano quello che accade.

la zona di penombra, misurata su un piano perpendicolare ai raggi è circa un centesimo della distanza tra l'oggetto e il piano.

[19] Nelle osservazioni sulle ombre da fare in aula è quindi necessario ridurre al minimo la luce diffusa; sarebbero opportune pareti scure o coperte con carta o stoffa nera.

Assorbimento e diffusione

Quando la luce colpisce un oggetto, nella maggior parte dei casi una parte di questa viene assorbita e una parte viene diffusa, cioè riemessa in tutte le direzioni. La luce diffusa è quella che ci consente di “vedere” il corpo; un corpo che assorbisse tutta la luce che riceve apparirebbe nero e potrebbe essere visto solo come un’ombra rispetto ad un fondo più chiaro.

Se la diffusione avviene solo sulla superficie del corpo, e la luce non lo attraversa, il corpo si dice opaco; se la luce attraversa in parte il corpo e la diffusione avviene anche all’interno di questo, il corpo si dice traslucido. È questo il caso di un foglio di carta, di un vetro smerigliato, delle nuvole che coprono il Sole ma ne diffondono la luce anche al di sotto di esse.



Fig. 33: “Vedere” significa ricevere luce da ogni direzione.

Un comportamento diverso presentano le superfici che, per natura o per lavorazione, vengono chiamate “lucide”. Su di esse si manifesta il fenomeno della “riflessione”, quando una frazione più o meno grande della luce incidente viene riemessa in una particolare direzione ^[20]. In questo argomento non vogliamo però addentrarci ulteriormente.

Luci e ombre “a colori”

La luce bianca è colorata

Una delle caratteristiche più appariscenti dei diversi materiali, o più in generale degli oggetti che abbiamo intorno, è certamente il colore. La percezione dei colori è però al tempo stesso un argomento tanto immediato quanto complicato. Ci accontenteremo allora di un approccio qualitativo attraverso delle semplici esperienze e, prima ancora, facendo riferimento all’esperienza comune.

Il punto di partenza potrebbe essere dato da due osservazioni quasi banali:

[20] Quella per cui l’angolo con la retta perpendicolare alla superficie (angolo di riflessione) è uguale all’angolo tra la luce incidente e la stessa perpendicolare, nel piano determinato dalla luce incidente e la perpendicolare.

- usando la stessa luce i diversi oggetti appaiono di colori diversi;
- usando sorgenti (luci) diverse lo stesso oggetto appare di colori diversi.

La prima osservazione non ha bisogno di commenti; per la seconda, anche se le differenze di colore possono non essere del tutto evidenti, si pensi al diverso “effetto” che si ha usando lampadine a incandescenza oppure luce al neon, o illuminando gli oggetti alla luce solare. Spesso, andando ad acquistare un vestito, la commessa invita il cliente ad uscire per vedere “meglio” i colori alla luce del giorno.

Da queste due prime osservazioni segue dunque che la percezione del colore non dipende né solo dall’oggetto, né solo dal tipo di luce, ma nasce dall’interazione della luce con l’oggetto illuminato.

Potremmo dire che:

- la luce che chiamiamo *bianca* è quella che, illuminando diversi oggetti, mostra la gamma più vasta di colori (tutti);
- se si utilizza luce colorata, alcuni colori (e in particolare il bianco) non si riescono a vedere più.

Con opportune sorgenti, o con opportuni filtri interposti davanti alla sorgente di luce, o con dispositivi più compessi, si potrebbe avere la luce detta “monocromatica”: questo accade quando tutti gli oggetti appaiono di un solo colore, con varie gradazioni d’intensità, oppure neri, a seconda dalla frazione di luce che viene assorbita e da quella che viene diffusa. L’assorbimento totale fa vedere nero l’oggetto (ma sarebbe meglio dire che l’oggetto non si vede, se ne vede solo il profilo rispetto ad un fondo luminoso o diversamente colorato), la totale diffusione lo fa vedere molto distintamente (sempre che sia distinguibile dal fondo).

Con mezzi semplici è praticamente impossibile avere della luce monocromatica. Se utilizziamo lampade colorate la luce contiene sì un colore dominante, ma è tutt’altro che monocromatica; la prova immediata si ha illuminando oggetti diversi e notando che possono ancora distinguersi vari colori.

Sorgenti colorate

Nelle esperienze che seguono si utilizzeranno tre sorgenti di luce colorata. In realtà sono lampade uguali con interposto un filtro colorato che lascia passare solo una parte della luce.

Come sorgenti si possono utilizzare i soliti faretto che si vedono spesso nelle vetrine dei negozi (lampade dicroiche a basso voltaggio, con idoneo trasformatore). Può essere sufficiente acquistare la lampada con la propria basetta ed utilizzare un comune barattolo di latta (tipicamente quelli usati per prodotti alimentari, pomodori o legumi) per ottenere un proiettore orientabile, una volta installato su un qualche supporto. Davanti a questo, con del cartoncino nero, si può montare un supporto per i filtri o per diaframmi di varie forme. In figura 34 è mostrata una vista dei diversi componenti utilizzati; il supporto è costituito di una semplice struttura realizzata con pochi pezzi di “Meccano” ^[21]. Nella successiva figura 35 è mostrato l’oggetto montato (senza il supporto dei filtri).

[21] Colgo l’occasione per ringraziare mio figlio Marco per avermi “prestato” i pezzi necessari e per aver montato i supporti che sono serviti nella sperimentazione di questo lavoro.

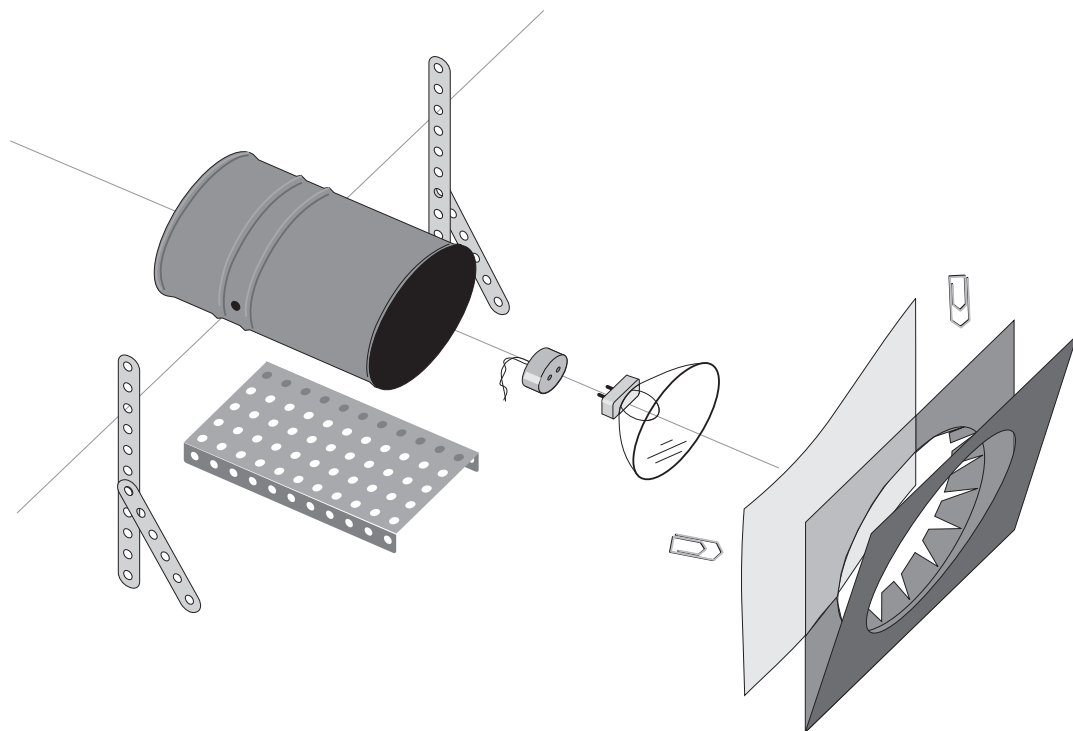


Fig. 34: Schema di montaggio di un proiettore con portafiltri.

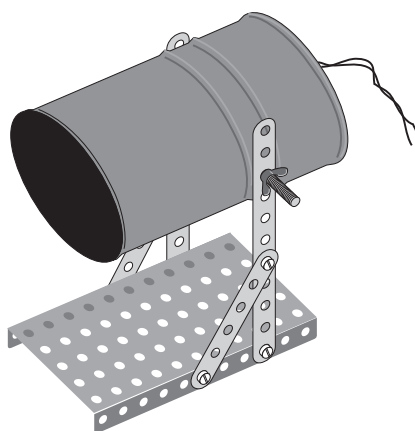


Fig. 35: Uno dei proiettori, montato.

Per ottenere delle buone sorgenti colorate, senza ricorrere a costosi filtri in commercio, la cosa migliore sarebbe l'uso di particolari pellicole, dette “gelatine”, che vengono

montate davanti ai proiettori utilizzati nei teatri; ugualmente efficaci, ma molto più facilmente reperibili nelle cartolerie, sono alcuni tipi di cartelline per inserti, trasparenti a colori vivaci.

Altri tipi di materiali diversi possono essere sperimentati; più oltre verranno date alcune indicazioni pratiche per effettuare una selezione dei filtri più idonei, fermo restando che un primo criterio è quello detto sopra: minore è il numero di colori che si riescono a distinguere, migliore è la combinazione lampada-filtro.

Le tre sorgenti che saranno utilizzate sono blu, verde e rossa; le esperienze che vengono ora proposte riusciranno tanto meglio quanto più accurata sarà stata la scelta dei filtri colorati.

Un gioco: i colori misteriosi

Nel complicato meccanismo della percezione dei colori ruoli essenziali sono svolti dagli occhi e dal cervello che acquisiscono ed elaborano gli stimoli prodotti dalla luce. Il cervello in particolare arriva talvolta a compensare la mancanza di informazioni attraverso il ricordo di esperienze precedenti. Così, se utilizziamo sulla nostra scrivania una lampada azzurrata, in poco tempo l'occhio e il cervello si adattano alla nuova situazione e siamo in grado di riconoscere in modo sostanzialmente corretto i diversi colori, anche se questi sono tutti modificati.

Una verifica di questo potrebbe essere fatta fotografando con pellicola a colori dei cartoncini di colori diversi, ma di uguale forma e dimensioni, così da non poterli identificare – consciamente o incoscientemente! – grazie ad altri elementi. È bene che le foto, eseguite con diverse sorgenti di luce colorata, siano fatte su un unico rotolino perché spesso nello sviluppo e stampa di rotolini diversi si notano alterazioni cromatiche anche sensibili.

Per questo motivo, per il nostro “gioco”, occorre avere a disposizione uno o più oggetti, possibilmente di forma uguale, che non siano stati visti prima in luce naturale, in modo da non avere precedenti riferimenti. Potrebbe andar bene la riproduzione di un quadro astratto, oggetti non familiari, oppure oggetti che differiscono solo per il colore come un insieme di mattoncini LEGO per costruzioni.

Disposti questi oggetti al buio si accende un faretto colorato: per esperienza conviene che sia quello rosso perché per questo colore è più facile avvicinarsi ad una situazione monocromatica. Si tratta ora di indovinare il colore delle diverse parti dell'immagine o dei diversi mattoncini, cosa praticamente impossibile perché tutto appare rosso chiaro, oppure scuro, o quasi nero.

Sento il faretto rosso si accende quello blu. Adesso tutto dovrebbe apparire blu, più chiaro o più scuro; spesso gli oggetti che prima apparivano quasi neri risultano ora più chiari degli altri e viceversa. Purtroppo non è facile procurarsi un buon filtro blu, cosicché tra gli oggetti scuri si notano quelli con sfumature rossastre o di altri colori.

Accendendo infine il solo faretto verde si vedrà (di solito succede così) una maggiore gamma di sfumature di colore, perché è ancora più difficile ottenere una buona sorgente verde. Tuttavia è immediato notare che la resa complessiva dei colori è cambiata nuovamente rispetto alle situazioni precedenti.

Accendendo infine la luce ambiente si potranno riconoscere i diversi colori e verificare se le risposte date erano esatte.

Avendo più tempo a disposizione si potrebbe rifare le prove utilizzando un solo oggetto alla volta, per esempio un foglio di carta appoggiato su un fondo nero. La mancanza di termini di paragone rende alquanto più difficile l'interpretazione di ciò che si vede.

Sintesi e analisi dei colori

La composizione (o sintesi) di luci colorate

Il passo successivo è di osservare che si possono ottenere nuovi colori, componendo, cioè accendendo contemporaneamente, più sorgenti colorate. Nel nostro caso, avendo a disposizione 3 colori, si hanno solo 4 possibilità:

$$R + B$$

$$B + V$$

$$R + V$$

$$R + B + V$$

Se il foglio utilizzato è di carta bianca esso apparirà nei quattro casi:

$R + B$: violaceo, o più propriamente “magenta”;

$B + V$: azzurro, o più propriamente “ciano”;

$R + V$: giallo (se le sorgenti sono sufficientemente intense);

$R + B + V$: bianco (più o meno intenso).

Quello che abbiamo realizzato è la cosiddetta “sintesi additiva” dei colori: accendendo o spegnendo in tutti i modi possibili le tre sorgenti disponibili si ottengono in tutto otto colori: nero, rosso, blu, verde, magenta, ciano, giallo e bianco. Usando contemporaneamente i tre proiettori in modo che le parti di schermo illuminate da ciascuno siano parzialmente sovrapposte si potranno osservare contemporaneamente gli otto colori.

In figura 36 è schematizzata una situazione “ideale” per ottenere la quale occorrerebbero dei dispositivi più complessi dei nostri faretto; bisogna infatti che ogni sorgente illumini, senza sfumature, una zona ben definita dello schermo e che non ci sia altra illuminazione diffusa. Avendo a disposizione tre proiettori per diapositive e preparati tre diaframmi circolari da inserire al posto delle diapositive, ciascuno con il filtro colorato, si potrebbe riprodurre in modo soddisfacente questa situazione.

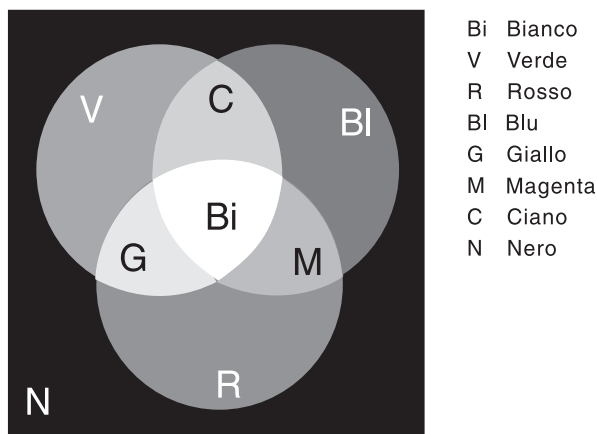


Fig. 36: Sintesi additiva con tre sorgenti di luce colorata.

Se da una parte con i nostri faretto non possiamo ottenere la situazione “ideale”, dall'altra questo fatto ci offre un'opportunità in più: verificare che nelle zone di sfumatura si osservano altre tonalità diverse di colore.

In altre parole, se fosse possibile “dosare” in modo controllato le tre componenti colorate si potrebbe ottenere una più grande varietà di colori: esattamente quello che accade sullo schermo di un televisore a colori o sul monitor di un computer; l’immagine è costituita da un grandissimo numero di puntini colorati nei tre colori fondamentali rosso, blu e verde la cui diversa intensità, regolata elettronicamente, consente di riprodurre tutti gli altri colori.

C’è poi un altro modo per ottenere i diversi colori, basandosi sull’ipotesi – che tratteremo tra breve – che la luce “bianca” contenga già in sé tutti i colori; i filtri che abbiamo utilizzato funzionano di fatto così: se alla luce bianca si “sottrae”, cioè si assorbe, la componente di un certo colore, si otterrà un diverso colore detto “complementare” del primo.

Un modo appariscente per mostrare *all’opera* la cosiddetta “sintesi sottrattiva” dei colori consiste nell’utilizzare gli stessi tre proiettori colorati per illuminare un oggetto posto di fronte ad uno schermo. Lo schermo risulta bianco e dunque l’insieme dei tre fasci colorati può essere visto come un fascio di luce bianca, come nella parte centrale della figura 36.

Però, dato che le tre sorgenti sono separate, l’oggetto intercetta separatamente i tre fasci producendo per ciascuna sorgente un’ombra che tuttavia rimane parzialmente illuminata da uno o da entrambi gli altri proiettori. Il risultato, mostrato in figura 37, è la formazione di una serie di ombre colorate ove è possibile identificare tutti gli otto colori sopra descritti, ma con una diversa disposizione: in luogo di ogni colore si trova il colore complementare.

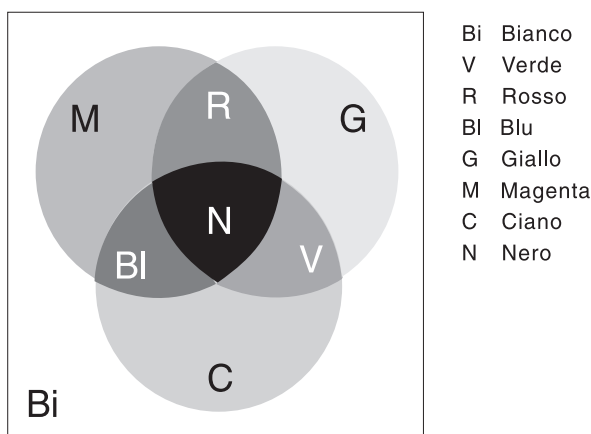


Fig. 37: Sintesi sottrattiva con le ombre colorate.

La scomposizione (o analisi) della luce bianca

Le esperienze precedenti rendono plausibile l’ipotesi che la luce bianca “contenga” tutti i colori o quanto meno che essa sia una composizione di diversi “colori fondamentali”.

Il modo consueto di verificare questo è di mostrare che, in situazioni opportune, essa può essere scomposta nella luce dei vari colori.

La scomposizione della luce nelle sue diverse componenti monocromatiche e l'analisi quantitativa di queste diverse componenti richiede una strumentazione molto sofisticata, ma se ci si accontenta di una descrizione qualitativa e molto grossolana non è difficile predisporre alcune semplici esperienze.

In natura l'esperienza più comune è forse quella dell'arcobaleno; ma si osservano colori anche nelle bolle di sapone, negli strati sottili di olio o di altre sostanze sull'acqua, osservando le sfaccettature al bordo di un vetro o di un oggetto di cristallo, con un disco microsolco o meglio ancora illuminando un moderno CD (Compact Disc).

Prescindendo dal “come” il fenomeno accade, ci si può limitare a prendere atto che in tutte queste situazioni la luce bianca viene separata nelle sue diverse componenti in un insieme che viene chiamato “spettro” della luce in cui si riconoscono numerose tonalità di colore. [22]

Per analizzare la luce delle sorgenti che abbiamo a disposizione potremo dunque utilizzare, per la sua facile reperibilità, un CD senza alcun timore di danneggiarlo, pur di avere un minimo di cura nel maneggiarlo.

Si può usare uno dei faretti con una schermatura che lasci scoperta una fenditura di 1-2 cm. Disponendosi al buio (stanza oscurata) di fronte al faretto ed appoggiando sul piano il CD si può osservare lo “spettro” della luce emessa dal faretto, una striscia colorata che va dal violetto fino al rosso intenso. L'effetto è schematizzato in figura 38.

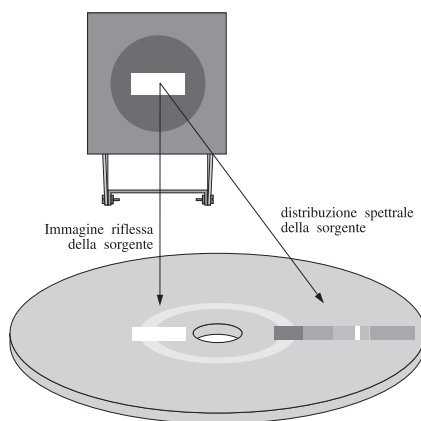


Fig. 38: Spettro della luce bianca, utilizzando un CD.

Adesso possiamo porre davanti al faretto i diversi filtri colorati, o comunque diversi generi di materiali trasparenti che possiamo trovare.

Utilizzando frammenti delle cartelline per inserti si nota che quella rossa costituisce un filtro abbastanza efficace: dello spettro resta visibile solo la parte rossa (figura 39),

[22] Abitualmente queste diverse tonalità si riconducono ai cosiddetti sette colori dell'arcobaleno: rosso, arancio, giallo, verde, blu, indaco e violetto. Non è male notare che in realtà i colori sono molti di più e che la scelta del numero sette è solo un residuo di tradizioni pre-scientifiche.

mentre le componenti dal giallo al violetto scompaiono del tutto. Questo è il motivo per cui gli oggetti illuminati in questo modo appaiono solo rossi o scuri.

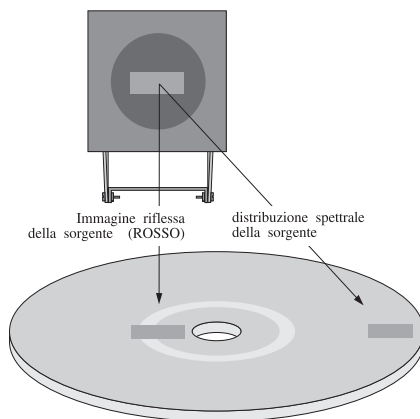


Fig. 39: Spettro della luce filtrata con filtro rosso.

La pellicola blu produce un effetto un po' diverso: nello spettro scompare la gran parte della luce rossa, ma spesso rimane visibile un po' della componente verde e addirittura qualche traccia di rosso. Questo spiega perché gli oggetti illuminati con questa luce blu mostravano alcune tonalità rossastre. In figura 40 è rappresentata una situazione ideale che in pratica non si riesce a verificare.

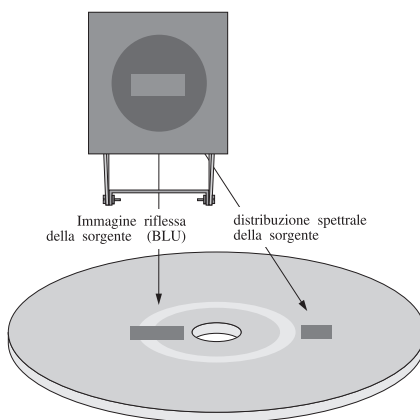


Fig. 40: Spettro della luce filtrata con filtro blu.

Il filtro verde blocca la luce violetta e gran parte della rossa; nello spettro però assieme alla componente verde compare un po' di quella blu e un po' di quella gialla e rossa. Per questo il faretto verde era infatti quello che consentiva una più facile individuazione dei colori.

Se usiamo infine una cartellina di colore giallo si osserva nello spettro la presenza di tutti i colori compresi tra il rosso e il verde, confermando l'effetto di sintesi additiva già mostrato prima: la composizione di luce rossa e verde appare come luce gialla.

Se si dispone di materiali diversi, se ne può analizzare – sia pure qualitativamente – il comportamento; è questo un buon modo per selezionare quelli migliori al fine di ottenere buone sorgenti colorate per queste esperienze.

Il problema della riproduzione dei colori nella fotografia prima, nella TV poi, è stato quello di riuscire a ottenere il maggior numero di tonalità diverse di colore per sovrapposizione (sintesi additiva) del minor numero di colori “primari”: il risultato, come si è già detto è che ne occorrono almeno tre opportunamente scelti: il rosso, il verde e il blu.

Può essere interessante usare il nostro modesto spettroscopio costituito dal CD di fronte al monitor di un computer per analizzare la luce prodotta sulla superficie dello schermo.

Il modo più semplice è quello di utilizzare uno dei programmi interattivi di disegno (ad es. **PaintBrush** che è compreso nell'installazione di base di **WINDOWS**) per costruirsi una finestrella colorata su un fondo nero, come in figura 41. Questa si comporterà quasi esattamente come la fenditura davanti al faretto salvo per la minore luminosità. In ogni caso lo spettro prodotto dal CD è facilmente individuabile nelle sue principali componenti e con pochi tentativi si potrà determinare la dimensione ottimale della finestrella. A questo punto, modificando il colore della finestrella, si può osservare come si modifica il relativo spettro.

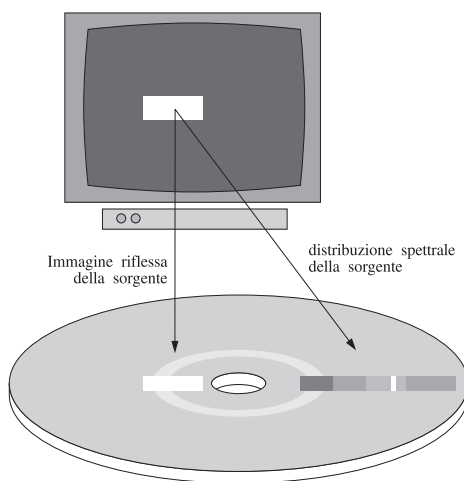


Fig. 41: Spettro della luce prodotta dal monitor di un computer.

Assorbimento e diffusione selettiva dei colori

Siamo ora in grado di capire come avviene che gli oggetti appaiono colorati.

Come abbiamo già visto, quando la luce colpisce un oggetto essa viene in parte assorbita e in parte diffusa (come casi estremi essa può essere completamente assorbita o completamente diffusa). Più esattamente questo accade per ogni componente monocromatica della luce, in modo indipendente da un colore all'altro.

Se dunque pensiamo di illuminare un oggetto con tre sorgenti pure (rosso, blu e verde, di cui i nostri faretto sono solo un'approssimazione) può accadere che le componenti blu e rossa siano completamente assorbite mentre la componente verde sia completamente diffusa: l'oggetto appare verde.

Lo stesso oggetto illuminato in luce rossa oppure in luce blu appare invece nero perché sia la componente blu che quella rossa vengono completamente assorbite.

I mattoncini della LEGO che abbiamo utilizzato non sono quindi fatti esattamente della stessa sostanza plastica. Il materiale di uno assorbe tutte le componenti colorate della luce tranne quella rossa che viene diffusa in ogni direzione (sempre che la luce utilizzata abbia una componente rossa); l'occhio riceve la radiazione rossa e il cervello conclude... "Il mattoncino è rosso". Per avere un mattoncino blu occorre un diverso materiale capace di assorbire certi colori, tra cui il rosso, ma non il blu, ecc.

Prendiamo ora un mattoncino a caso; illuminiamolo con sorgenti di colore diverso e compiliamo una tabella di osservazioni; di che colore è il mattoncino?

Sorgenti	Colore della luce	colore dell'oggetto
R	rosso	rosso
B	blu	nero
V	verde	verde
R+B	magenta	rosso
B+V	ciano	verde
R+V	giallo	giallo

Risposta: il mattoncino è giallo.

Infatti esso assorbe totalmente la luce blu e diffonde la rossa e la verde (che in sintesi additiva danno il giallo); tuttavia a seconda dei casi esso appare di quattro colori diversi, eppure diciamo che tale oggetto è giallo: perché?

È chiaro a questo punto che non ha senso definire i colori degli oggetti se non diciamo con che tipo di luce si illuminano. Possiamo allora convenire che il colore è quello che si vede utilizzando luce bianca ed è dato dalla composizione di tutte le componenti che non vengono assorbite dall'oggetto.

Colori e sostanze chimiche

Il passo successivo è di chiedersi perché gli oggetti, illuminati da luce bianca, appaiono di diversi colori e come si fa a colorare diversamente gli oggetti.

Per rispondere occorrerebbe esaminare più da vicino il fenomeno dell'interazione tra luce e materia a livello microscopico (atomico o molecolare). Ci possiamo limitare a dire che di solito essa dipende dalla composizione chimica dell'oggetto stesso o quanto

meno del suo strato superficiale cioè dal tipo di materiale di cui è costituito l'oggetto o più frequentemente dal tipo di vernice con cui è stato dipinto.

Questa può essere costituita da una soluzione di particolari sostanze dette “coloranti” o da una finissima sospensione (miscela) di altre sostanze dette “pigmenti”. Sia i coloranti che i pigmenti possono essere di origine inorganica, cioè ricavati da minerali oppure ottenuti con opportuni procedimenti chimici, o di origine organica essendo prodotti da organismi animali o vegetali.

Notare che molti coloranti naturali sono commestibili e questo consente il loro impiego nella confezione di alimenti e bibite, anche se il solo scopo è quello di rendere tali prodotti più gradevoli alla vista.

In una soluzione il colore dipende dalle sostanze disciolte e può servire ad esempio come indice di acidità (nel primo capitolo della sezione 3 vengono proposte delle esperienze in proposito).

Colore e temperatura

Per concludere questa serie di osservazioni relative alla luce si potrebbe presentare almeno un'altra semplice esperienza per mostrare che la produzione della luce è legata in molti casi al riscaldamento di un corpo.

La prova più diretta consiste nel riscaldare un piccolo oggetto metallico sulla fiamma; la cosa tuttavia non è facile se non si dispone di un'attrezzatura adatta. Utilizzando ad esempio una candela (in un locale oscurato) si riesce a rendere incandescente solo uno spillo, tenendolo ovviamente con un paio di pinze; occorre avere l'accortezza di interporre un isolante, altrimenti la massa metallica delle pinze disperde rapidamente il calore. Un modo pratico è di far passare lo spillo attraverso un fiammifero e tenere questo con le pinze. La parte di spillo a contatto con la fiamma assume prima una colorazione rosso-bruna poi rosso accesa mentre la punta può arrivare ad un colore arancio-giallastro.

Una esperienza diversa si può fare montando un circuito elettrico con diverse lampadine, del tipo di quello usate nei fanali delle biciclette, disposte “in serie”, alimentate da una batteria (ad es. una pila piatta da 4.5 V); successivamente si escludono ad una ad una le lampadine cortocircuitandole, in modo che una corrente sempre maggiore passi nel circuito formato da quelle rimaste.

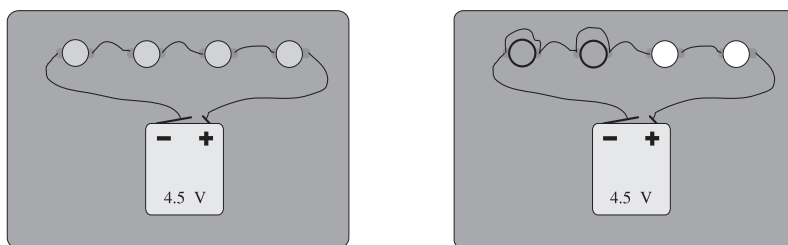


Fig. 42: Circuito con 4 lampadine.

Se l'operazione è condotta in un locale oscurato si osserva a un certo punto una debole luminosità dei filamenti che appaiono rossastri. Continuando ad escludere le lampadine

la luminosità aumenta, i filamenti assumono una colorazione tendente al giallo, e le lampadine sono più calde.

Quando rimane una sola lampadina essa appare molto brillante e al tempo stesso è molto più calda.

C'è dunque una relazione tra la temperatura del corpo (lo spillo o i filamenti delle lampadine), la quantità di luce emessa e il colore di questa. Se questa relazione è nota, il colore della luce può essere utilizzato per misurare temperature molto alte, in casi in cui non è possibile l'uso dei termometri, come ad esempio all'interno di un forno incandescente.

Allo stesso modo il colore della luce che proviene dalle stelle fornisce uno straordinario termometro capace di determinarne la temperatura degli strati superficiali.





Lavoro sperimentale per l'introduzione di Volume, Densità ed Energia

L. Bosman

Dipartimento di Fisica – Pisa

1. Il volume di un corpo e la sua misura

L'attività operativa concreta che qui viene proposta ha lo scopo di chiarire agli allievi il concetto di volume di un corpo, distinguendo dal processo di misura.

È noto a chi ha esperienza didattica che il termine “volume” assume, per gli allievi della scuola dell'obbligo, un significato dipendente dal contesto particolare: in ambito scolastico si parla di volume intendendo capacità di recipienti, e volume di oggetti di forma regolare (solidi geometrici semplici e composti); in entrambi i casi si pensa ad una “grandezza” che si “calcola” a partire dalle misure delle dimensioni (interne ed esterne dell'oggetto). Nell'ambito della realtà quotidiana si parla di volume per intendere la capacità di recipienti contenitori che generalmente sono già tarati. Spesso la richiesta di valutare il volume – ad es. di un sasso – mette in difficoltà.

Premesse necessarie al lavoro

Gli allievi dovrebbero essere in grado di:

- eseguire semplici operazioni di misura usando strumenti (metro, bilancia, contasecondi);
- riassumere in tabelle i risultati di operazioni pratiche, ad es. raggruppamenti di oggetti in base a criteri dati; specificare differenze entro collezioni, ecc.;
- usare simboli per esprimere relazioni tra grandezze inerenti al sistema in studio;
- costruire grafici e schemi ed interpretare.

Nella prima fase del lavoro risulterà utile tenere distinti i due concetti:

Capacità: volume interno di un dato oggetto (recipiente), “quanto contiene”.

Ingombro: posto che un oggetto occupa in un dato ambiente (ad es. in una scatola).

Queste denominazioni sono più direttamente legate alle operazioni concrete che le caratterizzano.

Vale la pena di accertarsi che ciò risulti chiaro agli allievi, senza ricorrere a definizioni, ma proponendo operazioni concrete mirate.

Allo scopo possono riuscire utili le seguenti esercitazioni pratiche.

CAPACITÀ: volume interno di un oggetto.

- a) Mostrare agli allievi due recipienti trasparenti, di forma molto diversa (es. uno di forma conica e l'altro panciuto), contenenti entrambi dell'acqua e chiedere loro quale dei due contiene più acqua, giustificando la risposta data.

Commentare poi le risposte senza indicare il procedimento da seguire per rispondere.

- b) Mostrare due recipienti identici, trasparenti, di forma regolare (a sezione costante), contenenti acqua a livelli diversi.

Chiedere quale recipiente contiene una maggiore quantità di acqua, giustificando la risposta.

- c) Utilizzando il risultato di b) ritornare in a) introducendo un terzo recipiente di forma regolare dove il livello dell'acqua può essere traguardato.

Si versa il contenuto di uno dei due recipienti della situazione a) nel recipiente regolare e si segna il livello dell'acqua, quindi lo si svuota e vi si versa il contenuto dell'altro recipiente di a) e si contrassegna il suo livello. La posizione dei traguardi dei livelli portano al risultato.

- d) Passare al confronto delle quantità di acqua contenute in due recipienti a sezione costante ma diversi per forma e/o dimensioni, a parità di altezza del livello e non.

Vale la pena di richiamare agli allievi l'uso del misurino campione (per riempire e svuotare) che costituisce nel contesto l'unità di misura arbitraria; infine ricordare la relazione tra la capacità di misurini diversi.

INGOMBRO: spazio che occupa un oggetto in un dato ambiente.

Procurarsi scatole di cartone ben fatte (es. scatole di camicie, scarpe...), scatole A, che fungeranno da ambiente; altre scatole più piccole, di forma regolare (scatole di cosmetici, di lampadine, di medicinali...) scatole B.

Proporre agli allievi di collocare in una scatola di tipo A, a turno, le scatole di tipo B per avere un'idea del posto che occupano in A: per ciascuna B, posta spigolo a spigolo in A, segnare il contorno delle facce sulle pareti di A (usando colori diversi per ogni scatola B).

Chiedere di valutare quante scatole piccole di ogni tipo possono essere contenute in A, se resta dello spazio vuoto, ed infine cercare o provare a costruire scatoline che riempiano a misura la parte che rimane vuota ecc.

Esortare gli allievi a trascrivere in forma codificata i risultati delle operazioni.

Siano:

A_i le scatole grandi (ambiente);

b_i le scatole piccole (oggetto – ingombro) di grandezza e forma diverse;

$\square$ spazio vuoto in A_i in cui non si può sistemare un'altra b_i .

Nella tabella seguente è riportata la sistemazione delle b_i in A_i :

	A_1	$A_2 \dots \text{etc.}$
b_1, b_2	$4b_1 + 2b_2$	$6b_1 + \square$
b_1, b_4	$3b_1 + b_4$	$2b_4 + \square$
b_3, b_2, b_1	$2b_3 + b_2 + b_1$	$3b_1 + 2b_2 + \square$

Esempi di esercitazioni scritte da proporre dopo l'attività pratica.

- i) Si devono riempire due recipienti diversi A e B usando i misurini a e b rispettivamente per A e B; i due misurini hanno capacità diverse.

Si può dire quale dei due recipienti ha capacità maggiore basandosi solo sul numero di volte che ciascun misurino è stato usato?

La questione posta non pretende “la risposta”, ma ha funzione di stimolare un ragionamento in cui sono necessarie delle ipotesi in base alle quali sono possibili risposte alternative. Si deve arrivare a comprendere che, oltre al numero di volte che ciascun misurino viene usato, bisogna conoscere la relazione tra le capacità dei misurini.

- ii) Una scatola contiene esattamente 12 scatoline uguali, ciascuna riempita completamente di sabbia.

Si tolgono dalla scatola grande tutte le scatoline e si versa tutta la sabbia nella scatola grande. La scatola grande non è colma: la sabbia occupa $\frac{2}{3}$ del volume interno della scatola.

- a) Dire che frazione del volume interno della scatola grande occupa ogni scatolina;
b) dire che frazione della capacità della scatola grande è la capacità di ogni scatolina.

Si consiglia di realizzare concretamente la situazione descritta nelle due prove, dopo una prima riflessione, in modo da indirizzare il procedimento per rispondere.

Misura del volume

Riguardo alla capacità o volume interno è stato già indicato il procedimento di misura: si mette in relazione lo spazio disponibile nel recipiente con quello che il materiale contenuto occupa in un recipiente tarato. Per materiale contenuto si intende acqua o altri materiali (liquidi e polveri) non compressibili, altrimenti la capacità verrebbe a dipendere dal particolare materiale usato per riempire.

Per quanto riguarda l'ingombro o volume esterno di un dato oggetto, anche se di forma tale da non poter usare le prescrizioni della geometria, viene proposto di procedere alla misura di tale grandezza immergendo l'oggetto in un cilindro graduato contenente dell'acqua e leggendo l'entità dell'innalzamento del livello.

In una prima fase è opportuno prendere in considerazione solo oggetti solidi non solubili in acqua. Ci si riferisce quindi ad oggetti solidi costituiti da uno o più materiali che a contatto dell'acqua non cambiano struttura, ad es.

- cubetti, cilindretti, palline ecc. di metalli diversi, vetro, legno, ecc.;
- oggetti costituiti ciascuno da più materiali come ad es. un dischetto di rame con la parte centrale in plexiglas, scatoline di forma varia di metallo, vetro, plastica sigillate (a prova d'acqua) vuote o contenenti liquidi, polveri o solidi.

Un oggetto che immerso nell'acqua si scioglie può dar luogo

- ad un miscuglio in cui l'oggetto pur cambiando forma (sbriciolato) conserva il volume primitivo;
- ad una soluzione il cui volume non è la somma dei volumi originari dell'acqua (solvente) e dell'oggetto (soluti). In tal caso l'entità dell'innalzamento dell'acqua non è l'ingombro dell'oggetto introdotto e poi disciolto.

Se non si conosce quale sarà il risultato per un oggetto che messo in acqua si scioglie, non si può usare il metodo detto per misurarne il volume.

Ad esempio un pezzo di gesso, che è poroso e solubile, mentre si scioglie nell'acqua, libera l'aria contenuta nelle sue cavità (si vedono salire delle bollicine entro il recipiente), quindi l'innalzamento del livello dell'acqua non tiene conto delle cavità interne e della solubilità del gesso.

Per la misura del volume di oggetti di legno che galleggiano il metodo è ancora applicabile: basta mandare a fondo e mantenere l'oggetto mediante una sottile bacchetta (es. un sottile ferro da calza). La presenza della bacchetta non altera il valore della

misura dell'innalzamento del livello. Per accertarsi di ciò basta misurare l'innalzamento provocato da un cubetto ad es. di alluminio, che va a fondo, appoggiare su di esso la bacchettina e verificare che la posizione del livello dell'acqua non è cambiata.

Questo procedimento per la misura del volume richiede che venga ben chiarito che l'innalzamento del livello dell'acqua, determinato dall'immersione di un dato oggetto, dipende solo dal volume dell'oggetto stesso.

Allo scopo viene proposta una serie di esperimenti che permettono di decidere:

- a) due oggetti uguali (ad es. due cubetti di spigolo identico) immersi a turno in un cilindro graduato contenente acqua provocano lo stesso innalzamento di livello;
- b) due oggetti uguali (ad es. i cubetti della prova precedente) immersi insieme producono un innalzamento doppio di quello prodotto da ciascuno. Vale la pena di ripetere questa prova con 3, 4 e più oggetti identici come palline, cilindretti ecc.
- c) due oggetti uguali per forma e dimensioni, ma di materiali diversi, ad es. un cilindretto di rame ed uno uguale di alluminio, producono innalzamenti uguali. Vale la pena di ripetere la prova con altri oggetti di altri materiali, ad es. pallina di vetro e pallina uguale di acciaio, cubetto di alluminio e cubetto uguale di plexiglas;
- d) oggetti di forma diversa e fatti di materiale differente possono provocare uguali spostamenti del livello dell'acqua in cui sono immersi. È possibile ad es. trovare un cilindretto di rame, un cubetto di vetro ed una pallina di acciaio che immersi nell'acqua provochino lo stesso innalzamento di livello;
- e) per misurare infine il volume di un oggetto per il quale lo spostamento del livello dell'acqua non è apprezzabile, si procede nel modo seguente: si immergono nell'acqua molti oggetti uguali a quello di cui interessa il volume, finché l'innalzamento del livello risulta misurabile. Conoscendo così lo spostamento dell'acqua prodotto da tutti gli oggetti insieme, si potrà dire quale spostamento ha provocato ciascun oggetto (gli oggetti uguali contribuiscono in misura uguale allo spostamento complessivo).

Nelle prove proposte gli oggetti nominati sono solidi regolari: cubetti, parallelepipedi (barrette), cilindretti, sferette (palline); questo perché:

- i) oggetti di forma regolare sono facilmente confrontabili (basi, altezze, spigoli) per cui è semplice decidere se sono uguali;
- ii) per tali oggetti è possibile determinare la misura del volume a partire dalla misura delle dimensioni, usando le regole della geometria. Il confronto tra il valore così ottenuto e quello proveniente dall'innalzamento del livello dell'acqua, espressi nelle stesse unità di misura, fornisce la verifica che l'innalzamento del livello dell'acqua per un oggetto immerso, porta alla misura del suo volume. Questo procedimento per la misura del volume è valido anche per oggetti di forma qualunque.

Nel corso delle prove sopra dette, si consiglia di far riportare i valori delle misure del volume dei vari oggetti in tabelle che riassumano i risultati del lavoro fatto.

Esempi di tabelle

Si supponga che sia stato esaminato il materiale seguente:

Cubetto di lato ℓ_A (di alluminio, ottone, legno)	CUBO A
Baretta a sezione quadrata di lato ℓ_A e lunghezza $2\ell_A$ ^[1]	BARRETTA A
analogamente, con $\ell_B \dots$	CUBO B
	BARRETTA B
Cilindro di raggio ℓ_C e lunghezza h	CILINDRO
Dischetto di raggio ℓ_C e lunghezza d	DISCO
Sferetta di raggio ℓ_S	SFERA
Pallina di piombo	PALLINA
Dischetto (di plexiglas)	DISCHETTO

Nella tabella seguente è riportato in corrispondenza di ciascun oggetto (forma, materiale) il valore del volume: innalzamento del livello dell'acqua. Si noti che, come detto in precedenza, il volume di oggetti uguali non dipende dal materiale di cui sono costituiti, e che si possono trovare oggetti di forma e materiale diversi che abbiano lo stesso volume.

Oggetto	Materiale					
	Al	Ottone	Plex.	Vetro	Piombo	Legno
CUBO A	v_A	v_A	v_C	v_C	$2v_A$	v_A
BARRETTA A		$2v_A$				
CILINDRO						v_C
DISCO	v_D	v_D				
SFERA			V	v_S	V	v_S
CUBO B	V					
PALLINA						
DISCHETTO						



[1] Più in generale la lunghezza può essere $n \ell_A$.

2. La grandezza “densità” e la sua misura.

Il concetto di “densità”, insieme agli altri concetti legati alle caratteristiche strutturali dei corpi, ha un ruolo importante nell’ambito delle discipline scientifiche. L’idea di densità, che compare in argomenti disciplinari diversi trattati nella scuola dell’obbligo, è legata a nozioni e concetti facilmente esprimibili in modo formalizzato, mediante relazioni matematiche o rappresentazioni grafiche. Il lavoro pratico, qui proposto per la costruzione del concetto di densità, richiede operazioni di manipolazioni abbastanza semplici e rende possibile chiarire la differenza tra il risultato diretto di un esperimento e le sue implicazioni.

Densità di oggetti omogenei

Una volta misurato il volume di vari oggetti omogenei e non solubili in acqua e di forma qualunque, con il metodo precedentemente descritto, si proceda a determinare la massa degli oggetti detti (pesare). Si consiglia di riportare i risultati della misura del volume e della massa dei vari oggetti in una tabella in cui per ciascun oggetto accanto al nome figurino la misura della massa e del volume. A partire da questo elenco-tabella se ne costruisca un’altra in cui i valori delle misure dei volumi risultino ordinati in ordine crescente, questo al fine di mettere in evidenza che:

- ci sono oggetti che a parità di volume hanno masse diverse;
- se due oggetti dello stesso materiale hanno volume l’uno doppio dell’altro anche le rispettive masse sono l’una il doppio dell’altra.

Per evidenziare i vari risultati desumibili dalla tabella ottenuta si passa ad una rappresentazione grafica: si riportino in un piano cartesiano le coppie dei valori delle misure di massa e volume per ciascun oggetto considerato. Risulterà che i “punti” (le coppie massa-volume) relativi ad oggetti costituiti dello stesso materiale sono allineati; ancora per ogni materiale diverso, la linea su cui si trovano (massa, volume) è diversa.

Il grafico così costruito può essere utilizzato:

- per determinare il volume di un corpo ad es. di alluminio (diverso da quelli usati per la costruzione degli allineamenti) di cui si conosce la massa (misurata con la bilancia). Si confronta poi il valore del volume così ottenuto con quello ottenuto dalla misura diretta (innalzamento del livello dell’acqua);
- per determinare la massa di un corpo di cui si conosce il valore del volume ecc.;
- per verificare che i punti (massa-volume) di oggetti fatti di materiali differenti da quelli usati per la costruzione del grafico (es. argento, bachelite) non si adattano ad alcuno degli allineamenti trovati.

Analisi dei risultati.

Per arrivare a formalizzare il concetto di densità è necessario proporre agli allievi un’analisi dei risultati precedenti che si basi su conoscenze di argomenti di matematica già noti. Si tratta in sostanza di guidare gli allievi a riconoscere che i punti rappresentativi (massa, volume) relativi a materiali omogenei “appartengono alla retta”, si tratta cioè di un insieme di punti le cui coordinate sono ugualmente legate alla pendenza o coefficiente angolare della retta stessa. In questo caso il valore della pendenza

di ciascuna retta (valore che numericamente dipende dalle unità di misura scelte) è la grandezza comune a tutti i punti rappresentativi di oggetti omogenei di uno stesso materia: la massa per unità di volume, cioè la densità assoluta del materiale.

Densità di oggetti non omogenei.

Per un corpo non omogeneo il rapporto tra il valore della massa e quello del volume ha le dimensioni di una densità e dipende da come è fatto il corpo (quante parti diverse e di quali materiali). Che relazione c'è tra la densità media di un corpo (non omogeneo) e la densità dei materiali di cui sono fatte le singole parti?

Per rispondere alla questione si propone l'itinerario seguente. Si costruiscano oggetti solidi non omogenei non solubili in acqua ed impermeabili; per esempio: scatoline di alluminio, plexiglas ecc. con dentro pezzi di forma regolari di materiali omogenei (di cui si conoscono le densità). Di tali oggetti si misuri il volume e la massa, quindi si determini la densità media.

Si riporta un esempio di come è stata di fatto condotta l'attività. Sono stati preparati i seguenti oggetti:

- una scatolina di alluminio completamente riempita di lastrine di vetro
- un cilindro di plexiglas cavo riempito di dischetti di vetro, chiuso
- lo stesso cilindro riempito di dischetti di acciaio
- lo stesso dischetto riempito per un terzo di dischetti di acciaio, e per altri due terzi con dischetti di vetro.

Con i risultati delle misure (massa, volume) degli oggetti è stata costruita la seguente tabella

Oggetti	Densità media	Densità dei materiali			
		Al	vetro	plex.	acciaio
Scatolina Al con lastrine vetro	2.3	2.7	2.2		
Cilindretto caso plex. + 3 dischetti vetro	1.2		2.2	1.2	
Cilindretto cavo plex. + 3 dischetti acciaio	3.3			1.2	7.9
Cilindretto cavo plex. + 1 dischetto acciaio + 2 dischetti vetro	1.7		2.2	1.2	7.9

Nella tabella si possono leggere i seguenti risultati:

- il valore della densità media di un oggetto è sempre compreso tra il più grande ed il più piccolo dei valori delle densità dei singoli materiali di cui risulta costituito;
- oggetti costituiti di uno stesso contenitore (di un dato materiale) riempito di volta in volta di oggetti diversi, hanno densità media differente (anche molto) a seconda del

materiale degli oggetti contenuti: il cilindro di plexiglas riempito di acciaio ha densità media circa tripla dello stesso cilindro (di plexiglas) riempito di vetro.

Per comprendere come contribuiscono le differenti densità dei materiali delle varie parti di cui un dato oggetto risulta costituito, alla sua densità media sono stati considerati oggetti di forma regolare costituiti di pezzi anch'essi regolari uguali e di materiali diversi: ad es. un cubo ottenuto mettendo insieme 8 cubetti uguali (alcuni di acciaio, altri di plexiglas, di alluminio, etc.); oppure un cilindro ottenuto mettendo insieme dischi dello stesso diametro e spessore (di ottone, legno, vetro, etc.)

In tal modo, a parità di volume complessivo del corpo (numero totale degli oggetti costituenti) è possibile variare a piacere la composizione del corpo riguardo al materiale (cambiando il numero di costituenti di ciascun materiale). Si ottengono così oggetti di massa diversa di cui si conosce la frazione in volume dei vari materiali. Questa "costruzione" è solo un assemblaggio di vari pezzi senza saldature o fissaggio, ma non crea difficoltà agli allievi (13/15 anni) perché sono in grado di vedere nell'assemblaggio di vari pezzi un oggetto di date caratteristiche.

Di seguito vengono riportati i valori delle densità (assoluta) dei particolari materiali usati e citati nel corso delle attività descritte; ci limitiamo a far notare ad esempio che diversi tipi di legno hanno densità diverse.

Materiali	Densità (g/cm ³)
Acciaio	7.9
Alcool	0.8
Alluminio	2.7
Aria (<i>condizioni standard</i>)	1.3×10^{-3}
Legno (<i>pino</i>)	0.48
Ottone	8.4
Plexiglas	1.2
Sughero	0.2
Vetro	2.2

Le operazioni di misura relative agli oggetti di cui sopra, sono state riassunte nella tabella successiva.

Dalla tabella risulta che per oggetti fatti di due parti uguali (stesso volume) di materiali differenti, il valore della densità media che proviene dalle misure dirette, è uguale alla media aritmetica dei valori delle densità dei due materiali componenti. Per un oggetto costituito di tre parti uguali di materiali diversi, la densità media è ancora la media aritmetica delle densità dei tre materiali. Analogamente per un oggetto fatto di tre parti uguali di cui due dello stesso materiale la densità media risulta:

$$d_m = \frac{d_1 + d_1 + d_2}{3} = 2/3 d_1 + 1/3 d_2$$

dove d_1 è la densità del materiale delle due parti, ad es. di plexiglas, e d_2 è quella della terza parte, es. acciaio.

Oggetti	Risultati di misure		
	massa (g)	volume (cm ³)	densità (g/cm ³)
Barra quadra 1/2 Al 1/2 plex.	79	40	1.9
Barra tonda 1/2 Al 1/2 ottone	51	12	4.4
2 cubi uguali 1 acciaio, 1 plex.	88.5	20	4.5
3 cubi uguali 1 acciaio, 1 plex., 1 Al	115	30	3.8
3 cubi uguali 1 acciaio, 2 plex.	100.5	30	3.4
8 cubi uguali 2 acciaio, 4 plex., 2 Al	116	40	2.9
8 cubi uguali 1 acciaio, 6 plex., 1 Al	77.5	40	1.9

Si arriva così a decidere che per un corpo costituito di varie parti di materiali diversi, la densità media è una combinazione lineare delle densità dei vari materiali, in cui ciascuna compare con un coefficiente che esprime la frazione del volume totale della parte relativa a quel materiale.

Questo resta vero anche per oggetti solidi con cavità contenenti liquidi (in generale fluidi), purché naturalmente valga l'additività del volume.

L'espressione trovata per la densità media rende conto del fatto che per un dato oggetto non omogeneo il contributo di una sua parte, di dimensioni molto piccole anche se di alta densità, può essere trascurabile rispetto al resto.

Ancora risulta trascurabile il contributo dell'aria nelle cavità interne di oggetti solidi (un cilindro di ottone cavo e chiuso, una scatolina di alluminio contenente palline di vetro che non la riempiono completamente) ; infatti il termine relativo all'aria (volume occupato dall'aria per la sua densità) è trascurabile rispetto agli altri termini perché la densità dell'aria è molto più piccola delle densità degli altri materiali qui nominati (metalli, vetro, plexiglas, legno, ...).

La relazione trovata per la densità media può essere verificata con oggetti di costituzione meno semplice (non assemblaggio di parti uguali), ad es.: cilindro di plexiglas con cavità centrale cilindrica contenente un cilindro di ottone; un blocco di polistirolo con cavità riempita di palline di vetro e/o acciaio, ecc. Si possono usare anche recipienti chiusi contenenti acqua, alcool, ecc.

Sono di seguito riportati risultati di prove fatte. I valori delle densità medie dei vari oggetti, ottenuti dalle misure dirette, vengono confrontati con quelli calcolati con l'espressione di cui sopra.

Oggetti	blocco cavo plex + ottone	blocco cavo sughero + ottone	cilindro cavo plex + alcool
massa (g)	40	28.5	18
volume (cm ³)	15	15	20
densità (g/cm ³)	2.7	1.9	0.9
volumi parziali	12 + 3	12 + 3	5 + 15
densità calcolate	2.7	1.9	0.9

Per concludere la descrizione della proposta didattica si forniscono alcune indicazioni relative alla determinazione della “densità”, grandezza proveniente dalla manipolazione di risulti di misura.

I risultati delle misure di massa e volume negli esempi proposti, sono dati rispettivamente a meno di 0,5 g e di 2 cc, si tratta cioè di intervalli numerici, per il volume ($v + dv, v - dv$) e per la massa ($m + dm, m - dm$). A partire da tali intervalli-misura è stato costruito l'intervallo relativo alla grandezza densità, ottenendo per estremo inferiore $m - dm/v + dv$ e per l'estremo superiore $m + dm/v - dv$. In tale intervallo è stato scelto per la “densità” il valore corrispondente alla media aritmetica di tali estremi.



3. Utilizzazione di energia fornita da sorgenti diverse.

La conservazione dell'energia, presentata nella lezione di E. Fabri riportata in Appendice, ha come conseguenza importante l'esistenza di forme diverse di energia, il che significa che una può fare le veci dell'altra. Ancora la convertibilità è anche quantitativa, cioè tra due quantità di energia di forma diversa, che realizzano lo stesso risultato, c'è un rapporto fisso. Infine la convertibilità permette di usare un'unità di misura unica.

Allo scopo di illustrare in modo anche quantitativo quanto detto si propongono le seguenti esperienze nelle quali si riscalda dell'acqua utilizzando diverse sorgenti di calore: precisamente, utilizzando successivamente un fornello elettrico, uno ad alcool e uno a metano. Nei tre casi si riscaldano tre quantità uguali di acqua.

Materiale da usare:

- 3 recipienti uguali (es. tre comuni tazze di metallo smaltato) da 500 cl
- fornello elettrico (FE)
- fornello ad alcool (FA)
- fornello a metano (FM)
- contasecondi
- cilindro graduato
- termometro
- bilancia.

a) riscaldamento dell'acqua con il fornello elettrico (erogazione di energia elettrica)

Una quantità di acqua di massa nota (misurata), a partire da una temperatura nota (misurata), viene portata alla temperatura di ebollizione.

Il tempo necessario per l'operazione (misurato) permette di risalire alla quantità di energia erogata, cioè fornita dal FE.

$$\begin{array}{ccccc} \text{Energia erogata} & \leftarrow & \text{potenza del FE} & \times & \text{tempo di riscaldamento} \\ \text{(Joule)} & & \text{(Watt)} & & \text{(secondi)} \end{array}$$

Per misurare la massa d'acqua da riscaldare, oltre alla bilancia, si può usare il cilindro graduato. In realtà col cilindro si misura il volume dell'acqua, ma tenendo presente la relazione tra massa, volume, densità ($m = vd$), dalla misura del volume, conoscendo la densità (per l'acqua la densità è 1 g/cm^3), si ottiene la misura della massa d'acqua che interessa. Per esempio, una quantità di acqua che ha un volume di 300 cm^3 (o 300 cl), ha una massa di 300 g .

Per misurare il tempo necessario per far bollire l'acqua si usa il contasecondi: si fa partire il contasecondi al momento in cui si mette in funzione il FE con il recipiente con l'acqua, e lo si arresta quando l'acqua bolle. Sul contasecondi si legge il valore (numero di secondi) della durata dell'operazione.

Per misurare la temperatura si usa il termometro. Questo è uno strumento delicato, tuttavia occorre far vedere come funziona; si raccomanda però che le misure di temperatura siano ridotte al minimo necessario ed avvengano in condizioni non precarie.

Si consiglia di preparare per tempo (almeno due ore prima delle prove) il materiale occorrente ed una riserva di acqua (es. 2 litri) in modo che tutto si porti alla stessa temperatura dell'ambiente. Al momento del lavoro, si misura la temperatura dell'acqua, prima di ripartirla nei tre recipienti destinati alle tre prove a), b), c), si ottiene così lo stesso valore della temperatura iniziale dell'acqua per le tre prove. La temperatura di ebollizione dell'acqua è la temperatura finale per l'esperimento. Poiché tale valore della temperatura è noto si può evitare di usare il termometro in acqua bollente, a meno che si disponga dell'attrezzatura adatta.

Che cosa intendiamo per temperatura di ebollizione dell'acqua?

Per decidere, senza usare il termometro, ma con una certa sicurezza il valore della temperatura che ci interessa, ci si può avvalere dei risultati di osservazioni dirette (fatte usando il termometro).

Nel corso del riscaldamento dell'acqua, dopo una fase iniziale, si può vedere che la superficie dell'acqua vibra mentre sul fondo si formano piccolissime bollicine. Ai 50° e 60° le bollicine aumentano in numero ed in grandezza e salgono verticalmente. Successivamente l'acqua, all'inizio dell'ebollizione, fa un rumore caratteristico (verso 80°), mentre bolle sempre più grandi salgono rapidamente in superficie. Si passa quindi ad una fase in cui, si dice, l'acqua bolle tumultuosamente: tutta la massa dell'acqua si agita e grosse bolle salgono rapide urtandosi e combinandosi. Quando si stabilizza questa situazione siamo alla temperatura di ebollizione (tumultuosa) dell'acqua a 100°. I dati numerici riportati si riferiscono alla situazione di pressione atmosferica standard; in località in cui il valore della pressione atmosferica è diverso la temperatura di ebollizione è diversa per cui o si fanno le misure o si cerca di sapere il dato che interessa.

Dalle misure dirette di grandezze alla determinazione dei valori di altre grandezze.

I risultati delle misure delle grandezze massa, temperatura, tempo, vanno espressi con il numero fornito dallo strumento e la relativa unità di misura. Prima di elaborare i dati sperimentali (risultati delle misure) per determinare i valori di altre grandezze bisogna assicurarsi che il sistema di unità di misura sia lo stesso per tutte le grandezze in questione, pena la validità del risultato finale.

La scelta del sistema di unità di misura è prioritaria rispetto a quella dell'argomento di lavoro e quindi indipendente dai particolari strumenti di misura che verranno usati. Il sistema di misura da scegliere è il *Sistema Internazionale* (S.I.).

Nel corso di un'attività, i risultati di un'operazione di misura dipendono dai particolari strumenti impiegati sia per i valori numerici che per l'unità di misura, che possono anche non corrispondere a quelle del sistema scelto. Una volta espressi i risultati delle misure nel sistema S.I. si procede alla loro elaborazione per ottenere il risultato finale.

Negli esempi riportati le grandezze misurate sono espresse nel S.I., quindi anche l'energia erogata per il riscaldamento è espressa in Joule e non in calorie.

Come esempio si riportano i dati ed i risultati di una prova realmente eseguita.

Indicando con:

m_a : massa dell'acqua riscaldata

$T_f - T_i$: differenza tra la temperatura finale ($T_f = 100^\circ$) dell'acqua e quella iniziale ($T_i = 20^\circ$)

Δt : durata del riscaldamento

P : potenza del FE (dato fornito dal costruttore e riportato sul FE)

E_e : energia erogata dal FE.

m_a	$T_f - T_i$	Δt	$E_e = P \times \Delta t$
0,3 kg	80°	985 s	400 W $\times$ 985 s = 396 $\times$ 10 ³ J

b) riscaldamento dell'acqua con il fornello ad alcool (erogazione di energia chimica)

Nelle stesse condizioni dell'esperimento a), un'uguale quantità di acqua viene riscaldata con il FA fino alla temperatura di ebollizione.

La quantità di alcool che è stata bruciata nell'operazione è legata alla quantità di energia erogata (fornita dal FA).

$$\begin{array}{ccccc} \text{Energia erogata} & \Leftarrow & \text{Massa alcool bruciata} & \times & \text{Calore di combustione} \\ \text{(Joule)} & & \text{(kg)} & & \text{(Joule/kg)} \end{array}$$

dove il calore di combustione (C_c) è la quantità di energia fornita dalla combustione di un kg di alcool.

Per le misure di massa e temperatura vale quanto detto nella prova a). Per misurare la quantità di alcool bruciata nell'operazione, si pesa il fornello con l'alcool (da solo) prima e dopo il riscaldamento dell'acqua.

Come esempio si riportano i dati ed i risultati di una prova realmente eseguita.

Indicati con:

m_a : massa dell'acqua riscaldata

$T_f - T_i$: incremento di temperatura come nel caso a)

M_a : massa dell'alcool bruciata nel FA.

C_c : calore di combustione 2,9 $\times$ 10⁶ J/kg.

E_a : energia erogata dal FA.

m_a	$T_f - T_i$	M_a	$E_a = M_a C_c$
0,3 kg	80°	8 $\times$ 10 ⁻³ kg	252 $\times$ 10 ³ J

c) riscaldamento dell'acqua con il fornello a metano (erogazione di energia chimica)

Ancora nelle stesse condizioni degli esperimenti precedenti, un'uguale quantità di acqua, viene riscaldata con il FM fino alla temperatura di ebollizione.

La quantità di metano bruciato nell'operazione fornisce, insieme al calore di combustione, l'energia erogata (fornita dal FM)

$$\begin{array}{ccccc} \text{Energia erogata} & \Leftarrow & \text{Massa di gas bruciato} & \times & \text{Calore di combustione} \\ \text{(Joule)} & & \text{(kg)} & & \text{(Joule/kg)} \end{array}$$

La quantità di gas metano bruciata durante l'operazione è fornita dal contatore del gas. Le due letture del contatore, all'inizio ed alla fine del riscaldamento, danno per

differenza il volume del gas erogato per il riscaldamento. Riguardo al calore di combustione, il dato viene fornito dalle bollette inviate dalla società distributrice del gas agli utenti; si ricava dai dati forniti, con qualche calcolo, $C_c = 38 \times 10^6 \text{ J/m}^3$. Per l'energia erogata si passa alla relazione

$$\begin{array}{ccccc} \text{Energia erogata} & \Leftarrow & \text{Volume del gas bruciato} & \times & \text{Calore di combustione} \\ \text{(Joule)} & & \text{(m}^3\text{)} & & \text{(Joule/m}^3\text{)} \end{array}$$

Per le misure di massa e temperatura si veda quanto già detto nelle prove a), b)

Come esempio si riportano i risultati di una prova realmente eseguita.

Indicati con:

m_a : massa dell'acqua riscaldata.

$T_f - T_i$: incremento di temperatura, come sopra.

V_m : volume del metano bruciato, ricavato dalle letture del contatore.

C_c : calore di combustione (volumetrico).

m_a	$T_f - T_i$	V_m	$E_m = V_m \times C_c$
0,3 kg	80°	$9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	$342 \times 10^3 \text{ J}$

Discussione dei risultati delle prove di riscaldamento

Alcune considerazioni sul rendimento

Negli esempi dati in cui si riscaldava la stessa quantità d'acqua, a partire dalla stessa temperatura iniziale fino a quella di ebollizione, sono state determinate le quantità di energia, erogate da sorgenti differenti:

E_e fornita dalla centrale elettrica (FE)

E_a fornita dalla combustione dell'alcool (FA)

E_m fornita dalla centrale del gas (FM)

Occorre ora calcolare quanta dell'energia erogata, in ciascun caso, è effettivamente andata a riscaldare l'acqua (utilizzata per l'operazione di riscaldamento dell'acqua).

La Termologia fornisce una relazione tra l'energia necessaria per riscaldare una quantità di acqua, la massa dell'acqua, l'innalzamento di temperatura:

$$E_{\text{acqua}} = K_a m_a (T_f - T_i).$$

dove i simboli hanno il seguente significato:

m_a : massa dell'acqua riscaldata

$T_f - T_i$: innalzamento di temperatura

K_a : quantità di energia necessaria per innalzare di un grado la temperatura dell'unità di massa (K_a corrisponde al calore specifico dell'acqua pari ad 1 caloria per grammo e per grado che, nel S.I., corrisponde a circa $4,2 \times 10^3 \text{ J/(kg K)}$).

Nel caso in questione risulta $E_{\text{acqua}} = 101 \times 10^3 \text{ J}$.

Questo risultato mostra che solo una parte dell'energia erogata da ciascuna sorgente è andata a riscaldare l'acqua.

Per rendere conto delle differenze venute fuori, valgono le considerazioni seguenti.
 Prova a): durante il riscaldamento dell'acqua con il FE, una parte dell'energia erogata va a riscaldare l'acqua, una parte va a riscaldare il recipiente, parte la piastra di ghisa del FE, parte va a riscaldare l'aria circostante ed infine una piccola parte è andata per l'evaporazione dell'acqua.

$$E_e = E_{acq} + E_{rec} + E_{ar} + E_{pia} + E_{ev}$$

dove

E_e indica l'energia erogata

E_{acq} indica l'energia che ha riscaldato l'acqua

E_{rec} indica l'energia che ha riscaldato il recipiente

E_{ar} indica l'energia che ha riscaldato l'aria

E_{pia} indica l'energia che ha riscaldato la piastra

E_{ev} indica l'energia che ha fatto evaporare una certa quantità d'acqua.

Prove b) e c): analogamente al caso precedente:

$$E_e = E_{acq} + E_{rec} + E_{ar} + E_{for} + E_{ev}$$

dove

E_{for} indica l'energia che ha riscaldato il fornello

Mentre non è possibile misurare o stimare la quantità di energia andata a riscaldare l'ambiente (che è la maggior parte di quella erogata per i fornelli a fiamma) e quella andata a riscaldare la piastra del FE (anche questa considerevole), è possibile dare una stima di E_{rec} e di E_{ev} .

Riguardo ad E_{ev} basta conoscere la quantità di acqua evaporata (la differenza tra la massa dell'acqua prima e dopo il riscaldamento) e l'energia necessaria per evaporare l'unità di massa: tale energia varia con la temperatura ma nell'intervallo considerato (20° – 100°) si può considerare costante (25×10^5 J/kg).

Riguardo alla differenza di massa, sempre nel caso in esame, essa risulta nulla entro la sensibilità dello strumento (1 g) per cui $E_{ev} \approx 25 \times 10^2$ J, trascurabile rispetto ad $E_{erogata}$ entro qualche percento.

Quanto ad E_{rec} , la massa del recipiente è, nel nostro caso, 150 g, la sua capacità termica è stata stimata di circa un quarto di quella dell'acqua (metallo e vernice) quindi $E_{recipiente}$ è dell'ordine di 12×10^3 J, cioè trascurabile rispetto ad E_e entro qualche percento.

Resta ora da vedere quale dei tre modi di riscaldare l'acqua, che utilizzano sorgenti di energia diverse per uno stesso risultato, è stato più conveniente.

Indicando con:

E_e : l'energia erogata

E_u : l'energia utilizzata

η : il rendimento

quest'ultimo è definito come

$$\eta = \frac{E_u}{E_e}$$

I risultati delle tre prove danno:

prova a) riscaldamento con FE: $\eta = 0,26$

prova b) riscaldamento con FA: $\eta = 0,40$

prova c) riscaldamento con FM: $\eta = 0,30$

Per concludere, le tre prove di riscaldamento dell'acqua possono essere ripetute utilizzando differente quantità di acqua (tutte e tre uguali) e verificare che le tre quantità di energia di forma diversa (che realizzano lo stesso risultato) sono nello stesso rapporto.





Esperienze di Biologia vegetale

C. Anguillesi, I. Grilli

Dipartimento di Scienze Botaniche – Pisa

1. Le soluzioni nella biologia vegetale.

L'argomento "soluzioni", con particolare attenzione ai problemi di solubilità in solventi diversi e a diverse temperature ed al concetto di acidità e basicità, può essere affrontato utilizzando esperienze molto semplici, fatte con sostanze di facile reperimento e verificate attraverso osservazioni personali, indicatori naturali ed indicatori sintetici universali. Come punto di partenza è opportuno considerare che se si prendono varie sostanze, fra le più comuni, liquide o solide come acqua, zucchero, sale, acetone, sabbia, alcool ecc... e si uniscono fra loro due a due si possono ottenere **soluzioni**, cioè dei *miscugli omogenei e trasparenti di due fasi, solvente e soluto le cui molecole sono distribuite casualmente ed uniformemente* e **miscele** cioè *miscugli non omogenei di materiali diversi che mantengono ciascuno le proprie caratteristiche e possono mescolarsi in vari rapporti ed in vari stati*.

Due sono i punti che debbono essere tenuti presenti nell'affrontare questo argomento con i ragazzi:

- 1) l'uso di solventi diversi dall'acqua in modo da non indurre l'idea errata che questa sia un elemento essenziale delle soluzioni;
- 2) l'uso di sostanze che non interferiscano tra loro rendendo meno evidente l'esemplificazione.

Infatti, anche se solitamente si pensa che una soluzione sia costituita da un solvente liquido e da un soluto solido come nel caso della tintura di iodio (alcool etilico e cristalli di Iodio) e dello sciroppo (acqua e zucchero), esistono anche soluzioni di sostanze in stati diversi.

Si possono allora distinguere vari tipi di miscele e di soluzioni. Sono **miscele**: la *nebbia* (sospensione di acqua nell'aria); il *latte* (emulsione di sostanze liquide); il *fumo* (sospensione di particelle nell'aria); le *schiume* (miscele di sostanze gassose e liquide). Sono invece **soluzioni**: l'*acqua di mare* in cui esiste una componente solida (i sali come NaCl e KCl) ed una gassosa (l'O₂ che consente la respirazione di tutti gli organismi e la CO₂ che permette la fotosintesi delle piante) disciolte nell'acqua; l'*aria* che respiriamo formata da vari gas (O₂, N e CO₂); l'*acqua frizzante* da tavola costituita da CO₂ disciolta in acqua; il *vino* costituito in gran parte da alcool etilico disciolto in acqua in cui la gradazione esprime la quantità di alcool; l'*oro* o l'*argento* da oreficeria costituiti da leghe cioè da miscugli omogenei di solidi in solidi in cui i carati (18/24) e le unità (800/1000) indicano le parti di elemento puro nel miscuglio.

Esperienza 1: SOLUZIONI E MISCELE

Materiale occorrente:

- Due recipienti uguali ed uno più grande, sabbia, fornellino;
- acqua, sale da cucina.

In due recipienti uguali contenenti acqua si aggiungono le stesse quantità di sale da cucina in uno e di sabbia nell'altro. Dopo aver agitato si lascia decantare. Dove abbiamo messo il sale si ha un miscuglio limpido e trasparente, cioè una soluzione; dove abbiamo messo la sabbia si nota che è rimasto un aggregato di materiali diversi, cioè una miscela. Altre sostanze sia solide che liquide si comportano in acqua come il sale e la sabbia e su questa base si può far costruire dai ragazzi una tabella.

Se si riscalda a lungo la soluzione si possono separare i due componenti; il soluto (per convenzione la sostanza presente in minore quantità) si recupera precipitato sul fondo, il solvente (sostanza presente in maggiore quantità) lo si può recuperare facendolo condensare sulle pareti fredde di un recipiente più grande capovolto.

Esperienza 2: CONCENTRAZIONE

Materiale occorrente:

- Bicchiere, fornellino, frigorifero, termometro;
- acqua, zucchero, sale.

Si possono fare soluzioni più o meno concentrate o, al contrario, più o meno diluite, variando i rapporti tra solvente e soluto sino a valori, propri per ciascuna coppia, che rappresentano le massime quantità di soluto che si scioglie in un solvente.

In un bicchiere di acqua (200 ml) si scioglie, agitando, 1/2 cucchiaino (3 g) di zucchero o di sale: assaggiando, il sapore risulta poco evidente. Una soluzione così preparata, con piccole quantità di soluto, è *diluìta*. Si aggiungono altri 3 o 4 cucchiaini di zucchero o sale, il sapore è molto più deciso e la soluzione è *concentrata*. Se si aggiunge lentamente ancora soluto aspettando via via che il precedente si sia disciolto, si arriva ad una quantità di soluto oltre la quale non è più possibile sciogliere soluto e la soluzione è detta *satura*.

Se si riscalda una soluzione si può rilevare che all'aumentare della temperatura aumenta la quantità di soluto che si può sciogliere nella stessa quantità di solvente, aumenta cioè la *solubilità* di quella sostanza. Viceversa, facendo raffreddare una soluzione satura ad alte temperature, la solubilità diminuisce e l'eccesso di soluto precipita sul fondo. Con un termometro si misura la temperatura delle soluzioni e si può costruire una tabella di come varia la quantità di sale/zucchero che è solubile in un bicchiere di acqua al variare della temperatura.

Si può quindi dire che la solubilità di una sostanza e la saturazione di una soluzione sono in funzione della temperatura, tenendo presente che esistono sostanze che si comportano in maniera esattamente contraria, come ad esempio i gas disciolti nell'acqua. Infatti riscaldando l'acqua gassata la CO₂ disciolta si libera e l'acqua risulterà meno "frizzante".

Separazione

Solvente e soluto si possono separare ad esempio riscaldando a lungo la soluzione: il solvente evapora e il soluto rimane sul fondo; con questo principio funzionano le saline, dove l'acqua evapora per il calore del sole e il sale precipita sottoforma di cristalli.

In laboratorio o in attività industriali si può recuperare anche il solvente attraverso il processo di distillazione, mediante il quale le sostanze che evaporano da una soluzione riscaldata fino all'ebollizione possono essere raccolte e condensate in recipienti appositi. Attraverso questo processo si ottiene l'acqua distillata, utilizzata tra l'altro nelle batterie delle automobili e nei ferri da stiro proprio perché priva di qualsiasi sostanza disciolta.

Un altro valido sistema per recuperare l'acqua di una soluzione consiste nel congelamento. Il ghiaccio, che si forma per primo è di acqua pura, mentre il soluto si concentra nel liquido restante. In questo modo nei paesi freddi si ricava il sale dall'acqua di mare: congelando l'acqua si concentrano le soluzioni che possono essere cristallizzate con minore costo energetico.

Acidità e basicità di una soluzione

Le soluzioni possono essere o acide o basiche o neutre. In genere sono facilmente riconoscibili perché le acide rispondono ad un gusto aspro, aspro amaro e possono corrodere il marmo (effetto delle piogge acide sui monumenti) ed i metalli, mentre le basiche danno al tatto una sensazione di viscido e sono in grado di sciogliere i grassi tanto che, diluite, si usano come smacchiatori (soluzioni di ammoniaca).

Proviamo a lavare un bicchiere che ha contenuto dell'olio: prima con acqua poi, con le opportune cautele, con soluzione di ammoniaca o di soda caustica diluita. Quale trattamento ha il maggiore effetto sgrassante?

Per verificare le differenze tra una sostanza acida ed una basica mediante l'**esame organolettico**, sarà bene utilizzare succo di limone o di pomodoro, yogurth, aceto, e soluzioni molto diluite di soda e di bicarbonato che si prestano senza pericolo all'assaggio. Naturalmente l'esame organolettico non è realizzabile con tutte le sostanze acide o basiche data la pericolosità di molte di esse; inoltre va tenuto conto che si tratta di un tipo di analisi molto soggettiva per cui, poiché i risultati nel campo delle scienze devono essere rigorosamente obiettivi, occorrerà utilizzare metodi non legati all'analisi individuale. Esistono, ad esempio, sostanze facilmente reperibili in natura che assumono un colore diverso quando sono poste in soluzioni acide o basiche. Sono questi gli **indicatori naturali**, cioè coloranti organici che a contatto di piccolissime quantità di una soluzione, cambiano colore in funzione dell'acidità di questa: essi si possono estrarre dai pigmenti dei petali di molti fiori (geranio, violetta, tulipano, ciclamino...), di frutti rosso porpora (ciliege mature, susine...) o di foglie (cavolo rosso, radicchio di Treviso, *Iresine*).

L'utilizzazione degli indicatori naturali è notevolmente complessa perché le determinazioni che ne risultano sono imprecise e per ovviare a questo inconveniente si dovrebbero usare più indicatori. In pratica si possono utilizzare indicatori universali formati da miscele di indicatori che assumono 10-12 tonalità diverse a seconda della soluzione presa in esame e permettono di definirne universalmente e quantitativamente il grado di acidità o basicità, utilizzando una *scala di valori di pH*.

Questa scala si basa sulla concentrazione di ioni H^+ presenti nella soluzione: i suoi valori (gradi di pH) vanno da 0 a 14 e precisamente i pH inferiori a 7 sono propri di soluzioni acide, quelli superiori a 7 di soluzioni basiche. Il pH 7 è caratteristico di

soluzioni neutre. Tanto maggiore è la concentrazione di H^+ liberati in una soluzione, tanto più alto è il grado di acidità e tanto più basso è il pH.

La variazione del colore degli indicatori sia naturali che universali viene detta **viraggio**. Ogni indicatore in una soluzione assume un colore ben definito e caratteristico del suo campo di viraggio; ad esempio, il *violetto di metile* è giallo a pH 0,2 e vira a blu viola a pH 3,2; il *rosso di metile* è rosso a pH 4,2 e giallo a pH 6,3; il *blu di bromotimolo* è giallo a pH 6 e blu a pH 7,5; la *fenolftaleina* è incolore a pH 8,3 e vira a rosso violaceo a pH 10.

Dopo aver determinato con l'aiuto degli indicatori se una soluzione è acida o basica, possiamo studiare il risultato delle loro interazioni. Assaggiando succo di limone puro e succo di limone cui sia stata aggiunta una soluzione di soda o di bicarbonato si nota che il sapore acido è ridotto o scomparso; con l'uso degli indicatori si potrà verificare che si è passati dal pH 2 del succo di limone a quello più basico. Questo tipo di reazione è detto **neutralizzazione**.

Esperienza 3: INDICATORI NATURALI

Materiale occorrente:

- Recipienti in vetro da fuoco (piccoli), provette, pipette (Pasteur) o capillari, fornellino;
- acqua, succo di limone, soluzione di soda diluita, soluzione di NaCl;
- petali di fiori rosa, rossi o blu, foglie, frutti o radici rosse.

In un recipiente con 30 ml di acqua si fanno bollire fino a quasi completa decolorazione 10 g di materiale vegetale spezzettato. Dopo aver fatto raffreddare, si divide la soluzione ottenuta (indicatore naturale) in 3 provette; in ognuna di queste si aggiunge goccia a goccia:

1) soluzione acida di *succo di limone*,

oppure

2) soluzione basica di *acqua e soda*,

oppure

3) soluzione neutra di *acqua e sale* da cucina e si osserva la variazione di colore (viraggio) dell'indicatore naturale.

Dopo aver registrato il colore della provetta con il succo di limone vi aggiungiamo gocce di soda: l'indicatore vira di nuovo assumendo il colore della soluzione basica. Lo stesso fenomeno si può osservare aggiungendo l'acido all'indicatore trattato con la base.

Utilizzando, per ottenere l'indicatore naturale, materiali differenti, si possono osservare colorazioni diverse.

Esempi:

	<i>estratto</i>	<i>sale</i>	<i>NaOH</i>	<i>limone</i>
fiori di primula blu	verde	verde	giallo	rosso fucsia
buccia di ravanello	viola	viola	giallo	arancio
radicchio	viola	viola	rosso sangue	marrone
fiori di geranio rosa	rosa pallido	rosa pallido	rosa intenso	giallo
cavolo rosso	viola	viola	giallo	rosso sangue

Esperienza 4: INDICATORI NATURALI ED INDICATORI UNIVERSALI

Materiale occorrente:

- *Carta assorbente in rettangoli 1 × 5 cm, phon, pipette o Pasteur;*
- *indicatori naturali e soluzioni dell'esperienza n. 3;*
- *indicatore universale 1-14.*

Si bagnano con gli indicatori naturali le strisce di carta assorbente, si fanno asciugare con il phon e con una pipetta si aggiunge ancora indicatore e si fa asciugare per 3-4 volte in modo da aumentare la quantità di indicatore sulla carta.

Si lasciano poi cadere sulle strisce colorate e asciutte gocce di

- 1) succo di limone (pH 2)
- 2) soluzione di soda (pH 14)
- 3) soluzione di NaCl (pH 7)

e si osservano le variazioni di colore.

Con questo sistema si possono individuare tra le sostanze più comuni (vino, birra, yogurth, aranciata, sapone per piatti, prodotti per la casa) quali sono acide, basiche o neutre. Adesso possiamo utilizzare un indicatore universale con il quale verificare i risultati ottenuti e precisare il grado di acidità e basicità mediante la scala di pH. Possiamo così elencare tutte le sostanze saggiate in ordine di acidità e basicità.

Diffusione ed osmosi

Le molecole dei gas e dei liquidi sono in continuo movimento in ogni direzione dello spazio. Una goccia di profumo caduta nell'angolo di una stanza "diffonde" il suo aroma per tutta la stanza; una zolletta di zucchero o una goccia di inchiostro sul fondo di un bicchiere pieno di acqua "diffondono" e addolciscono o colorano l'acqua in breve tempo.

Sono questi esempi di **diffusione**, cioè di *movimento delle molecole* (profumo, zucchero, inchiostro) *da zone a maggiore concentrazione a zone a minore concentrazione*, il cui risultato sarà una loro distribuzione uniforme nella stanza o nel bicchiere.

Questa libera diffusione può essere ostacolata dalla presenza di barriere più o meno difficili da superare. Esse possono essere *permeabili* come una fitta garza, una parete di porcellana porosa o della carta oleata che rallentano, ma non impediscono, la diffusione delle molecole; *semipermeabili* come molte membrane biologiche comprese quelle cellulari che permettono la libera diffusione solo di acqua, sali od altre molecole di piccole dimensioni, ma ostacolano il passaggio di molecole di dimensioni più grandi; *impermeabili* come i vari tipi di sostanze plastiche attraverso le quali non diffonde nemmeno l'acqua.

La presenza di membrane permeabili o semipermeabili permette l'instaurarsi di un fenomeno definito **osmosi** che consiste nella diffusione che si verifica attraverso un setto poroso tra due soluzioni di concentrazione differente. Se la membrana è permeabile la diffusione è duplice: il solvente passa rapidamente dalla soluzione meno concentrata a quella più concentrata, ma anche il soluto passa nel senso inverso sino a che le due soluzioni raggiungono la stessa concentrazione. Se la membrana è semipermeabile la diffusione avviene solo per il solvente, dalla soluzione meno concentrata a quella più concentrata. Questo fenomeno è fondamentale per consentire l'assorbimento dell'acqua in tutti gli organismi viventi: infatti l'acqua entra nelle cellule, sempre circondate da una membrana, in virtù delle loro elevate concentrazioni interne.

Esperienza 5: COSTRUZIONE DI UN OSMOMETRO

Materiale occorrente:

- Due recipienti trasparenti, uguali, pieni d'acqua, siringhe di plastica da 10-20 ml o più, carta forno e pellicola Domopak, seghetto, elastici piccoli, mollette da panni;
- zucchero.

Dopo aver tolto l'ago e il pistone, con il seghetto si eliminano le estremità di due siringhe uguali in modo da ottenere due cilindri graduati aperti alle estremità. Con un solo strato di pellicola o di carta forno si chiude, con l'aiuto degli elastici, una delle estremità e si riempiono i cilindri graduati sino allo stesso livello con una soluzione zuccherina (50 g di zucchero in 100 ml di acqua). Con l'aiuto delle mollette da panni si sospendono i cilindri nei recipienti pieni d'acqua (figura 1).

Dopo alcune ore si osserverà che solo nel secondo cilindro (carta forno porosa) il livello del liquido è salito perché l'acqua è passata attraverso i pori della membrana e il fenomeno è tanto più celere quanto maggiore è il diametro del cilindro.

Costruito in questo modo un osmometro, l'esperienza può essere verificata utilizzando soluzioni a concentrazioni diverse all'esterno e all'interno della siringa. Per esempio:

<i>Recipiente</i>	<i>Siringa</i>
Acqua	Acqua Soluzione zuccherina
Acqua Soluzione zuccherina	Soluzione zuccherina

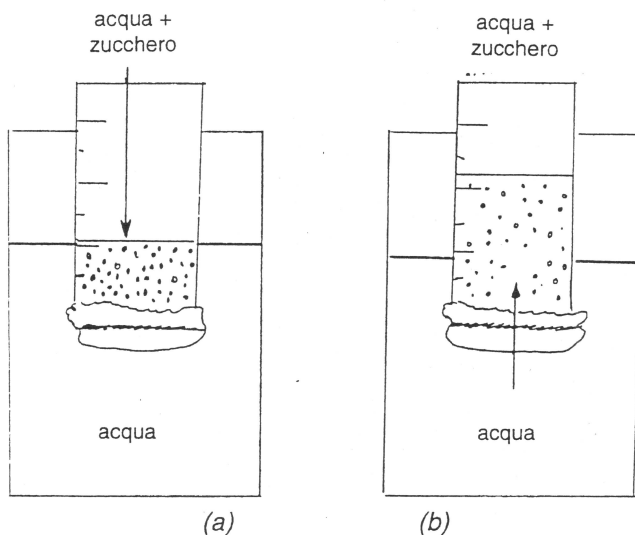


Fig. 1: Osmometri costruiti con pellicola (a) e con carta forno (b); dopo alcune ore è evidente che solo nel caso (b) c'è stata una salita di acqua.

L'acqua e l'energia nella biologia delle piante

Il mantenimento della struttura specificamente organizzata, che caratterizza la vita, si attua attraverso un consumo di energia. Di conseguenza, *la vita è un processo che consuma energia*, legato alla possibilità di disporre di riserve energetiche sufficienti per il mantenimento dell'ordine delle proprie strutture; nell'istante stesso in cui cessa l'apporto di energia, si spegne la vita attiva e l'ordine inizia a disgregarsi.

L'organismo animale trae l'energia necessaria per il mantenimento della vita dalla nutrizione, mentre la pianta verde la attinge direttamente dal sole. Animali e piante verdi si differenziano dunque fondamentalmente nel modo in cui si procurano energia: le piante sono **autotrofe** mentre gli animali sono **eterotrofi**. Tutte le altre differenze tra le organizzazioni animali e vegetali si fondano essenzialmente su questa primaria e fondamentale differenza. Le piante verdi devono la proprietà di vivere autotroficamente alla presenza del pigmento **clorofilla**, grazie al quale l'energia solare assorbita è utilizzata per la sintesi di molecole organiche altamente energetiche: esse costituiscono le riserve alle quali attingere l'energia necessaria per il mantenimento della vita e per la riproduzione. Poiché solo le piante contengono clorofilla e quindi solo esse sono in grado di utilizzare l'energia solare per la sintesi dei composti organici del carbonio, si può dire che *la vita animale dipende dalle piante* senza le quali sarebbe perciò impensabile ogni forma di vita sulla terra.

Due degli elementi fondamentali per la sintesi delle sostanze organiche, il carbonio e l'ossigeno, si trovano ovunque nell'aria, sotto forma di anidride carbonica; l'acqua fornisce il terzo elemento indispensabile per tutte le sostanze organiche, l'idrogeno. L'acqua ha costituito l'ambiente primordiale in cui ebbe inizio la vita e ne è tuttora un elemento essenziale in ogni organismo, in quanto tutte le reazioni chimiche che si svolgono nelle cellule necessitano di un substrato liquido ed è in soluzione acquosa che

le sostanze organiche ed inorganiche passano da cellula a cellula; nei vegetali è anche l'elemento indispensabile per il trasporto dei sali minerali e delle sostanze organiche e per l'idrolisi ed utilizzazione dei composti di riserva.

Le piante si sono evolute nell'acqua, un ambiente "facile" sia per la vita vegetativa che per la riproduzione; questo spiega la scarsa specializzazione anatomica delle **alghe**, rimaste confinate all'ambiente acquatico, che possono assumere acqua e sali minerali attraverso tutte le loro superfici. I primi tentativi di emersione hanno portato a piante terrestri che, come la maggior parte delle **epatiche (Briofite)**, sono formate da lamine appiattite sul terreno, quasi prive di differenziazione, costrette a vivere in luoghi molto umidi e ombrosi. I progressivi miglioramenti di carattere funzionale ed anatomico, che si evidenziano prima nei **muschi (Briofite)** poi nelle **felci (Pteridofite)**, rendono questi organismi addirittura capaci di tollerare, sia pure sotto forma di vita latente, periodi di forte disidratazione. Questa caratteristica si afferma poi nelle piante superiori con la formazione del seme (**Spermatofite**) che, fortemente disidratato (10-15% di contenuto in acqua), è in grado di sopportare condizioni ambientali estreme non tollerabili per la pianta allo stato vegetativo. Parallelamente all'evoluzione del seme, le piante superiori hanno differenziato una serie di caratteri isto-anatomici che permettono di mantenere saturi d'acqua i tessuti interni, onde evitare prolungati deficit come conseguenza della forte traspirazione provocata dall'esposizione all'atmosfera. La traspirazione che avviene attraverso gli stomi delle foglie è compensata da equivalente assunzione di acqua attraverso le radici: *la regolazione di questi processi permette alla pianta di mantenere costante il suo bilancio idrico e non appassire*. È chiaro che l'entità del bilancio idrico varierà in relazione alle condizioni atmosferiche e alla quantità di acqua presente nel terreno: a basse temperature o in un'atmosfera particolarmente umida la dispersione di acqua è limitata per cui anche l'assunzione sarà ridotta; d'altra parte se la temperatura è elevata e l'aria è secca, aumenterà la traspirazione e verrà incrementata l'assunzione di acqua. Un albero può traspirare 200-300 l d'acqua in una giornata calda; una pianta di mais che in tutta la sua vita è in grado di assumere 100-200 l di acqua ne utilizza, come nutrimento, solo l'1.5-2% mentre il resto dell'acqua assunta è utilizzato per compensare le perdite dovute alla traspirazione e mantenere costante il bilancio idrico.

Il peso di una pianta o di una sua parte appena raccolta è definito **peso fresco** e la quantità di acqua presente nel campione può essere misurata mediante la differenza tra il suo peso fresco e il suo **peso secco**, cioè il peso della stessa pianta dopo 24^h a 100°C. Questa tecnica permette di misurare le variazioni di contenuto di acqua in piante differenti o in momenti differenti dello sviluppo: ad esempio, un seme mano a mano che matura si disidrata, una foglia mano a mano che invecchia, dalla primavera all'autunno, si disidrata.

2. Dal seme alla pianta.

Il seme

Le più antiche tracce di vita vegetale sulla terra risalgono a più di 3.000 milioni di anni fa. Le **spermatofite**, cioè le *piante a seme*, sono comparse circa 350 milioni di anni fa affermandosi e diffondendosi rapidamente. Un grande evento nell'evoluzione delle piante superiori, che ha notevolmente contribuito alla conquista della terraferma da parte dei vegetali, è stata l'affermazione di un organo specializzato per la propagazione e conservazione delle specie, il **seme**. Nel corso dell'evoluzione da forme più primitive (**Gimnosperme**) a forme più evolute (**Angiosperme**), lo sviluppo del seme si è semplificato e perfezionato.

L'importanza del seme nelle origini e nella evoluzione delle spermatofite più importanti, cioè le Angiosperme, (**Dicotiledoni e Monocotiledoni**) è evidente se si considera questo organo come passo avanti circa l'efficienza adattativa delle piante nei confronti dell'ambiente esterno. La forte pressione selettiva necessaria per affermare l'evoluzione del seme è stata esercitata dapprima nel corso del suo sviluppo dall'ovulo fecondato determinando la comparsa di molte modificazioni tra le quali, di primaria importanza, la sua protezione all'interno dell'ovario (**frutto**) contro numerosi predatori, soprattutto insetti, attirati dalle grandi quantità di sostanze di riserva lì accumulate.

Anche il processo germinativo e la prima crescita della plantula sono stati oggetto di scelte selettive che volta per volta hanno stabilizzato la situazione più favorevole. Se prendiamo come esempio le *dimensioni del seme* si può facilmente osservare come esistono situazioni opposte: da una parte i *semi piccoli*, che sono i più adattabili in quanto richiedono tempi più brevi di germinazione, possono essere prodotti in maggior numero nella stessa disponibilità di spazio e con lo stesso consumo di prodotti fotosintetici rispetto a *semi più grandi*, e possono, inoltre, essere dispersi con maggiore facilità. Dall'altra parte, però, la buona germinazione e lo sviluppo delle plantule sono favoriti dalle *dimensioni maggiori del seme* che contiene più sostanze nutritive.

Nelle Angiosperme, un notevole numero di strategie adattative sono state utilizzate per arrivare ad un compromesso tra queste situazioni opposte: i semi più grandi ad esempio vengono dispersi con l'aiuto di vari tipi di appendici o per mezzo di caratteristiche che li rendono appetibili agli animali vettori. In molti generi la riduzione del numero degli ovuli a uno o due per fiore rende possibile una maggiore flessibilità rispetto all'ambiente per le piante che producono semi grossi: vale a dire che, in circostanze sfavorevoli, la pianta produrrà pochi fiori riuscendo così ugualmente a dotare di riserve adeguate i pochi semi prodotti, ma, nella stagione più propizia, può subito aumentare il suo potenziale riproduttivo producendo un gran numero di semi. Anche il problema della difesa dei grossi semi dagli attacchi dei predatori può essere eliminato con la produzione nel seme di sostanze amare.

Il seme è l'organo cui viene affidata sia la *conservazione della specie* essendo il momento di vita della pianta più adatto alla sopravvivenza e il più capace di resistere a condizioni ambientali normalmente non tollerabili per la pianta in fase vegetativa, sia la *propagazione della specie* che è affidata al grande numero dei semi prodotti da una sola pianta; al loro interno, durante la quiescenza, una serie di componenti fisiologiche

e strutturali assicurano la sopravvivenza dell'embrione, cioè della nuova pianta a struttura a corno, con foglia, fusto e radice formati da meristemi. Sono questi meristemi che, riprendendo l'attività proliferativa alla germinazione del seme, assicurano l'accrescimento illimitato della pianta attraverso la continua formazione di nuovi organi: fusti, foglie e radici.

Morfologia e organizzazione

Da un punto di vista strettamente botanico con il termine **seme** si intende quella particolare *struttura che si sviluppa da un ovulo dopo il processo di fecondazione*. In senso più lato invece, nella pratica agricola e orticolturale, con il termine seme vengono genericamente indicate diverse *unità di dispersione*, che si sviluppano sia dall'ovulo che dai tessuti associati, come gli acheni (girasole) e le cariossidi (grano, granturco) che rappresentano invece dei veri e propri frutti.

La morfologia del seme è molto varia: sferoidale, ovoidale, oblunga, cilindrica, discoideale, reniforme, appiattita; molto variabili sono anche le caratteristiche esterne aventi significato di adattamenti ecologici atti ad assicurare la disseminazione: può trattarsi di *organi di volo* rappresentati da *peli* (che possono essere presenti sia come fini tomenti, come nella noce vomica, sia lunghi ciuffi isolati o estesi a gran parte della superficie, come nel seme di cotone, dove sono proprio queste particolari strutture che forniscono quella che impropriamente è detta "fibra" del tessuto di cotone), oppure da espansioni alari dei tegumenti; altre volte la diffusione è assicurata da *organi aggrappanti*, tipo creste e uncini, di ogni forma e dimensione; altre volte invece si tratta di adattamenti atti ad invogliare gli animali vettori fornendo loro un *alimento* gradevole come le *formazioni arillari*. L'arillo infatti (tipico quello rosso del tasso) è una proliferazione carnosa che verso la maturità del seme si forma alla base avvolgendolo parzialmente. Un altro esempio è dato dalla noce moscata dove il seme, sotto la polpa carnosa del frutto che lo contiene, è avvolto da un grande arillo lobato, rosso se fresco, giallo se secco, che costituisce la droga nota con il nome di macis.

Il seme maturo tipico è composto dall'**embrione**, dal **tessuto di riserva** (che può anche mancare come nei semi di molte Dicotiledoni), e dai **tegumenti**.

L'**embrione** deriva dalle divisioni della cellula uovo fecondata o zigote; quando è maturo, esso possiede sia l'*abbozzo della radichetta principale* che l'*abbozzo dell'apice caulinare*, detto anche *plumula*, al di sotto del quale sono inseriti i *cotiledoni*, lungo quella porzione di embrione, detta asse ipocotile, che congiunge la plumula con la radichetta.

I **cotiledoni** o foglie embrionali sono parte integrante dell'embrione e derivano anche essi dalle divisioni dello zigote, durante l'embriogenesi possono accumulare sostanze di riserva destinate ad alimentare l'asse dell'embrione al momento della germinazione. Nelle Gimnosperme i cotiledoni sono in numero variabile, non hanno funzione di riserva, ma di vere e proprie foglie. Nelle Dicotiledoni i cotiledoni sono due per lo più di forma e dimensioni uguali, con riserve amilacee e proteiche (come nel fagiolo) o oleose (come nella noce), interi, solo qualche volta lobati (noce) o palmati. Nelle Monocotiledoni, invece, l'unico cotiledone funge da austorio nei confronti dell'endosperma dal quale attinge le riserve per alimentare l'embrione. Nelle Graminee, l'unico cotiledone prende il nome di *scutello* ed è una piccola lamina sulla quale sta appoggiato l'asse dell'embrione. Il destino dei cotiledoni è diverso a seconda che si tratti di piante con seme epigeo o ipogeo. Infatti nelle prime i cotiledoni fuoriescono dal terreno, diventano verdi e fotosintetizzanti e funzionano come vere foglie con una durata di vita anche abbastanza

lunga. Nel secondo caso invece, restano nel terreno e, dopo aver ceduto tutte le loro riserve, degenerano.

Il **tessuto di riserva** vero e proprio è l'endosperma secondario che trae origine dalla fecondazione del nucleo proendospermatico ad opera del secondo nucleo spermatico del granulo di polline. Nelle Angiosperme, di regola, l'endosperma comincia a svilupparsi prima dell'inizio della segmentazione dello zigote, è presente in tutti i semi all'inizio dell'embrionogenesi e dalla sua presenza l'embrione dipende soprattutto a livello nutrizionale e di controllo ormonale della crescita.

Nel seme maturo l'endosperma può accrescersi e accumulare sostanze nutritive costituendo un tessuto di riserva permanente come nel ricino e nelle Graminee oppure mancare del tutto essendo stato utilizzato dall'embrione durante lo sviluppo e in tal caso la funzione di riserva nel seme viene assunta dalle foglie dell'embrione (cotiledoni) come ad esempio in molte Leguminose (fagiolo, pisello, lupino).

In un seme maturo, tutte le strutture finora descritte sono rivestite da **tegumenti**, in genere due, derivanti dalle modificazioni delle pareti dell'ovulo: sono detti **testa** il più esterno e **tegmen** il più interno.

Sia l'aspetto che i particolari organografici ed anatomici dei tegumenti seminali variano da specie a specie ed anzi sono così caratteristici che insieme alle forme e alle dimensioni dei semi consentono di individuare la specie di appartenenza: vi sono semi con tegumenti sottili, altri con tegumenti legnosi e di diverse colorazioni. A volte sono impermeabili all'acqua e impregnati di sostanze che li rendono resistenti ai succhi gastrici degli animali che li hanno ingeriti; solo raramente hanno consistenza carnosa, come nelle Aracee e in tal caso sono provvisti, verso l'esterno, di uno strato resistente. In ogni caso la loro struttura è molto variabile e, avendo l'ufficio di proteggere il seme, è correlata anche al tipo di frutto, cioè se il frutto è di tipo indeiscente con pericarpo robusto il tegumento seminale può essere anche sottile, come nella noce, nocciola, ecc., se invece il frutto è deiscente o carnoso i tegumenti sono spesso lignificati, come nell'uva. Nella maggior parte dei semi è visibile una cicatrice di varia forma, detta **ilo**, che sta ad indicare il punto di inserzione del funicolo che teneva attaccato l'ovulo alla placenta dell'ovario.

Esperienza 6: GERMINAZIONE DEI SEMI E FORMAZIONE DELLE PLANTULE

Materiale occorrente:

- Vaschette di plastica, carta assorbente o cotone, pinzette, lamette, sabbia di fiume e di mare, torba, argilla, stagnola;
- acqua, sale da cucina; semi di pino, fagiolo rosso, fagiolo bianco, pisello, fava, lupino, girasole, grano e granoturco.

Trenta semi di ogni specie sono messi a imbibire per 24^h nelle vaschette, col fondo ricoperto di carta assorbente o cotone, cui è stata aggiunta adeguata quantità di acqua (i semi più grossi hanno una maggiore necessità di acqua).

Dopo le 24^h i semi sono tutti rigonfiati e con l'aiuto delle pinzette e di una lametta possono essere "smontati" per mettere in evidenza le parti costituenti: *tegumenti, embrione, tessuto di riserva*.

In questo modo si può riconoscere la differenza tra monocotiledoni, gimnosperme

e dicotiledoni.

I semi rimasti sono trasportati in cassette di sabbia di fiume e allevati per 15-20 giorni avendo cura di bagnare saltuariamente la sabbia.

Al termine di questo periodo avremo ottenuto delle plantule in cui sarà riconoscibile il fusticino con le prime vere foglie e l'apparato radicale. Si vedrà che i cotiledoni hanno subito delle trasformazioni: in alcune specie rimangono nel terreno, ingialliscono, hanno perduto consistenza (seme ipogeo); in altre sono stati portati in alto, sopra il terreno, dall'allungamento dell'asse ipocotile (seme epigeo), possono diventare verdi e fotosintetizzanti funzionando per un certo periodo come vere foglie (figure 2, 3 e 4).

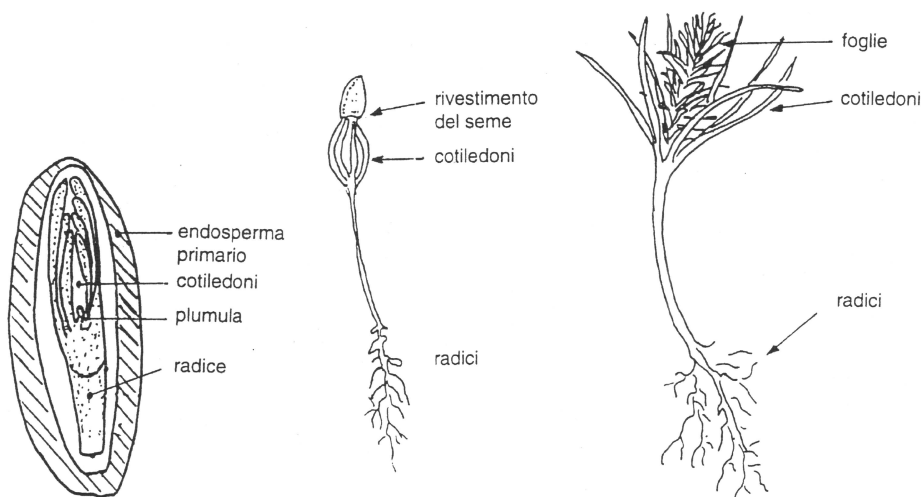
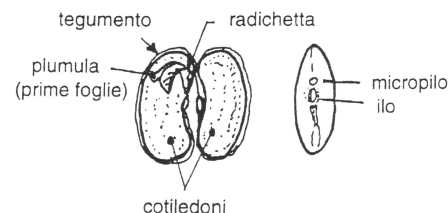


Fig. 2: Seme (sezione longitudinale) e stadi di germinazione di *Pinus* (Gimnosperma). Seme epigeo.

Per verificare l'importanza dei fattori esterni (buio-luce, basse-alte temperature, concentrazioni diverse di sale e terreni diversi) sulla germinazione dei semi e sulla crescita delle plantule, 10-15 semi di ciascuna specie sono allevati con adeguata quantità di acqua nelle diverse condizioni. Si registra giornalmente il numero dei semi della stessa specie germinati e, al termine dell'esperienza (15-20 giorni), la lunghezza delle plantule ottenute.



Il tipo di sostanze di riserva è assai variabile a seconda della specie: i **carboidrati**, principalmente l'amido, predominano nei semi dei *cereali* e di altre *Graminee*, benché siano presenti anche lipidi e proteine; altri semi di notevole importanza agricolturale (*girasole*, *ricino*, *arachide*, *soia*) immagazzinano grandi quantità di **lipidi**, in genere sotto forma di trigliceridi e anche in questi semi oleosi sono presenti discrete quantità di altre sostanze, principalmente proteine. Altri livelli di **proteine**, insieme a grandi quantità di amido e pochi lipidi, sono invece tipici dei semi delle *Leguminose* come il *pisello* e il *fagiolo*. In tutti i semi, in maggiore o minore quantità, è sempre presente, tra le sostanze di riserva, la fitina, spesso associata alle proteine.

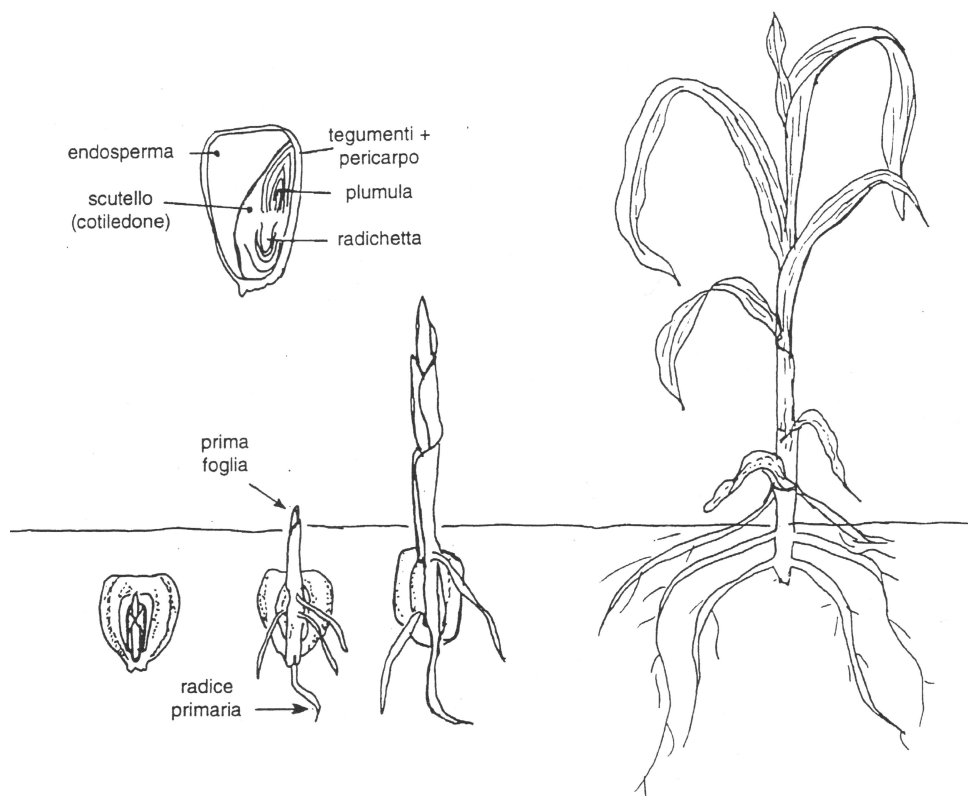


Fig. 4: Seme (sezione longitudinale) e stadi di germinazione di una Monocotiledone, granoturco (*Zea mays*). Seme ipogeo.

Esperienza 7: TESSUTI E SOSTANZE DI RISERVA NEI SEMI

Materiale occorrente:

- Lamette, capsule o piccoli barattoli di vetro, carta assorbente, pinzette, mortaio, provette, fornellino;
- tintura di iodio, benzina, idrato di sodio, solfato di rame, zucchero;
- semi di varie specie.

Per dimostrare l'**importanza dei tessuti di riserva** si utilizzano semi tenuti in acqua per 24 h. Con l'aiuto di una lametta i semi sono privati in parte o totalmente dei tessuti di riserva (*fagiolo* = *cotiledoni*, *mais* = *endosperma*). Si osserva la germinazione di:

- semi interi;

- semi parzialmente privati dei tessuti di riserva (un cotiledone o mezzo endosperma);
- semi del tutto privi di tessuti di riserva
- semi come i precedenti, ma allevati in soluzione di saccarosio (zucchero 10 g/l) che, soprattutto nelle Graminee, può fornire, sostituendosi all'endosperma, un adeguato supporto energetico per la crescita della plantula.

Per dimostrare il **diverso tipo di sostanze di riserva** sono utilizzate quantità (peso) identiche di vari tipi di semi (*grano, granturco, pisello, fava, ricino, girasole, soia, noce, castagno*). Il rilevamento delle 3 principali categorie di riserve si effettua nel seguente modo:

– **Amido:** i semi pestati in un mortaio, sono messi in acqua bollente per alcuni minuti. Al liquido, fatto raffreddare e filtrato, si aggiungono poche gocce di tintura di iodio. In presenza di amido la soluzione si colora in blu-viola.

– **Grassi:** i semi pestati in un mortaio sono messi in una provetta contenente 10 ml di benzina e tenuti in acqua bollente (bagnomaria) per 10 minuti. Una quantità determinata della soluzione ottenuta è fatta gocciolare piano piano su carta assorbente e fatta asciugare. La presenza dei grassi è rivelata dalla comparsa di una macchia traslucida.

– **Proteine:** i semi pestati in un mortaio sono bolliti (bagnomaria) in provette contenenti 5 ml di idrato di sodio (NaOH) al 2%. Si lascia raffreddare, si filtra e si aggiungono due gocce di solfato di rame (CuSO_4) al 5%. In presenza di proteine la soluzione si colora in rosso-viola.

Utilizzazione delle riserve

Il seme maturo, disidratato e staccato dalla pianta madre, resta in uno stato di quiescenza fino a che le condizioni ottimali di temperatura, acqua e luce non determinano la ripresa della vita attiva e la conseguente germinazione. Con il termine **germinazione** si indica in maniera abbastanza generica il *passaggio del seme dallo stato di vita latente allo stato di vita attiva* che porta allo sviluppo della plantula.

Il primo passo verso la germinazione è senza dubbio la *reidratazione del seme* dovuta al forte potere di *imbibizione* dei colloidali plasmatici (soprattutto proteine) che, in presenza di acqua, sono in grado di assorbire notevoli volumi di liquido vincendo forze contrastanti assai grandi. Le proprietà di rigonfiamento di questi colloidali sono dovute alla capacità dell'acqua di formare molti legami idrogeno con i gruppi C=O , -OH e -NH_2 delle molecole organiche per cui i semi possono assumere acqua e rigonfiarsi anche se si trovano in terreni relativamente poveri d'acqua o dove l'acqua è fortemente trattenuta dalla elevata tensione di assorbimento delle particelle del terreno. Con l'imbibizione viene attivata tutta una serie di processi biochimici e morfologici che determinano lo sviluppo della plantula. Uno dei primi eventi sperimentalmente verificabili in un seme messo in condizione di germinare è l'aumento del *tasso respiratorio* (RQ) che in *Pisum* può essere rilevato già dopo 4 ore dall'immersione in acqua.

Contemporaneamente all'assunzione di acqua e all'aumento dell'RQ si verifica anche la *mobilizzazione delle riserve* grazie all'intervento di un numero elevato di *enzimi* che sono *riattivati oppure sintetizzati ex novo*. Gli enzimi catalizzano una serie di processi che portano alla idrolisi delle grosse molecole in molecole di minori dimensioni maggiormente utilizzabili e più facilmente distribuibili nei vari tessuti embrionali in fase di crescita.

Esperienza 8: ASPETTI FISIOLOGICI DELLA GERMINAZIONE

Materiale occorrente:

- Barattoli uguali con coperchio, garza;
- acqua, sale da cucina, fenoltaleina; semi di varie specie.

L'aumento di volume dei semi in seguito all'imbibizione si dimostra utilizzando un numero uguale di semi della stessa specie (*lupini, fagioli, ceci, piselli...*) messi in recipienti trasparenti con un uguale volume di liquido (acqua, acqua + sale da cucina in concentrazioni crescenti da 1% a 15%).

Si registra il volume dei semi secchi sulla parete del recipiente e se ne osserva l'aumento a vari intervalli di tempo. Il maggior rigonfiamento sarà osservabile nei semi in sola acqua o in soluzione salina diluita. I semi immersi nella soluzione di sale più concentrata assorbono meno, perché è impedito l'ingresso d'acqua per **osmosi** (v. cap. prec.).

La diversa capacità di imbibizione delle varie sostanze di riserva dei semi si dimostra utilizzando volumi uguali di semi con riserve diverse (*piselli-proteine, mais-carboidrati, soia-lipidi*) messi in recipienti trasparenti, uguali, sulle cui pareti si registra il volume a secco. Si aggiungono volumi uguali di acqua e, come nell'esperienza precedente si osserva e si registra il variare del volume dei semi a intervalli di tempo.

La maggiore attività respiratoria dei semi imbibiti rispetto ai secchi (come conseguenza della riattivazione di tutti i sistemi enzimatici) si dimostra utilizzando un ugual numero di semi della stessa specie, secchi o imbibiti per 24-48 h, sospesi con una garza in un recipiente ermeticamente chiuso, contenente una soluzione acquosa di fenoltaleina, un indicatore di pH (v. cap. prec.) prossima al punto di viraggio (rosa chiaro). L'emissione da parte dei semi della CO_2 respiratoria, combinandosi con l'acqua a dare H_2CO_3 , provoca la progressiva acidificazione della soluzione e il suo viraggio da rosa a incolore. La velocità di decolorazione sarà maggiore nel recipiente con i semi imbibiti perché hanno un RQ più elevato.

Per portare la fenoltaleina vicina al punto di viraggio si soffia nella soluzione con una pipetta o una cannuccia, determinando il "quasi" scolorimento della soluzione. Questo procedimento accelera il passaggio successivo dovuto alla respirazione dei semi.

Assunzione dell'acqua: trasporto e traspirazione

In seguito alla germinazione, l'embrione, utilizzando come fonte energetica le sostanze accumulate nei tessuti di riserva, si trasforma in una plantula che prende contatto con il terreno assumendo l'acqua presente in esso attraverso l'apparato radicale e disperdendola mediante la traspirazione fogliare. Si realizza così un trasporto di acqua e sali minerali (**linfa grezza**) dal suolo all'atmosfera, attraverso un tessuto del corpo della pianta (tessuto conduttore) specializzato per questa funzione, il **legno**, fatto di cellule con pareti ispessite morte e quindi vuote, sovrapposte in fila una sull'altra, prive della maggior parte delle pareti trasversali, che formano come tanti piccolissimi tubicini lungo i quali l'acqua può salire per fenomeni di *capillarità* come nel cotone o nella carta assorbita. La capillarità come forza fisica non è però sufficiente per portare l'acqua a

grandi altezze, come per esempio nel caso di alberi; intervengono allora altre forze più potenti, quali la **pressione radicale**, legata alle differenze di pressione osmotica tra cellula e cellula, e la **forza aspirante della chioma determinata dalla traspirazione fogliare attraverso gli stomi**. La presenza delle aperture stomatiche nelle foglie fa sì che le cellule a ridosso della cavità stomatica, in contatto quindi con l'atmosfera, perdano acqua per evaporazione dalla loro superficie e tendano a recuperarla dalle cellule interne più vicine, le quali a loro volta, la recupereranno dalle cellule loro confinanti fino a che non è raggiunta l'acqua presente nei vasi legnosi delle nervature fogliari. La rimozione di acqua dai vasi ne richiama altra da quelli sottostanti, dalla foglia si passa al fusto e poi alla radice: in questo modo si è formato un sistema di cellule con gradi di tensione di suzione diversa, con gradi di "sete" diversa, in cui le cellule più assetate che richiamano acqua sono quelle a contatto con l'atmosfera a livello delle aperture stomatiche, mentre le più ricche di acqua, quelle che riforniscono tutto il sistema, sono le cellule assorbenti della radice in grado di assumere l'acqua presente nel terreno.

Esperienza 9: CONDUZIONE DELL'ACQUA ATTRAVERSO LA PIANTA

Materiale occorrente:

- Bicchieri, bacinelle, vasi nuovi di terracotta;
- acqua e inchiostro colorato;
- carote fresche con le foglie, sedano, fiori bianchi di garofano, semi di mais, di grano, di ravanella, di lattuga.

L'acqua del terreno penetra nelle piante attraverso le radici, soprattutto attraverso i **peli radicali**. Per metterli in evidenza nelle giovani plantule si mette, in una bacinella piena di acqua, per tutta la notte un vaso di terracotta capovolto in modo che il vaso si imbeva di acqua per capillarità.

Si pongono sul fondo esterno del vaso semi di ravanella o di lattuga imbibiti per 2^h in acqua e si coprono in modo che siano al buio in condizioni di umidità costante. Dopo 2-3 giorni si può osservare che i semi sono germinati e le radichette sono coperte da fitti peli sottilissimi, i peli radicali, che ne aumentano enormemente la superficie assorbente (figura 5). L'acqua assorbita attraverso i peli radicali si muove lungo la radice e raggiunge il fusto.

Si taglia la parte apicale della radice di una *carota fresca con tutto il suo ciuffo di foglie* e si tiene in un bicchiere di acqua per 2 ore; poi all'acqua si aggiungono 2 ml di inchiostro blu o verde e si lascia in piena luce per qualche ora. Quindi si taglia la carota a metà nel senso della lunghezza e si osserva che l'inchiostro è salito lungo la parte centrale dove si trovano i tessuti conduttori, in particolare i vasi legnosi.

Dalla radice l'acqua passa, attraverso il fusto, alle foglie ed i fiori come si può vedere tenendo immersi per qualche ora, in acqua e inchiostro, gambi di sedano con le foglie e fiori bianchi di garofano.

Fare attenzione a questo proposito che il taglio di tutti gli organi vegetali sia effettuato sott'acqua in modo da impedire a bolle d'aria di ostruire i "vasi" attraverso i quali scorre l'acqua.

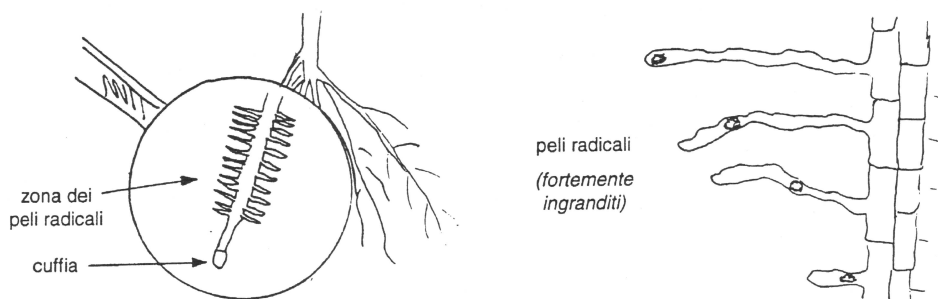


Fig. 5: Peli radicali: a sinistra visti con la lente d'ingrandimento; a destra fortemente ingranditi.

Esperienza 10: LE APERTURE STOMATICHE

Materiale occorrente:

- Beuta o bottiglia a collo lungo, tappo di gomma con due fori, tubicino di vetro, silicone;
- foglie a gambo lungo.

Per dimostrare la **presenza sulla superficie della foglia di aperture** (*stomi*) che mettono in comunicazione con l'esterno il vasto ed intricato sistema di spazi intercellulari, si prende una foglia a gambo lungo (*gigaro, calla...*) e un tappo di gomma con due fori che chiuda perfettamente un recipiente di vetro riempito di acqua per metà. Il picciolo della foglia, fatto passare attraverso uno dei due fori deve "pescare" nell'acqua. Nell'altro foro si fa passare, senza che tocchi l'acqua, un tubicino di vetro e si sigillano accuratamente i fori attraverso i quali passano il tubicino di vetro ed il picciolo. Aspirando con la bocca dal tubicino, si osserva gorgogliare nell'acqua l'aria che penetrata attraverso gli stomi fuoriesce dal gambo della foglia. Ripetendo l'esperienza con la foglia accuratamente ricoperta di grasso, soprattutto sulla pagina inferiore, l'aria non gorgoglia più perché sono state ostruite le aperture stomatiche sulla superficie foliare e quindi impedito l'ingresso dell'aria esterna (figura 6).

Esperienza 11: TRASPIRAZIONE ATTRAVERSO LA SUPERFICIE FOLIARE

Materiale occorrente:

- Bottiglie di vetro bianco a collo stretto e lungo, sacchetti di plastica trasparente;
- acqua, olio, grasso;
- piante recise.

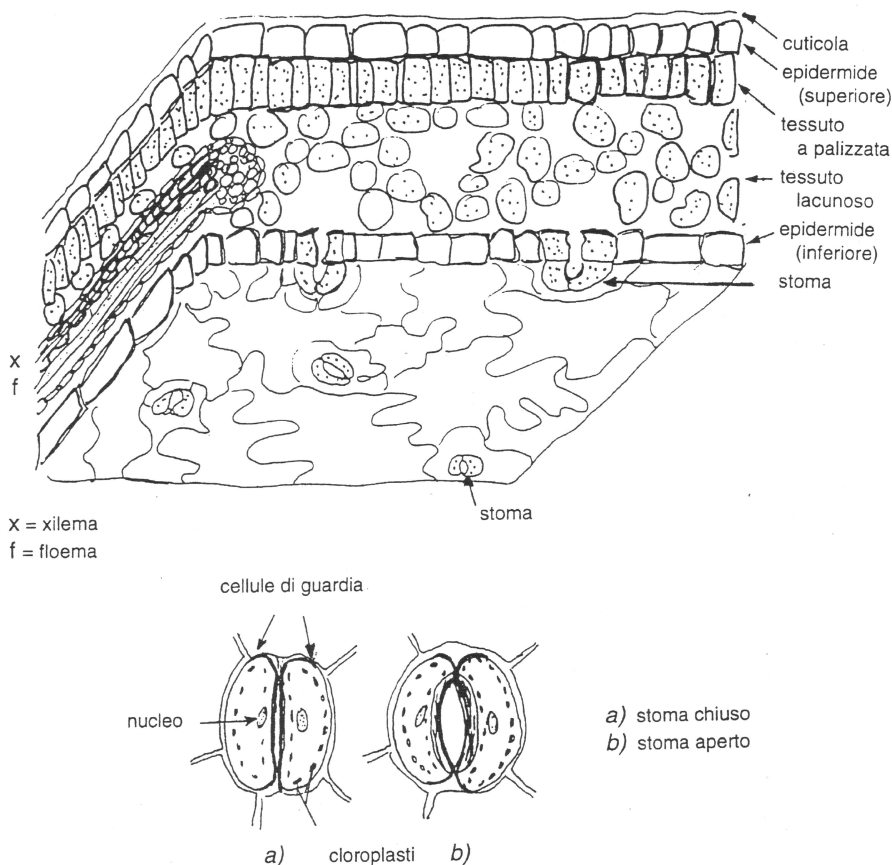


Fig. 6: Sezione trasversale delle foglie dorso-ventrale e schema di uno stomato (fortemente ingrandito) come si presenta sulla superficie foliare.

Si segna il livello dell'acqua sul collo della bottiglia in cui è immersa una pianta appena recisa e si stratifica un velo di olio sulla superficie dell'acqua in modo da evitare l'evaporazione (figura 7). A determinati intervalli di tempo (qualche ora) si registra la diminuzione del livello dell'acqua che è avvenuta necessariamente attraverso la pianta (1).

Se si cospargono accuratamente di grasso le foglie ostruendo in tal modo gli stomi la pianta avvizzisce e muore mentre il livello dell'acqua resta invariato in quanto si è bloccato il trasporto (2).

Se si aumenta la quantità di olio nella bottiglia in modo che la pianta peschi nell'olio, questa rapidamente avvizzisce e muore per mancanza di acqua (3).

Se si richiude ermeticamente la pianta in un sacchetto la quantità di acqua trasportata attraverso la pianta sarà minore che nel controllo perché l'aria contenuta nel sacchetto si satura in fretta di acqua e la traspirazione rallenta (4).

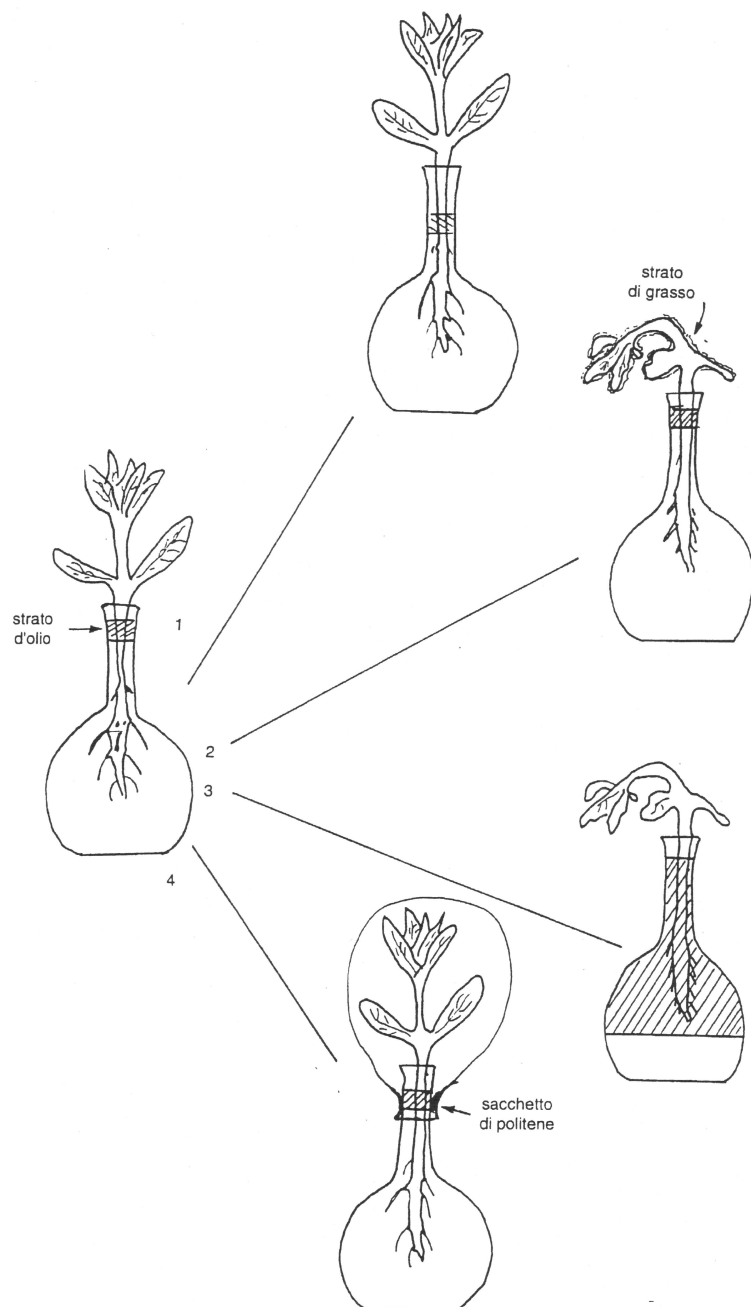


Fig. 7: Dimostrazione che la traspirazione avviene attraverso la superficie foliare.

La radice e l'assunzione dei sali minerali

La pianta, attraverso i processi di assunzione e traspirazione, regola le sue necessità di acqua; questa però non è l'unica sostanza che viene assorbita dal terreno, infatti la pianta assume anche discrete quantità di sali minerali, disciolti nell'acqua, che apportano una grande varietà di elementi indispensabili per la costruzione e il funzionamento di gran parte delle molecole organiche.

Il processo di passaggio dal terreno alla pianta avviene attraverso un organo specializzato, la **radice** che si sviluppa sotto terra, serve da ancoraggio della pianta al terreno e può funzionare anche da organo di riserva.

Una radice tipica si sviluppa dalla radichetta embrionale e si accresce verso il basso per azione della forza di gravità (**geotropismo positivo**) cui è sensibile la porzione apicale terminale.

La radice, di colore chiaro, non diventa mai verde in quanto i suoi plastidi non si differenziano mai in cloroplasti bensì in leucoplasti, incolori, o amiloplasti dove si accumula amido come sostanza di riserva.

Nella radice si riconoscono varie zone:

- l'**apice** di forma conica, dotato di cellule in attiva divisione, è rivestito da un tessuto di protezione chiamato cuffia;
- la **zona liscia di accrescimento**, dove le cellule neoformate si allungano;
- la **zona pilifera**, ricoperta di sottilissimi peli formati, ognuno, da una unica cellula che estroflette la parete esterna aumentando così la superficie assorbente attraverso la quale avviene, per osmosi, il passaggio, dal terreno alla pianta, della soluzione di acqua e sali minerali in essa disciolti.

La soluzione, una volta entrata nel pelo assorbente, passa da cellula a cellula fino ad arrivare al centro della radice nel *tessuto conduttore* specializzato (**legno o xilema**) attraverso il quale arriva in tutto il corpo della pianta (v. Esperienza 9).

Esperienza 12: ASSUNZIONE DEI SALI MINERALI

Materiale occorrente:

- Recipienti di vetro chiusi con tappi forati di sughero o gomma o polistirolo espanso, stagnola;
- 1 g di nitrato di calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0.13 g di cloruro di potassio KCl , 0.25 g di solfato di magnesio MgSO_4 , 0.25 g di fosfato acido di potassio KH_2PO_4 e solfato di ferro FeSO_4 in tracce;
- plantule di mais o di fagiolo.

Si utilizzano plantule con radici di alcuni centimetri, ottenute dopo 15-20 giorni di allevamento alla luce su sabbia o segatura umida. Si lavano accuratamente le radici e si fanno passare attraverso i fori dei tappi che chiudono i recipienti contenenti le *soluzioni nutritive* in cui debbono "pescare". I recipienti sono coperti accuratamente con carta stagnola per limitare al massimo lo sviluppo di alghe nelle soluzioni (figura 8).

L'importanza dei vari elementi per la crescita delle piante può essere dimostrata allevandole in soluzioni in cui sono stati disciolti i sali meno uno:

n° 1: controllo 1 l H₂O distillata + Ca(NO₃)₂ + KCl + MgSO₄ + KH₂PO₄ + FeSO₄

n° 2: controllo 1 l H₂O distillata

n° 3–7: 1 l H₂O distillata + quattro sali

La crescita delle plantule, seguita per diversi giorni, evidenzia che solo il campione n° 1 avrà uno sviluppo normale dimostrando che le piante possono vivere anche in assenza di terreno (**culture idroponiche**). Le altre plantule cresceranno con uno sviluppo più o meno compromesso dalla mancanza di elementi essenziali quali calcio, azoto, potassio, magnesio, fosforo, ferro, zolfo. Soprattutto l'assenza di magnesio e di ferro, indispensabili per la sintesi della clorofilla, è facilmente evidenziabile perché le nuove foglie che si sviluppano saranno giallicce.

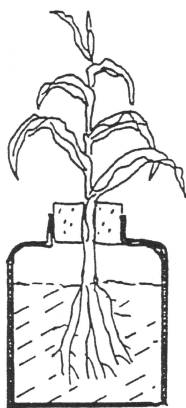


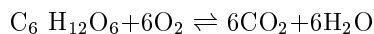
Fig. 8: Realizzazione di una coltura idroponica

La respirazione

Tutti gli organismi viventi respirano, cioè introducono ossigeno ed emettono anidride carbonica. La **respirazione** è quel processo per cui l'*energia contenuta nei legami chimici di alcune molecole è trasferita all'ATP (adenosintrifosfato)* – sempre disponibile in ogni tipo di cellula – che ha la proprietà di fornire energia per le reazioni chimiche senza però diventare parte del prodotto finale.

Nelle piante, l'energia derivata dal processo fotosintetico, è immagazzinata, soprattutto nei tessuti di riserva, sotto forma di **carboidrati (amido)** e/o **proteine** e **lipidi**. La successiva utilizzazione di queste molecole e la liberazione dell'energia contenuta nei loro legami è un processo graduale che comporta una iniziale trasformazione di gran parte di queste sostanze in glucosio, o per semplice idrolisi come nel caso dell'amido, o attraverso complesse sequenze di reazioni come nel caso dei lipidi.

Il glucosio, nelle piante come negli animali, è ritenuto la molecola di partenza del processo respiratorio vero e proprio mediante il quale questo composto organico a 6 atomi di carbonio è completamente degradato, in presenza di ossigeno, a 6 molecole di anidride carbonica e 6 molecole di acqua secondo la reazione



che libera l'energia contenuta nei legami del glucosio, che sarà utilizzata dalle cellule per la sintesi di ATP o dissipata sotto forma di calore. Negli animali, con un alto tasso respiratorio, il calore dissipato è utilizzato per mantenere costante la temperatura corporea; nelle piante, invece, la respirazione è in genere così lenta che la quantità di calore prodotta non ha effetto sulla temperatura dell'organismo; solo in particolari condizioni sperimentali (semi germinanti in una bottiglia termica) è possibile registrare la produzione di calore.

In casi eccezionali però il calore prodotto della respirazione è dimostrabile direttamente anche in organi vegetali: alla fioritura lo *spadice dell'Arum*, o gigaro, aumenta la temperatura di 17°C rispetto all'ambiente, in *Cucurbita* si ha un innalzamento di 10°C. Questa produzione di calore è biologicamente utilizzata nel gigaro per attirare gli insetti impollinatori in quanto provoca la volatilizzazione di sostanze odorose.

Fattori ambientali possono influire sulla intensità della respirazione nelle piante: tra questi il più importante è forse la **temperatura**. La temperatura minima alla quale è ancora misurabile la respirazione è di solito intorno ai -10°C, ma tessuti resistenti al gelo, come nelle *foglie aghiformi di alcune conifere* respirano ancora a -20°C, mentre la respirazione di *piante tropicali*, sensibili al freddo, può essere pregiudicata tra 0° e +5°C. Anche la disponibilità di acqua ha una grande influenza sulla entità della respirazione: in *piante che vivono nell'acqua* o in terreni saturi di acqua, la scarsità di ossigeno può limitare l'intensità respiratoria anche perché questo gas ha una ridotta solubilità nell'acqua. In queste condizioni alcune specie possono sviluppare anche organi particolari addetti all'approvvigionamento di ossigeno come le **radici respiratorie o pneumato-fori**; il forte sviluppo degli spazi intercellulari nelle piante acquatiche o palustri serve anch'esso per facilitare l'approvvigionamento di ossigeno esterno e immagazzinare quello prodotto dalla fotosintesi a favore del processo respiratorio.

Anche la **disidratazione** ha effetto sulla respirazione inibendola fortemente; *le specie o gli stadi (semi, spore) specializzati per la vita in condizioni di forte disidratazione* (10% di contenuto di acqua contro l'80-90% delle foglie) *hanno una respirazione minima* e quindi un minimo fabbisogno di materiale energetico, condizione necessaria per poter superare lunghi periodi di quiescenza.

Esperienza 13: RESPIRAZIONE

Materiale occorrente:

- Garze, provette con tappo ermetico, pipette, elastici;
- fenoltaleina;
- plantule di mais verdi (15 giorni di allevamento in acqua alla luce) ed eziolate (10 giorni di allevamento in acqua al buio).

La **respirazione**, come produzione di CO₂, può essere dimostrata utilizzando *piante eziolate* (prive di pigmenti fotosintetici) o *piante verdi tenute al buio* per tutta la durata dell'esperienza.

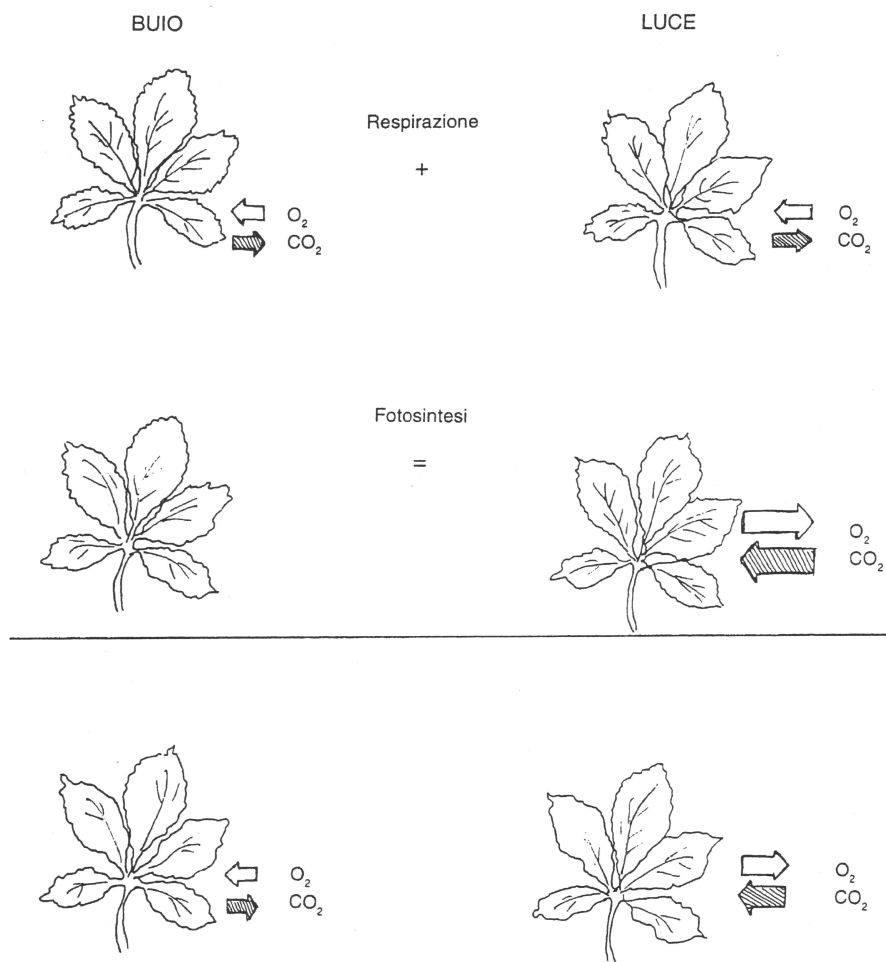


Fig. 9: Entità degli scambi gassosi in diverse condizioni di illuminazione

Plantule di mais verdi o eziolate sono sospese mediante una garza in grosse provette ermeticamente chiuse contenenti una uguale quantità di soluzione di fenoltaleina vicina al punto di viraggio. Come controllo dell'esperienza sono state utilizzate delle provette senza plantule.

I risultati sono osservabili dopo circa 30 minuti dall'inizio della prova; il viraggio, dovuto alla emissione di CO_2 respiratoria è rilevabile solo nelle provette 3, 4, 6 nelle quali le piante non fotosintetizzano. Nella provetta 5 le piante, verdi e illuminate, riutilizzano per la fotosintesi la CO_2 emessa e questo maschera il contemporaneo processo respiratorio (figura 9).

Materiale	Trattamento	Indicatore	
		<i>inizio</i>	<i>fine</i>
1 controllo	luce	rosa	rosa
2 controllo	buio	rosa	rosa
3 pianta eziolata	luce	rosa	incolore
4 pianta eziolata	buio	rosa	incolore
5 pianta verde	luce	rosa	rosa
6 pianta verde	buio	rosa	incolore

————— ■ —————

3. La fotosintesi

I pigmenti fotosintetici

Gli organismi vegetali devono il loro colore, oltre che ai pigmenti che abbiamo utilizzato per la preparazione degli indicatori naturali, anche ad altre categorie di sostanze colorate legate al processo fotosintetico che negli eucarioti sono contenuti in organuli specializzati detti **plastidi**. Esse sono principalmente:

Clorofille, solubili in sostanze organiche cui si deve essenzialmente il colore verde delle piante ed il processo fotosintetico;

Carotenoidi, anch'essi solubili in solventi organici, che coadiuvano le clorofille nella fotosintesi. Sono presenti anche da soli in molti *frutti maturi come il pomodoro e le zucche gialle o in radici come la carota*;

Ficobiline, solubili in acqua, sono caratteristiche del mondo delle alghe cui conferiscono i tipici colori.

Esistono, in natura, diversi tipi di *clorofille* individuati dalle prime lettere dell'alfabeto. La clorofilla **a**, presente in tutti gli *eucarioti fotosintetici e nei cianobatteri* (alghe azzurre nella vecchia terminologia) è il pigmento fondamentale per la fotosintesi ossigenica cioè quel tipo di fotosintesi che, liberando ossigeno come sottoprodotto delle reazioni principali, è responsabile della sua presenza nell'atmosfera ^[1].

La clorofilla **b** si trova in tutte le *piante terrestri e nelle alghe verdi*, loro probabili antenate; è considerata, come le altre clorofille **c** e **d**, i carotenoidi e le ficobiline, un **pigmento accessorio** in quanto è in grado di trasferire l'energia luminosa catturata alla clorofilla **a**, ampliando in questo modo lo spettro di assorbimento della luce visibile (figura 10).

Le clorofille **c** e **d** sostituiscono la **b** nei diversi gruppi di alghe (*alghe rosse, alghe brune, diatomee ecc...*).

La presenza della clorofilla nei vegetali è dipendente dall'illuminazione e dalla disponibilità, nel terreno, di particolari elementi come il Mg e Fe. Infatti, semi fatti germinare in ambiente totalmente privo di luce sviluppano plantule gialle e inconsistenti (**eziolate**) che diventano verdi quando sono esposte alla luce. Analogamente in plantule verdi, allevate per qualche tempo in soluzioni nutritive prive di Mg o di Fe, le nuove foglie sono decolorate e le piante deperiscono (**clorosi**) (v. esper. 12). Questo deperimento a livello fogliare, presente in piante acidofile quali ortensie, camelie ed azalee, è correggibile, nelle pratiche di giardinaggio, con la somministrazione di sali di ferro o di magnesio (solfato ferroso e allume di magnesio).

[1] Tra i 3 e i 2.5 miliardi di anni fa la comparsa dei primi cianobatteri dotati di clorofilla **a** determinò una vera e propria rivoluzione nella composizione dell'atmosfera che da riducente divenne ossidante per il progressivo arricchimento in O₂ di origine fotosintetica. Questo mutamento ebbe conseguenze importantissime perché permise l'instaurarsi di nuovi processi metabolici, tra cui la respirazione, che a loro volta favorirono, attraverso una migliore utilizzazione dei substrati organici, una maggiore disponibilità energetica, per cui gli organismi poterono aumentare di taglia e divenire pluricellulari.

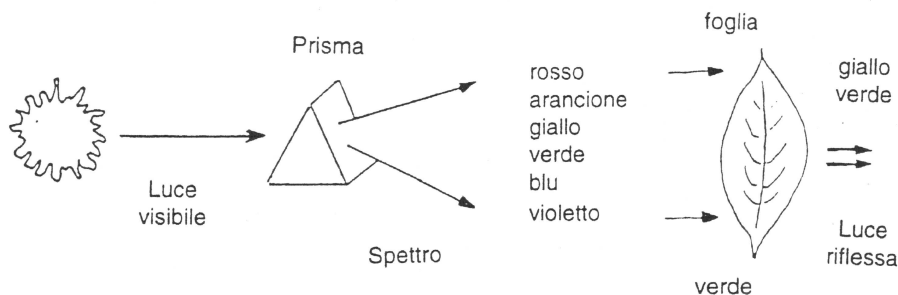


Fig. 10: Scomposizione della luce solare attraverso un prisma e assorbimento delle bande rosse, arancione, blu, violetto, attraverso una lamina foliare

I **carotenoidi** hanno colori che variano dal rosso (*licopene dei pomodori maturi*) all'arancio (β -*carotene della carota*) al giallo (*zeaxantina del seme di mais*). Si dividono in **caroten**i, idrocarburi costituiti solo da idrogeno e carbonio, e **xantofille** che possiedono anche atomi di ossigeno nella molecola.

Sono presenti in tutti gli organismi vegetali ed alcuni carotenoidi costituiscono i precursori di sostanze fondamentali per gli animali come la vitamina A ed il retinene (parte della rodopsina, la molecola fotorecetttrice presente nei bastoncelli della retina).

Le **ficobiline**, *ficoeritrina (rossa)* e *ficocianina (blu)* facilitano la cattura dell'energia luminosa in particolari condizioni, come sott'acqua, dando luogo all'adattamento cromatico.

Questo spiega la distribuzione verticale delle alghe con predominanza delle **alghe verdi nelle zone superficiali**, delle **alghe rosse nelle zone profonde** e delle **alghe brune nelle zone intermedie**, come risposta all'intensità luminosa ed al colore predominante della luce.

I raggi solari, attraversando spessori variabili di acqua, diminuiscono la loro intensità per l'azione filtrante dell'acqua stessa e, alle *maggiori profondità*, giungono solo le radiazioni blu-verdi non assorbibili dalle clorofille che hanno delle bande di assorbimento corrispondenti al rosso (680-640 nm per la clorofilla **a**, 655-630 nm per la clorofilla **b**)^[2] e al blu (445 nm per la clorofilla **a**, 480 nm per la clorofilla **b**)². Per tale motivo in queste zone si sono evolute forme in cui prevalgono carotenoidi e xantofille e ficobiline che si sono adattate alla luce sottomarina blu-verde.

Essendo la fotosintesi nelle **alghe rosse** (*Rodoficee*) resa possibile dalla presenza di ficobiline, queste alghe si possono trovare anche a 90 m di profondità, se le acque sono limpide, ma nelle acque costiere, in cui la luce è assorbita o dispersa dalla melma in sospensione, il limite efficace per la fotosintesi è tra i 18 e i 36 m.

Poiché un pigmento, per assorbire in modo efficace la luce trasmessa dal mezzo circostante, deve avere un colore complementare rispetto a quello del mezzo (adattamento cromatico complementare), tra le **alghe rosse**, quelle che crescono più vicine alla superficie, dove sono maggiori le radiazioni proprie della luce rossa, tendono a formare una maggiore quantità di pigmento blu, la ficocianina; l'inverso avviene per quelle che vivono in zone più profonde nella luce verde e blu che favorisce la sintesi della ficoeritrina.

[2] I valori delle bande di assorbimento sono relativi ai pigmenti in soluzione di etere di petrolio.

Al di sopra della zona delle alghe rosse, ad una *minore profondità*, sono presenti le **alghe brune** (*Feoficee*) di grosse dimensioni (*Laminariaceae*) che hanno raggiunto un buon livello di specializzazione. La maggior parte della luce, che giunge a questa profondità, ha lunghezze d'onda intorno a 500 nm, per cui si è affermato soprattutto quel tipo di alga che, come le *Feoficee*, è ricco di *fucoxantina*.

Anche in questo caso la quantità di pigmento bruno è in relazione con l'intensità luminosa, per cui le feoficee che vivono più vicino alla superficie assumono un colore più verde dovuto alle clorofille non più mascherate dalla grande quantità di fucoxantina.

Nella zona superficiale, con il massimo di illuminazione, sono presenti le **alghe verdi** (*Cloroficee*), nelle quali compare per la prima volta, nel corso dell'evoluzione, la clorofilla **b**.

Esperienza 14: ESTRAZIONE E SEPARAZIONE DEI PIGMENTI

Materiale occorrente:

- *Mortaio, provette, contagocce, carta assorbente o gesso da lavagna, recipienti in pirex, fornellino elettrico (per esperienze con solventi organici non usare mai fornelli a fiamma);*
- *alcool etilico, acetone, benzene, acqua distillata;*
- *foglie rosse di Iresine o Coleus oppure le più esterne e scure del radicchio e del cavolo rosso, foglie verdi di Urtica o spinaci, alghe brune e rosse, radici di carota.*

La separazione dei pigmenti fotosintetici si basa sulla loro:

- *diversa velocità di migrazione su materiali assorbenti:*

10 g di foglie (*ortica, spinaci...*) sono pestate in mortaio con alcool etilico o acetone. Dopo aver messo l'estratto in una provetta ed averlo fatto sedimentare, la soluzione ottenuta, verde scuro, è depositata lentamente, goccia a goccia, su carta assorbente o su gesso da lavagna. Si potrà osservare la separazione dei carotenoidi dalle clorofille grazie alla maggiore velocità di migrazione dei primi che formeranno un alone giallo intorno alla macchia verde;

- *diversa solubilità in alcuni solventi organici:*

10 g di foglie verdi o di tallo di alghe brune sono pestate in mortaio in 5 ml di alcool etilico. La soluzione, messa in provetta, è fatta sedimentare, si elimina il precipitato e al sovranatante si aggiungono 5 ml di benzene e si agita. Si lasciano separare le due fasi che conterranno: la fase etanolica verde, superiore, le clorofille, la fase benzenica gialla, inferiore, i carotenoidi.

Per dimostrare che i **pigmenti fotosintetici non sono presenti solo negli organismi verdi, ma in tutti quelli che contengono cloroplasti**, sono utilizzate foglie di *ortica* a confronto con foglie di *Iresine*, o di *radicchio rosso* o altre piante con le foglie di colore rosso scuro.

Dieci grammi di foglie sono fatte bollire in acqua per 5 minuti; solo la pianta rossa libera nell'acqua un pigmento rosso, un antociano idrosolubile, contenuto nel vacuolo, che maschera il colore verde delle foglie che viene, in questo modo, messo in evidenza. Se l'acqua è sostituita da un solvente organico quale ad esempio l'alcool etilico, un'ebollizione di 5 minuti estrarrà dalle foglie, sia verdi che rosse, i pigmenti fotosintetici di colore verde scuro.

La fotosintesi

Durante la respirazione si verifica, abbiamo visto, la degradazione dei carboidrati ad anidride carbonica ed acqua, con conseguente liberazione dell'energia immagazzinata nei legami chimici. Solo gli organismi vegetali sono in grado di compiere il processo inverso, cioè sintetizzare carboidrati partendo da acqua e anidride carbonica. Per sintetizzare una sostanza complessa partendo da sostanze semplici è sempre necessaria dell'energia; nelle piante l'energia necessaria per questo lavoro è attinta direttamente dal sole mediante il processo detto fotosintesi, che rappresenta la via attraverso la quale l'energia entra nella biosfera. Senza questo continuo flusso di energia proveniente dal sole, energia che viene raccolta e trasformata dai cloroplasti delle cellule vegetali, la vita su questo pianeta diminuirebbe sino a cessare completamente e inesorabilmente. L'intensità luminosa ottimale, per l'attività fotosintetica, varia a seconda delle piante che consideriamo: esistono infatti *specie eliofile* (amanti del sole), *specie sciafile* (amanti dell'ombra) ed altre con caratteristiche intermedie. È molto importante conoscere queste necessità per poter coltivare in modo appropriato molte specie ornamentali e non. Sarebbe un grave errore collocare all'ombra una pianta eliofila come l'oleandro, oppure in pieno sole una felce.

La **fotosintesi** consta di due fasi delle quali una sola richiede l'intervento della luce, per cui sono state chiamate **fase luminosa** e **fase oscura**. Il primo passaggio della conversione dell'energia luminosa in energia chimica consiste nell'assorbimento di luce da parte di molecole di pigmenti, le clorofille e i carotenoidi: le prime, verdi, assorbono luce soprattutto blu e rossa e riflettono quella verde, mentre i carotenoidi, in genere rossaranciati o gialli, assorbono principalmente la luce blu-verde. Nelle foglie verdi il colore dei carotenoidi è mascherato dalle clorofille che sono presenti in quantità maggiore; in alcuni tessuti, invece, i carotenoidi predominano come, ad esempio, nei pomodori maturi o nella radice della carota. Sia i carotenoidi che le clorofille non sono solubili in acqua ma esclusivamente in solventi organici (*alcol etilico, acetone, benzolo, ecc.*).

Il pigmento fondamentale del processo fotosintetico è come abbiamo già visto, la clorofilla **a**, sulla cui molecola è convogliata tutta l'energia luminosa catturata dai pigmenti (clorofilla **b**, carotenoidi). L'energia convogliata sulle molecole di clorofilla **a** è sufficiente perché uno dei suoi elettroni sia spinto via, dando inizio alla serie di reazioni ossido-riduttive della fase luminosa. In queste condizioni si realizza anche la fotolisi dell'acqua, in idrogeno e ossigeno; l'idrogeno nella fase successiva (oscura) avrà una parte essenziale nella riduzione dell'anidride carbonica; l'ossigeno, non utilizzato nel processo fotosintetico, del quale rappresenta soltanto un prodotto secondario, può essere invece consumato nella respirazione della cellula, o può diffondere nell'atmosfera.

Durante la fase luminosa, si avrà una continua produzione di ATP e NADPH₂ nelle cui molecole è immagazzinata, sotto forma di legame, tutta l'energia luminosa assorbita dai pigmenti. Questa energia è utilizzata, poi, nella cosiddetta "fase oscura" durante la quale si verificano esclusivamente reazioni chimiche che organicano l'anidride carbonica in zuccheri rappresentati principalmente dal glucosio.

Questi zuccheri possono provvisoriamente essere accumulati nei cloroplasti come *amido primario*, prima o poi comunque, specialmente nelle ore notturne, essi vengono trasportati come linfa elaborata attraverso l'altro tessuto conduttore, specializzato (**floema o cribro**) in tutte le altre parti della pianta, principalmente nelle zone di crescita dove sono utilizzati o nelle radici e nel fusto dove si accumulano sotto forma di *amido secondario*. A questo punto occorre ricordare che i prodotti fotosintetici, il

glucosio in particolare, costituiscono il punto di partenza per la sintesi di tutte le molecole che costituiscono la materia vivente – *amido, cellulosa, grassi, proteine, vitamine, ormoni, acidi nucleici* – e rappresentano il combustibile grazie al cui consumo, durante la respirazione, le cellule di tutti gli organismi viventi si procurano l'energia necessaria per le funzioni vitali (figura 11).

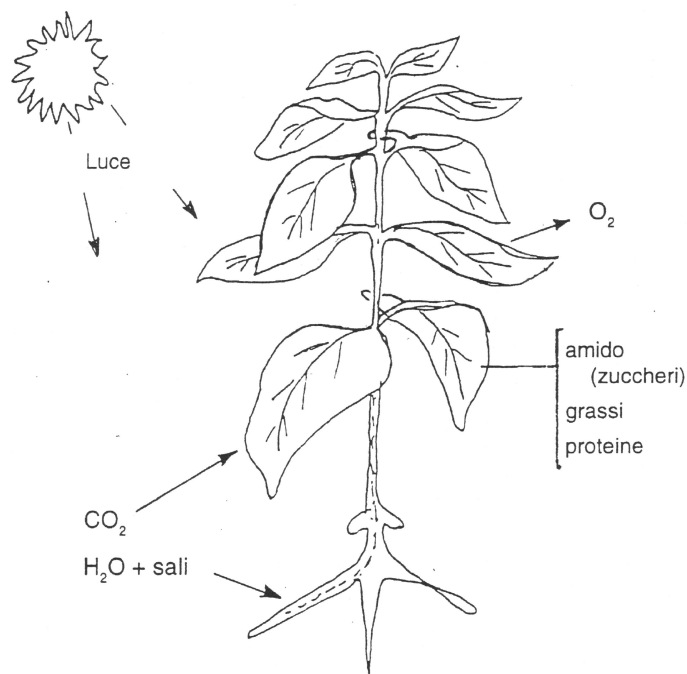


Fig. 11: Elementi utilizzati durante la fotosintesi e prodotti fotosintetici

Esperienza 15: PRODUZIONE DI OSSIGENO FOTOSINTETICO

Materiale occorrente:

- Grosso recipiente di vetro, imbuto di vetro, provetta, lampada;
- *Elodea* o altre piante acquatiche.

Per dimostrare lo **sviluppo di O_2 fotosintetico** si utilizza una pianta acquatica, l'*Elodea canadensis*, facilmente reperibile dove esistano acque stagnanti. L'esperienza consiste nel porre alcune piantine di *Elodea* sotto un imbuto di vetro, immerso in un recipiente pieno d'acqua, con il becco rivolto verso l'alto e ricoperto da una provetta che deve essere anch'essa completamente piena d'acqua come nella figura 12. Il recipiente (trasparente) viene esposto ad una forte illuminazione e dopo un certo periodo di tempo si può osservare che il livello dell'acqua nella provetta diminuisce spinto verso il basso da un gas prodotto dalla pianta. Se si toglie la

provetta e, molto velocemente, si inserisce un fiammifero appena spento, questo si accende di nuovo dimostrando che il gas prodotto dalla pianta è ossigeno.

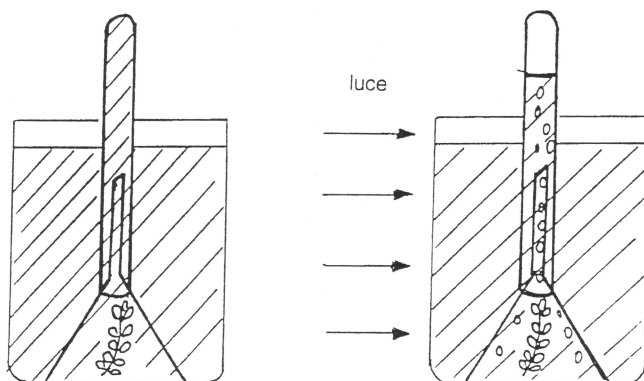


Fig. 12: Dimostrazione di sviluppo di O_2 durante il processo fotosintetico

Esperienza 16: PRODUZIONE DI AMIDO FOTOSINTETICO

Materiale occorrente:

- Vaschette di vetro, recipienti in pirex, fornello;
- acqua distillata, tintura di iodio, alcool etilico;
- plantule di mais verdi (allevate per 15 giorni alla luce) e eziolate (allevate per 10 giorni al buio);
- piante di geranio con alcune foglie tenute al buio per 2 giorni, avvolte in stagnola.

Uno dei prodotti della fotosintesi più facilmente evidenziabili è l'**amido**. Per tali ragioni la sua presenza nelle foglie è stata presa come indice dell'attività fotosintetica. Sia le foglie eziolate che le foglie verdi tenute al buio e alla luce, al momento della prova sono staccate dalla pianta, completamente decolorate in alcool bollente, tenute in acqua per 5 minuti e trattate con la soluzione iodio-iodurata (1.5 gr di KI e 1 g di I scolti in 100 ml di acqua) o con tintura di iodio diluita. La prova per l'amido risulta positiva solo per le foglie verdi tenute alla luce; questo dimostra che l'organizzazione dell'anidride carbonica in amido può avvenire solo in presenza di clorofilla (foglie verdi) e di luce (le foglie verdi tenute al buio per 2 giorni, avvolte in stagnola, non contengono più amido).

Produttività e biomassa

La fotosintesi fissa ogni anno sotto forma di composti del carbonio circa 3×10^{21} J di **energia solare** che può venire considerata come **energia immagazzinata**. Si può osservare che, non più di 70 anni fa, i composti del carbonio prodotti annualmente dalla

fotosintesi venivano usati per ottenere combustibili, fibre, cibo e derivati chimici, mentre oggi vengono usati solo o quasi per produrre cibo in quanto, sia i combustibili, sia gran parte del materiale utilizzato nell'industria chimica, derivano dall'utilizzazione di **giacimenti fossili** di materiale biologico (*carbone, petrolio, metano*) che viene trasformato in un'infinità di prodotti. Per risolvere gli attuali problemi dell'uomo dell'era del petrolio occorrerà sviluppare tecnologie efficienti per utilizzare i processi fotosintetici attuali e ridurre la richiesta di prodotti fossili. Sono attualmente in studio *tecnologie solari-biologiche* che permetteranno di migliorare l'impiego dell'energia solare in modo da ridurre il consumo di combustibili convenzionali, e l'inquinamento dell'ambiente mediante la riutilizzazione dei rifiuti e di produrre con nuovi processi proteine, materie prime per l'industria chimica e combustibili.

Molti dei rifiuti organici liquidi o semisolidi di provenienza domestica, agricola o industriale costituiscono un possibile terreno di coltura per la crescita di alghe che possono essere utilizzate come cibo per animali, come combustibile (se bruciate secche) oppure essere sottoposte a fermentazione per la produzione di metano e/o fertilizzanti. Questa *trasformazione dell'energia solare fissata dalle alghe* e delle sostanze contenute nei liquami, nell'energia chimica del metano, è potenzialmente uno dei sistemi biologici più rapidi ed efficienti che si traduce anche in un processo di depurazione delle acque reflue. In alternativa alle alghe nei paesi a clima caldo si può coltivare il giacinto d'acqua *Eichhornia crassipes* che ha l'effetto di rimuovere dall'acqua sia composti nutritivi organici che metalli pesanti. Un ettaro di coltura a giacinto d'acqua può fornire circa 80.000 m³ di metano all'anno oltre ad un ottimo fertilizzante.

Un altro esempio di produzione energetica da materiale vegetale è la trasformazione della cellulosa, uno dei prodotti vegetali tra i più abbondanti, in glucosio e poi in alcool mediante fermentazione, che può essere utilizzato in svariati processi sia come carburante che nell'industria chimica. Il limite attuale di questa trasformazione è legato ai costi della macinazione del legno che però si stanno progressivamente riducendo.

La conoscenza del processo fotosintetico riveste di conseguenza una notevole importanza perché la produzione di energia disponibile in grande quantità è basata soprattutto sull'uso dell'energia solare accumulata a lungo o a lunghissimo termine come energia chimica nei vari combustibili (legno, carbone, petrolio). È dunque soprattutto l'azione combinata del sole e dei processi biologici di conversione che fissano energia sotto forma di legami chimici all'interno della materia organica, che ci fornisce sia di combustibile che di cibo. L'entità di produzione di sostanze organiche vegetali dipende in gran parte dall'efficienza di trasformazione, nel processo fotosintetico, dell'energia solare in energia chimica.

La frazione di energia solare che viene convertita in energia chimica in questo processo è molto bassa e non supera l'1-3% dell'energia fotosinteticamente attiva irradiata anche se, teoricamente, in laboratorio, questa frazione potrebbe arrivare all'8-10%.

La produzione di sostanza organica nell'unità di tempo e di superficie è indicata come produttività primaria. Questa dipende dall'energia irradiata, dalla superficie di assimilazione (superficie foliare), dalla velocità di assimilazione netta e dalla disponibilità di CO₂, O₂, H₂O e sali minerali. La velocità di assimilazione netta è a sua volta influenzata dalla durata del periodo vegetativo e dalle temperature, per cui la produttività primaria è molto variabile nelle diverse regioni e per le diverse colture.

Animali e piante di uno stesso ambiente, quali ad es. uno stagno, un bosco, un deserto, sono legati da rapporti di interdipendenza e formano una comunità biologica

che, insieme all'ambiente in cui vivono, costituisce un ecosistema. Gli appartenenti ad una comunità si possono distinguere in tre gruppi: **Produttori**, **Consumatori**, **Decompositori**.

Le *piante*, essendo *organismi autotrofi*, costituiscono la grande categoria dei **Produttori** in quanto sono in grado di fabbricare sostanze organiche utilizzando, grazie all'energia luminosa, sostanze inorganiche quali CO_2 , H_2O e sali minerali (soprattutto composti di N, P, Ca ecc). Queste sostanze organiche vengono utilizzate come cibo dagli animali erbivori (**consumatori di 1° ordine**) i quali a loro volta costituiscono il nutrimento degli animali carnivori (**consumatori di 2° ordine**).

Questa serie di organismi produttori e consumatori in cui ogni componente della serie mangia quello che lo precede e viene mangiato da quello che lo segue costituisce una **catena alimentare** il cui inizio è rappresentato sempre da **organismi vegetali**. Ogni comunità comprende numerose catene alimentari che possono avere anelli in comune formando nel complesso una **rete alimentare**

radici $\Rightarrow$ *larve di insetti* $\Rightarrow$ *uccelli (insettivori)* $\Rightarrow$ *falchi*

erba $\Rightarrow$ *pecora* $\Rightarrow$ *lupo*

erba $\Rightarrow$ *conigli* $\Rightarrow$ *falchi*

Per conoscere l'importanza quantitativa dei vari componenti di una catena occorre definire la **biomassa** cioè la massa totale degli organismi che appartengono ad un determinato anello. Si evidenzia così che la biomassa totale dei produttori di una comunità è sempre maggiore di quella dei consumatori di 1° ordine e questa è sempre maggiore di quella dei consumatori di 2° ordine e così via. Rappresentando in un disegno le grandezze relative delle varie categorie si ottiene una **Piramide alimentare** (figura 13).

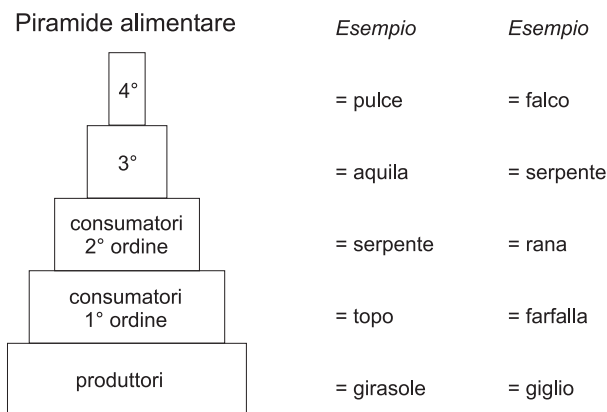


Fig. 13: Esempi di piramide alimentare

Infatti la maggior parte dell'energia immagazzinata nelle biomasse di ogni gradino della piramide alimentare *non viene messa a disposizione della comunità e viene perduta, solo una piccola parte è convertita in sostanza vivente a vantaggio del gradino successivo.*

Un altro gruppo di organismi della massima importanza in un ecosistema, è quello dei **decompositori** (*batteri o funghi*) che decompone gli avanzi di tutti gli altri membri della comunità (foglie morte, escrementi, rifiuti, cadaveri). Tutti questi residui vengono trasformati in H_2O e CO_2 e sali minerali che vengono restituiti all'ambiente per essere nuovamente utilizzati dalle piante verdi (figura 14).

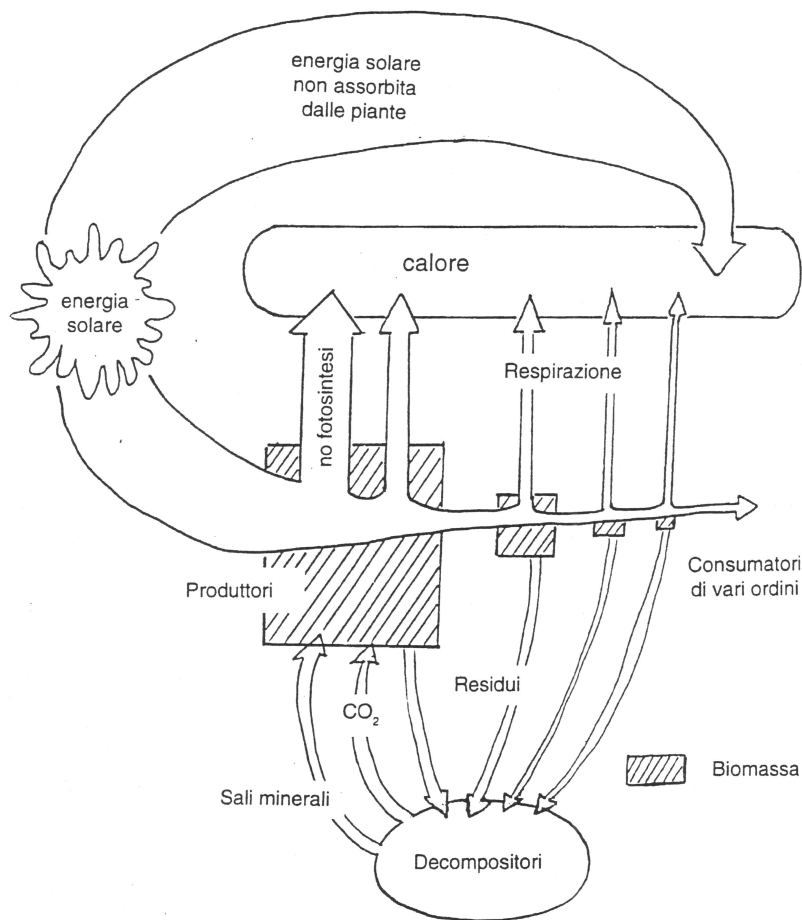


Fig. 14: Scambi di energia e materia in un ecosistema

Se ad esempio seguiamo il viaggio di un atomo di azoto, possiamo immaginare che esso dal terreno venga assunto sotto forma di nitrato dalle radici di una quercia e poi immagazzinato come proteina di riserva nei cotiledoni di una ghianda che può essere

mangiata da un animale del bosco, (cinghiale, scoiattolo, ghiandaia) e poi da questo eliminato con gli escrementi che, decomposti dai batteri e dai miceli del terreno lo ritrasformano più o meno velocemente in sale di azoto pronto per riiniziare un nuovo viaggio ed essere assunto ad esempio dalle radici di una rosa di macchia.

Come l'azoto tutti gli elementi chimici che vengono utilizzati per la costruzione delle sostanze viventi (ossigeno, carbonio, idrogeno, fosforo, zolfo) circolano continuamente tra un organismo e l'altro e tra gli organismi e la parte non vivente di una comunità; questa continua circolazione si compie a tappe e può venire descritta attraverso i vari cicli del C, dell'O₂, dell'N ecc.



Il tema di questa lezione è l'energia, e perciò il centro del discorso sarà di carattere fisico. Il corso nel suo insieme si propone di trattare l'energia anche in rapporto ai cicli vitali delle piante; il mio scopo è quello di fare un'introduzione al corso, che dia una certa sistemazione logica alle idee fisiche di base.

Dovendo parlare di energia, ci si potrebbe aspettare che io cominci con la definizione di energia; ma questa è una cosa che eviterò, perché non saprei come darla. Molti concetti fisici sono difficili da definire in partenza in maniera accurata; sicuramente l'energia è tra i più difficili. Se qualcuno insistesse a chiedermi: "insomma, che cosa è l'energia?" forse la sola risposta che saprei dare a questo punto è una che non considerereste una definizione: direi che la cosa più importante che si può dire sull'energia è che si conserva.

La parte iniziale del mio discorso cercherà di precisare che cosa vuol dire, dal punto di vista di un fisico, qualcosa che si conserva. Se l'energia fosse l'unica, potrei dire: "l'energia è quella cosa che, come tutti sappiamo, si conserva"; ma in fisica ci sono altre cose che si conservano. Questo però ci aiuta, perché permette di costruire il discorso partendo da esempi più semplici e anche più direttamente accessibili dal punto di vista della vostra didattica.

Significato di una legge di conservazione

L'esempio più ovvio di cosa che si conserva è il *numero*. Voglio però precisare subito che qui non stiamo facendo matematica, ma fisica: quindi io mi riferisco a fatti ed esperimenti del mondo reale. Perciò quando dico che il numero si conserva, intendo dire che se prendo un certo numero di oggetti discreti e distinti – per es. 4 pezzi di gesso – il fatto che sono 4 rimane anche se li sposto di qua e di là: a meno che non se ne rompa qualcuno, continuano ad essere 4. Potrò contare questi gessi ripetutamente, e troverò sempre 4.

La cosa può sembrare banale, ma non lo è tanto che non valga la pena di essere considerata e fatta oggetto di riflessione didattica. Finché mi limito a 4 pezzetti di gesso, tutto è semplice; ma se si prende in considerazione un insieme un po' più numeroso (ad es. i fagioli del famoso barattolo che si vede alla TV) contare può diventare una faccenda complicata, ed è difficile arrivare in fondo senza sbagliare: allora la conservazione del numero non è più così evidente.

Comunque la ragione per cui ho scelto di partire dalla conservazione del numero è che questa mi rende facile introdurre un discorso che diventerà più importante nel

^[1] Lezione tenuta il 29-11-84 e pubblicata in "La macchina albero" a cura del Seminario Didattico della Facoltà di Scienze m.f.n. dell'Università di Pisa, A.A.1984-85; gli autori ringraziano il prof. Fabri per averne autorizzata la riproduzione.

seguito. La conservazione del numero significa che il numero degli oggetti non cambia; ma significa anche che se cambia – se per es. il numero dei fagioli nel barattolo non resta lo stesso – ciò vuol dire che ne sono stati tolti o aggiunti.

Questo può venir espresso in maniera precisa: la conservazione di una quantità si connette immediatamente a quello che si chiama *bilancio*. Se contate i vostri fagioli a un certo momento, e li ricontate più tardi, il secondo numero può differire dal primo soltanto per due motivi: perché ne sono stati aggiunti, quindi sono *entrati* nel barattolo, oppure perché ne sono stati tolti, cioè ne sono *usciti*. La cosa si riassume così:

$$N_{\text{dopo}} = N_{\text{prima}} + N_{\text{entrati}} - N_{\text{usciti}}$$

Questa è una prima forma di bilancio estremamente semplice, che esprime una proprietà di conservazione. Generalmente i fisici preferiscono scriverla in quest'altro modo:

$$\Delta N \stackrel{\text{Df}}{=} \text{variaz. di } N = N_{\text{dopo}} - N_{\text{prima}} = N_{\text{entr.}} - N_{\text{usc.}}$$

ΔN è un simbolo che sta a indicare la variazione che è avvenuta nella grandezza; il segno uguale con “Df” sopra indica che quella è un’uguaglianza *per definizione*. L’intera formula ci dice che il numero di fagioli dopo, meno il numero di fagioli prima – cioè la variazione – è uguale al numero di quelli che sono entrati meno il numero di quelli usciti.

Passiamo ora a un esempio di conservazione meno evidente: la conservazione del volume di un liquido. Credo che tutti abbiate sentito parlare degli studi di Piaget, dai quali risulta che l’idea che il volume di un liquido si conserva nel travaso è tutt’altro che innata: un bambino l’acquisisce a una certa età, o meglio a un certo stadio del suo sviluppo intellettuale. Aggiungo che tale acquisizione inevitabilmente avviene in base alle esperienze che il bambino fa: perciò non si deve parlare di stadi di sviluppo in senso rigido e acritico. Il grado di sviluppo intellettuale, l’età alla quale un bambino conquista certi concetti, dipendono dall’ambiente e dalle esperienze che il bambino fa. Tutti i bambini fanno normalmente, senza che nessuno glielo suggerisca, esperimenti con i liquidi (del resto i bambini fanno esperimenti su tutto): a un certo punto questi esperimenti si coagulano – per così dire – nell’acquisizione di un concetto. Ma naturalmente la rapidità con cui un tale processo avviene dipende dalla quantità e qualità degli stimoli che arrivano dall’ambiente familiare e sociale del bambino.

Il volume di un liquido è dunque un’altra grandezza che si conserva: tanto è vero che i liquidi si comprano misurati in volume, si versano da un recipiente all’altro senza preoccupazioni, ecc. È inutile dilungarci: per il volume di un liquido si può scrivere lo stesso tipo di bilancio che abbiamo visto per il numero.

Un’idea che si avvicina molto di più al nostro tema, e sulla quale mi soffermerò più a lungo, è la conservazione della massa. Anche la conservazione della massa è in una certa misura esperienza comune; tuttavia l’idea di massa è già molto meno intuitiva che non l’idea di volume. Sapete benissimo che non è facile per un bambino accettare l’idea che oggetti che hanno volumi uguali possono avere masse diverse; oppure che oggetti con la stessa massa possono avere volumi diversi. Massa e volume non sono la stessa cosa, non vanno sempre insieme.

Per questo motivo non è didatticamente opportuno usare la conservazione del volume per arrivare alla conservazione della massa (per esempio deformando una pallina di pongo). La conservazione del volume ha validità più ristretta: è circoscritta ai liquidi o

in generale ai casi in cui non c'è compressione o dilatazione apprezzabile. Ci sono invece casi in cui la massa si conserva e il volume no: per es. nell'evaporazione dell'acqua di una bacinella, l'acqua che non c'è più si ritrova come vapore nell'aria, e il volume del vapore è molto maggiore di quello del liquido originario. Spesso il volume non si conserva nelle soluzioni: quando si mescolano due liquidi può capitare che il volume della miscelanza non sia la somma di quelli dei due liquidi di partenza, mentre la massa si somma sempre. Questo succede per es. con acqua e alcool, ma anche più evidente è il caso del sale sciolto nell'acqua: in un litro d'acqua si può sciogliere molto sale (almeno 300 g) e il livello dell'acqua non sale quanto dovrebbe, perché il cloruro di sodio (più esattamente gli ioni cloro e sodio) trovano posto negli interstizi tra le molecole dell'acqua. Ripeto: a differenza di quella del volume, la conservazione della massa è un principio fisico assolutamente generale. Scriveremo dunque per la massa una relazione dello stesso tipo di quella scritta per il numero:

$$\Delta M \stackrel{\text{Df}}{=} \text{variaz. di } M = M_{\text{dopo}} - M_{\text{prima}} = M_{\text{entr.}} - M_{\text{usc.}}$$

La variazione di massa durante un certo intervallo di tempo, in cui avviene un qualunque fenomeno, può dipendere solo dal fatto che nel sistema è entrata o uscita della materia.

Ho già detto che la massa è un concetto un po' meno immediato e intuitivo del volume: bisogna quindi fare un po' più di attenzione quando si usa la conservazione della massa. A questo scopo vediamo un esempio, che ho scelto anche perché permette qualche riflessione legata al tema generale del corso, a proposito dello sviluppo delle piante. Anche qui si tratta di cose apparentemente banali, ma che non lo sono forse del tutto quando si cerca di metterle insieme in maniera ordinata.

Consideriamo lo sviluppo di una pianta, dal seme alla pianta adulta, e per fissare le idee prendiamo il caso di una ghianda. Dalla ghianda viene fuori una quercia, che è un albero bello grosso; applichiamo a questo fenomeno il bilancio della massa. Che cosa vuol dire? come ragiona il fisico in questo caso? C'è una M_{prima} , che è quella della ghianda; e c'è una M_{dopo} , che è quella della quercia. Ovviamente la massa dopo è maggiore di quella prima, e abbiamo perciò una variazione di massa, una ΔM , positiva. Nell'equazione che esprime il bilancio c'è scritto che ΔM dev'essere uguale alla massa entrata meno la massa uscita: dobbiamo dunque cercare la massa entrata e quella uscita.

Da dove prende massa una pianta che cresce? Le fonti di entrata sono essenzialmente due: l'aria e il terreno. Semplificando molto, possiamo dire che dal terreno una pianta prende soprattutto acqua. (Questo non è del tutto vero: nessuna pianta potrebbe crescere se dal terreno prendesse solo acqua; tuttavia in termini di massa l'acqua è la parte preponderante). Dall'aria la pianta prende essenzialmente anidride carbonica. Qui non ha importanza come questa anidride carbonica viene utilizzata (la chimica della fotosintesi): stiamo facendo solo un bilancio quantitativo della massa. Il nostro discorso è semplicemente: quella piccola ghianda è diventata una quercia, un oggetto bello massiccio, che può pesare qualche tonnellata; questa materia è venuta in parte dal terreno (acqua) e in parte dall'aria (anidride carbonica).

Occupiamoci ora della massa uscita. Una pianta perde acqua a causa della traspirazione delle foglie; emette ossigeno nel processo di fotosintesi. Inoltre durante la vita di una pianta le foglie cadono: quindi la pianta perde la massa delle foglie cadute... Forse ci sarà ancora qualche altra perdita, che non mi è venuta in mente; ma quelle che abbiamo visto sono già abbastanza significative.

Torniamo allora all'equazione: dal momento che la pianta è cresciuta, la massa entrata deve superare di un bel po' quella uscita. Questo esempio è interessante per il seguente motivo: mentre la caduta delle foglie e l'acqua che esce si vedono facilmente, il contributo importante che viene alla massa dall'anidride carbonica non è per niente ovvio. Ma su questo tornerò un po' più avanti.

Restando sempre in tema di conservazione, ci sono anche altre cose che si conservano, e di cui ora vorrei parlare. In realtà si tratta più di chimica che di fisica, ma d'altra parte la distinzione non è poi così netta. Oltre a esserci la conservazione della massa nel suo insieme, cioè di tutta la materia che partecipa al processo, c'è anche la conservazione dei singoli elementi chimici. Per fare un solo esempio, in una pianta c'è del carbonio: allora voi potete applicare alla quantità di carbonio presente nella pianta il ragionamento di prima, e cioè: la differenza tra la massa di carbonio alla fine e quella al principio dev'essere uguale alla massa del carbonio entrato meno quella del carbonio uscito.

A questo punto debbo usare un dato che ho stimato a occhio, e di cui chiedo conferma ai botanici: è vero che in una pianta il 20% in peso è carbonio? (Osservate comunque che anche se fosse il 10% sarebbe sempre una bella quantità!) Ovviamente nella quercia c'è molto più carbonio che nella ghianda: la differenza da dove è venuta? Se ricordate quello che ho detto prima, sappiamo già che la fonte essenziale è l'aria; forse un po' ne viene anche dal terreno, ma in quantità trascurabile. Notate che nell'aria di anidride carbonica ce n'è pochina; però quel poco è essenziale a spiegare il carbonio contenuto nella pianta.

Ma supponiamo di non saperlo: come potremmo arrivarci? Siccome credo nella conservazione degli elementi chimici, per cominciare dico che questo carbonio da qualche parte dev'essere venuto, e vado in cerca della sua origine. Poiché una pianta può crescere anche con le radici nell'acqua, dove di carbonio non ce n'è, faccio l'ipotesi che sia venuto dall'aria. Però uno scienziato non si può accontentare di un'affermazione pura e semplice: ha bisogno di una prova sperimentale. La ricerca di questa prova non fa parte del nostro argomento, ma è bene ricordare che a questo punto bisognerebbe dimostrare che effettivamente il carbonio viene dall'aria.

Se ora potessi allargare il mio discorso ad altri argomenti di fisica, potrei mostrarvi moltissime applicazioni di questo stesso ragionamento. Una volta stabilita una legge di conservazione in fisica, prima o poi si scopre sempre qualche fenomeno nuovo che sembra violare questa conservazione. Può capitare che non si conservi la massa, o magari il numero barionico (un concetto più sofisticato, di cui non vi parlerò); i particolari non hanno importanza, l'idea è sempre la stessa: c'è un nuovo fenomeno che sembra contraddire una legge di conservazione in cui si credeva. Darò qui due esempi che sono alla portata della vostra didattica: in una pozzanghera c'è dell'acqua, ci tornate il giorno dopo e non c'è più. Allora l'acqua non si conserva? Noi sappiamo che è evaporata, però bisogna dimostrarlo. Oppure: ho colto dei funghi e li ho messi a seccare; se li avevo pesati prima e li ripeso dopo, trovo che non c'è rimasto quasi niente. Dov'è andata a finire la massa che manca? Anche qui si tratta di acqua che è evaporata; ma un conto è dirlo, e un conto è darne la prova.

Qual è l'atteggiamento generale del fisico in un caso del genere? Fa un'ipotesi: per es. che la massa se ne sia andata in evaporazione; ma dopo aver fatto l'ipotesi non ha pace finché non ha trovato il modo di verificarla con un esperimento. In altre parole: non dovete credere che avendo detto che la massa si conserva siamo a posto per sempre:

prima o poi ci sarà qualche esperimento che sembrerà rimettere tutto in discussione. Allora si dovrà fare un'ipotesi per spiegare il nuovo fatto, ma si dovrà anche cercarne una conferma sperimentale: solo così si potrà dire che le cose sono tornate a posto.

A questo punto ho esaurito la premessa, e possiamo cominciare a parlare di energia.

L'energia: forme e trasformazioni

Avevo detto all'inizio che l'energia è una cosa che si conserva; ora posso dire meglio: l'energia è *un'altra* delle cose che si conservano, in aggiunta a quelle di cui abbiamo già parlato. Però l'energia non si vede e non si tocca, e questo naturalmente crea un problema ancora più grave: mentre la massa si manifesta in cose tangibili, che si possono pesare, ciò non accade per l'energia. È questa la ragione per cui nella storia della scienza l'idea dell'energia e della sua conservazione è relativamente recente: esiste da poco più di un secolo, dalla metà dell'ottocento. Si tratta di un concetto più astratto; e se è stato difficile per i grandi scienziati, lo è anche per tutti i giovani ai quali cerchiamo d'insegnarlo; la sua acquisizione è un processo meno immediato e intuitivo di quanto non sia per il volume o anche per la massa.

Un fatto caratteristico è che non si vede l'energia come tale, l'energia delle cose che stanno intorno a noi. Quello che si vede è l'*effetto* dell'energia nelle *trasformazioni*. In un qualunque fenomeno chimico, fisico, biologico... o come lo si voglia chiamare (a volte è difficile decidere come classificare un fenomeno), insomma in qualunque cosa accada in natura o in laboratorio, c'è sempre in ballo una trasformazione di energia. Quella che si nota non è l'energia che se ne sta in un certo corpo, bensì quella che un corpo scambia interagendo con un altro. E del resto è proprio così che si è arrivati all'idea di conservazione: osservando che quando due corpi interagivano, sebbene avvenissero delle trasformazioni, pure si riusciva a trovare un qualche cosa che rimaneva costante, che si conservava, nello stesso senso del "bilancio" che abbiamo discusso prima per la massa.

Dicendo questo ho implicitamente introdotto un fatto molto importante: l'*energia ha varie forme*. Non intendo farne un elenco, e nemmeno dare definizioni: preferisco mostrare degli esempi, da cui si veda come si arriva all'idea delle diverse forme di energia.

Un esempio che mi pare istruttivo è quello dell'orologio: tutti adoperiamo orologi, e ce ne sono di tante specie, che funzionano con meccanismi diversi. Possiamo raggrupparli in quattro classi, a seconda della sorgente di energia: orologi a molla, a peso, a pila, a cella solare.

Gli orologi a molla ormai sono quasi scomparsi; però la sveglia di casa (quella che mia moglie carica tutte le sere) è un orologio a molla. Gli orologi a peso sono i vecchi classici orologi a pendolo, con il peso attaccato a una catenella, che ogni tanto dev'essere tirato su. Gli orologi a pila sono comunissimi, e tutti sappiamo che quando non vanno più bisogna cambiare la pila. Infine alcuni orologi più sofisticati, quelli che si ricaricano da sé, sono a cella solare: hanno una piccola superficie sensibile alla luce.

Che cosa c'è in comune tra questi quattro oggetti (oltre al fatto di essere orologi)? Tutti e quattro per funzionare hanno bisogno di energia. I loro meccanismi possono essere diversi oppure no; per noi la sola differenza importante è che utilizzano *forme di energia diverse*, cioè attingono energia a quattro fonti diverse.

L'orologio a molla utilizza l'*energia elastica* della molla. L'orologio a peso utilizza l'energia che possiede un peso quando lo si solleva nel campo della gravità, e perciò la chiameremo *energia gravitazionale*. L'energia della pila, che verrebbe fatto di chiamare

energia elettrica, è invece *energia chimica*, perché proviene da una reazione chimica. È vero che una pila produce una corrente elettrica, con tutti gli effetti che ne conseguono; ma alla fine dei conti la pila fornisce all'orologio un'energia che è stata perduta dai composti chimici al suo interno. La cella solare usa *energia elettromagnetica*: infatti la luce che essa assorbe è una forma di onde elettromagnetiche, sia che provenga dal Sole o da una lampada.

Mi è servito l'esempio dell'orologio per mostrare come si può far funzionare uno stesso oggetto attingendo energia a fonti diverse, il che vuol dire che in un certo senso queste forme di energia sono equivalenti: una può fare le veci dell'altra. Naturalmente per raggiungere questo scopo bisogna saper fabbricare l'oggetto nel modo giusto, in modo che sia capace di utilizzare la forma di energia voluta; ma il fatto importante è che da questo punto di vista una forma di energia non è meglio di un'altra: tutte possono svolgere ugualmente bene la funzione di far camminare l'orologio.

Possiamo rivedere quest'idea dell'equivalenza delle diverse forme di energia esaminando il quadro qui sotto.

Per riscaldare dell'acqua si può usare:	
CARBONE	
GAS	
PETROLIO	
ELETTRICITÀ	
SOLE	
ATTRITO	
REAZIONI CHIMICHE	
REAZIONI NUCLEARI	

Come vedete, a destra ho messo dei puntini, perché vorrei sapere da voi cosa mettere al loro posto. Ho elencato diversi modi di scaldare dell'acqua: alcuni sono del tutto naturali, ovvi; altri forse li dovrò spiegare perché non sono altrettanto evidenti. Non devo certo spiegare cosa vuol dire scaldare l'acqua col carbone, con il gas, con il petrolio o l'elettricità; neanche con il sole, anche se non è molto comune.

Passiamo all'attrito: di solito non si ricorre all'attrito per scaldare l'acqua per la pastasciutta; però è noto a tutti che con l'attrito si possono riscaldare gli oggetti. Tutti sanno che uno può bruciare i freni della macchina se continua a frenare troppo a lungo in discesa; quindi se potesse buttare dell'acqua fredda sui tamburi dei freni, li raffredderebbe e riscalderebbe l'acqua.

Reazioni chimiche: ci sono numerosi esempi di reazioni tra sostanze in soluzione nell'acqua, il cui risultato – oltre alla reazione chimica che si voleva – è anche che l'acqua si scalda.

Reazioni nucleari: l'espressione può fare un po' effetto, ma vuol dire una cosa molto semplice: anche le reazioni nucleari producono calore. Del resto, che uno dei grossi problemi dei reattori nucleari sia quello di smaltire il calore che non viene utilizzato per produrre energia elettrica, è cosa di cui si discute molto di questi tempi, ogni volta che si progetta una nuova centrale nucleare: è il problema detto dell'"inquinamento termico".

È per questa ragione che i reattori nucleari vengono costruiti vicino ai fiumi: l'acqua del fiume viene utilizzata per raffreddare gli impianti del reattore e quando esce è un po' più calda di quando entra; poiché viene reimmessa nel fiume, a volte ne nascono dei problemi ecologici, soprattutto per gli animali che vivono nel fiume. Dunque anche un reattore nucleare scalda l'acqua, sebbene questo non sia un modo molto "domestico" di raggiungere lo scopo.

Quello che ora vi chiedo è: quali forme di energia si utilizzano nei vari casi? Guardate che per la maggior parte la risposta è la stessa; solo qualcuno richiede una risposta diversa.

La risposta giusta non è mai "energia termica". È vero che in tutti i casi si produce calore, ma per sapere quale forma di energia si è usata bisogna andare a vedere la sorgente. Nel caso del carbone, del petrolio e del gas si tratta di energia chimica. In tutti questi casi avviene una reazione chimica (una combustione): il carbonio si combina con l'ossigeno dell'aria e dà luogo ad anidride carbonica; l'idrogeno presente nel gas e nel petrolio si combina anch'esso con l'ossigeno per formare acqua. Dato che le molecole finali hanno meno energia di quelle iniziali, la differenza viene resa disponibile per scaldare l'acqua.

Nel caso dell'elettricità la cosa è diversa, e dipende soprattutto dall'origine di questa energia elettrica. Naturalmente l'energia viene da una centrale elettrica, ma la centrale può essere idroelettrica, a gasolio, nucleare: quindi non si può dire la forma di energia utilizzata se non si sa in quale centrale l'elettricità è stata prodotta.

Nel caso del Sole si può dire che si tratta di energia elettromagnetica: è la stessa cosa dell'orologio a cella solare di cui abbiamo parlato prima. Si potrebbe però fare un'altra osservazione: quale processo succede nel Sole, il cui risultato è l'emissione di quell'energia? Nel Sole avvengono reazioni nucleari (essenzialmente trasformazioni di quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio): quindi l'energia dal Sole può essere vista come energia nucleare.

Passiamo all'attrito: potremmo dire energia meccanica, ma possiamo precisare. Per esserci l'attrito ci dev'essere qualcosa che si muove: l'attrito ha come effetto di fermare un oggetto in moto. Dunque abbiamo a che fare con una forma più specifica di energia meccanica: l'energia cinetica.

Possiamo perciò riempire il nostro quadro come segue:

Per riscaldare dell'acqua si può usare:	
CARBONE	Chimica
GAS	Chimica
PETROLIO	Chimica
ELETTRICITÀ	<i>dipende dalla centrale</i>
SOLE	Nucleare
ATTRITO	Cinetica
REAZIONI CHIMICHE	Chimica
REAZIONI NUCLEARI	Nucleare

Gli esempi che abbiamo visto ci hanno mostrato come varie forme di energia possono

produrre lo stesso effetto, e quindi in questo senso si equivalgono. Possiamo riassumere e generalizzare così : tutte le forme di energia sono convertibili. Non posso ora entrare nel merito di questa affermazione per criticarla, ma forse avete già un'idea del fatto che bisognerebbe prenderla con qualche cautela: la convertibilità non è sempre incondizionata, e soprattutto non è reversibile.

Per noi è più utile però un'altra osservazione: la convertibilità è anche quantitativa, nel senso che quello che si fa con una certa quantità di carbone si può fare con una certa quantità di petrolio, e tra le due quantità c'è un rapporto fisso. Se parliamo in termini quantitativi è necessario avere delle unità di misura, e la convertibilità ci permette di usare la stessa unità: non c'è bisogno di un'unità di misura per l'energia chimica, di una per l'energia elettromagnetica, ecc. L'unità può essere la stessa perché si riferisce a una stessa cosa – l'energia – che si può convertire da una forma all'altra.

Per l'energia esistono moltissime unità di misura: potrei fare una lista sterminata, mentre ho appena detto che si può misurare qualunque energia con la stessa unità. Perciò, anche per evitare la “babele” che ne seguirebbe, ve ne citerò soltanto tre, che troveranno applicazione nel seguito: il joule (J), la grande caloria (kcal) e il chilowattora (kWh). Ho scelto queste tre perché sono quelle più significative: sia nella vita pratica, sia nelle applicazioni all'ambito fisico-chimico- biologico. Come al solito, non mi metterò a dare definizioni: darò solo i fattori di conversione, perché parlando di unità diverse bisogna sapere quanto vale ciascuna in funzione dell'altra.

La grande caloria è pari a 4184 J; in cifra tonda 4000 J, perché non avremo bisogno di fare calcoli molto precisi. Il chilowattora è un'unità che tutti conosciamo dalle bollette dell'Enel, e vale invece 3.6×10^6 J, ossia 3 600 000 J.

Apriamo una parentesi sulla notazione che ho usata, e che si chiama notazione esponenziale o scientifica. Non so quanto vi sia familiare: è abbastanza comune anche nei calcolatorini, dove si trova in questa forma: 3.6E6. A prima vista può sembrare una notazione un po' bizantina, ma è utile quando si ha a che fare con numeri molto grandi o molto piccoli, per non dover scrivere lunghe sfilze di zeri; inoltre, questa notazione semplifica le operazioni di moltiplicazione e divisione. Ho preparato qualche esempio per mostrarvi perché i fisici hanno simpatia per la notazione esponenziale.

Primo esempio: 3.5×10^6 è più comodo di tre milioni e mezzo; se dovete fare una moltiplicazione come

$$(3.5 \times 10^6) \times (4 \times 10^3) = 14 \times 10^9$$

provate invece a scrivere

$$3\,500\,000 \times 4\,000 = 14\,000\,000\,000 :$$

è chiaro che è molto più pratico lavorare con le potenze di 10. Intanto si debbono scrivere meno zeri; poi il calcolo si fa moltiplicando 3.5 per 4, che dà 14, e moltiplicando 10^6 per 10^3 che dà 10^9 (regoletta del prodotto di potenze di ugual base). Vedete che si fa molto prima.

Ma c'è anche un'altra ragione: ai fisici capita di dover esprimere grandezze un po' insolite, come per es. l'energia totale che si prevede che il Sole potrà

emettere prima di esaurire la sua sorgente interna di energia. Questa energia è dell'ordine di 10^{45} J: provate un po' a scriverlo alla maniera solita...

1 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000.

Prendiamo un altro esempio: l'energia che si ottiene dall'ossidazione di una molecola di glucosio (potrebbe servire a un biochimico): questa è di circa

$$5 \times 10^{-18} \text{ J} = 0.000\,000\,000\,000\,000\,005 \text{ joule,}$$

e vi mostra l'utilità degli esponenti negativi. Per quanto si possa non avere simpatia per l'uso degli esponenti, mi sembra che a questo punto non ci siano alternative.

Abbiamo visto i fattori di conversione fra le nostre unità; ora resta da vedere il significato di almeno una di queste. Occupiamoci del joule, che evidentemente è un'unità piccola rispetto alle altre. La sua definizione risulta implicitamente dal seguente problema (un problema che troverete un po' strano, perché non è del tipo cui siete abituati):

Un uomo di 70 kg fa una passeggiata in montagna, e sale per 600 metri. Basterà un piatto di pastasciutta per restituirgli l'energia consumata?

Analizziamo un po' questo problema: dicendo "un uomo di 70 kg" ho usato volutamente l'espressione del linguaggio comune; a rigore avrei dovuto dire "un uomo di massa uguale a 70 kg". Tra parentesi, visto che mi capita l'occasione, vi faccio notare che ho scritto "un uomo di 70 kg" e non "di kg 70", e così pure "600 m" e non "m 600". Dico questo perché credo che nella scuola elementare stia la sorgente di un'abitudine che va contro il buon senso e contro la regola scientifica. Le unità di misura vanno scritte *dopo* il numero: esiste al riguardo una precisa convenzione internazionale, ma del resto nel parlare comune tutti diciamo "dieci cavalli" e non "cavalli dieci", e non c'è motivo di scostarsi da quest'uso.

Tornando al nostro uomo, che ha una massa di 70 kg e sale di 600 m dal punto di partenza, chiediamoci in primo luogo: quanta energia consuma per far questo? Siamo certi che consuma dell'energia, perché deve aumentare la sua energia potenziale; quindi in ultima analisi dovrà spendere una parte dell'energia chimica contenuta nel suo corpo per far funzionare il "motore biologico" costituito dai muscoli che lo sollevano fino a 600 m.

L'energia necessaria è data dal prodotto della massa per l'accelerazione di gravità, per l'altezza:

$$E = m g h.$$

Questa è una formuletta che sicuramente tutti avrete visto quando avete studiato fisica. Per fare il calcolo dobbiamo usare un sistema coerente di unità: se usiamo il Sistema Internazionale (MKS) dovremo esprimere la massa in kg, l'accelerazione di gravità in m/s^2 , l'altezza in metri. Nel nostro caso abbiamo: $70 \times 10 \times 600$, avendo preso uguale a 10 l'accelerazione di gravità (il suo valore più preciso è 9.8 m/s^2). Il risultato è espresso in joule, che è l'unità di energia del Sistema Internazionale: così ho dato implicitamente la definizione di joule.

Troviamo 420000, che scrivo 4.2×10^5 . Un'altra cosa che forse troverete curiosa è che adopero il punto invece della virgola per separare i decimali. Questo non rientra nelle convenzioni internazionali, ma è un'usanza diffusissima tra i fisici. Si potrebbe dire che ciò deriva dall'essere quello l'uso normale nei paesi anglosassoni; ma qualche tempo fa, leggendo dei manoscritti di Galileo, ho scoperto che anche lui usava il puntino per separare i decimali. Perciò non potete accusarmi di esterofilia. Comunque non è una cosa essenziale, basta intendersi.

Torniamo al nostro problema: sappiamo che l'uomo nella salita ha consumato 4.2×10^5 joule; ora dobbiamo occuparci del piatto di pastasciutta. Per sapere quanta energia dà un piatto di pastasciutta occorrono altre informazioni, che non sono fornite nell'enunciato del problema. Questo accade spesso nei problemi presi dalla vita reale, che non sono già belli e cucinati come quelli scolastici: spesso mancano dei dati, che bisogna andarsi a cercare. L'ingrediente principale della pastasciutta è la pasta (!) che grosso modo fornisce 4 kcal/g. Supponiamo che quel piatto sia di 100 g: avremo 400 kcal, e con il fattore di conversione che vi ho dato si arriva a 16×10^5 J, cioè quasi 4 volte l'energia consumata nella salita.

Però si sente che c'è qualche cosa che non funziona: in realtà il piatto di pastasciutta non basta! Quindi ci dev'essere qualcosa di sbagliato (lo scopo di questi problemi non è solo di fare dei conti; è anche di far riflettere).

Lo sbaglio sta nell'idea che tutta l'energia che si ricava dal piatto di pastasciutta possa essere utilizzata per far funzionare i muscoli. Questo non è vero, come si capisce se si pensa che anche se uno se ne sta seduto in poltrona non si può dire che non consuma niente; per farla breve, possiamo dire che il rendimento nel lavoro muscolare è in media del 25% (almeno così stimano i fisiologi). Ciò significa che solo un quarto dell'energia ricavata dalla pastasciutta potrà andare a compensare il lavoro muscolare. Perciò invece di 16×10^5 J ne ho solo 4×10^5 , e ci starei giusto giusto; ma poi bisogna almeno pensare alla discesa, che costa anch'essa un po' di lavoro (come mai? non è tanto facile capirlo!) ed ecco che quella pastasciutta non è più sufficiente.

Come conclusione, vorrei dirvi che questo problema aveva anche un altro scopo: quello di farvi vedere che il joule è un'unità molto piccola per la vita pratica.

E adesso un altro problema:

Per far bollire 5 litri d'acqua quanto petrolio debbo bruciare?

Qui bisogna sapere una quantità di altre cose che non ho detto, ma che posso supporre note, o che sapete dove trovare. Far bollire l'acqua significa portarla dalla temperatura ambiente, di circa 20 gradi, fino a 100 gradi; bisogna dunque sapere quanto calore è necessario a questo scopo. Nel caso dell'acqua la cosa è semplice: si moltiplica la massa dell'acqua (5 litri cioè 5 kg) per il salto di temperatura (80 gradi). Questo perché per far salire di un grado un kg d'acqua ci vuole una kcal: dunque per 80 gradi e 5 litri ci vogliono $80 \times 5 = 400$ kcal. Questa è l'energia che mi occorre.

Per trovare quanto petrolio devo bruciare ho bisogno di sapere quanta energia posso tirare fuori da una data quantità di petrolio: quello che si chiama il *calore di combustione* o *potere calorifico*; per 1 kg di petrolio questo vale all'ingrosso 10 000 kcal. Se un kg di petrolio mi dà 10^4 kcal, e io ho bisogno di 400 kcal, me ne bastano 40 grammi.

Però anche qui siamo stati ottimisti a credere che tutto il calore che viene fuori dal petrolio vada a scaldare l'acqua: in realtà una parte verrà portata via dall'aria calda prodotta dalla fiamma. Diciamo che con un buon fornello se ne utilizza forse la metà,

il che vuol dire che quei 40 grammi non bastano: ce ne vorranno forse 80. Tra l'altro questo si potrebbe facilmente verificare con un esperimento: sarebbe utile, per vedere che non stiamo facendo discorsi campati in aria.

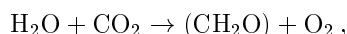
L'ultimo problema che vorrei proporvi è:

Un kWh di energia elettrica costa 180 lire, un metro cubo di metano costa 400 lire. Che cosa è più economico per scaldare l'acqua: un fornello a metano o un fornello elettrico?

In questo caso bisogna sapere quanta energia si ottiene da un metro cubo di metano: all'ingrosso diciamo 9000 kcal. Lascio a voi i calcoli: il risultato è che il costo dell'energia elettrica, per riscaldare la stessa quantità di acqua, è almeno 4 volte quello del metano. C'è però da tener conto che il fornello elettrico permette una migliore utilizzazione del calore, mentre quello prodotto dalla fiamma del metano va in gran parte perduto. Tutto considerato, il metano sembra ancora più conveniente.

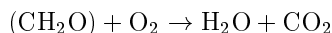
Questo problema aveva lo scopo di farvi vedere che la convertibilità delle diverse forme di energia, e l'uso delle varie unità di misura, possono applicarsi a situazioni di carattere pratico.

Ora vorrei avvicinarmi al tema del corso, e cioè parlare di energia nelle piante e di fotosintesi. Il processo fondamentale della fotosintesi – descritto in maniera molto sommaria, trascurando tutti gli stadi intermedi fra l'anidride carbonica e l'acqua iniziali, e lo zucchero o l'amido finali – è il seguente:



dove (CH_2O) è un'abbreviazione per un mono- o polisaccaride (amido, cellulosa, zuccheri...). L'acqua, come sappiamo, proviene principalmente dal terreno, e l'anidride carbonica dall'aria; dei prodotti finali, (CH_2O) resta nella pianta, sotto forma di materiale strutturale, riserve, frutti... , mentre l'ossigeno ritorna nell'aria.

La prima osservazione da fare è che la reazione di fotosintesi assorbe energia. Che questo sia vero, lo si capisce dal fatto che la reazione inversa:



non è altro che la combustione dell'amido, della cellulosa, ecc.: quella che si produce quando bruciamo della legna; e questa ovviamente libera energia. In termini quantitativi, da un kg di legno secco si ottengono all'incirca 3500 kcal: la stessa energia è stata dunque necessaria per la fotosintesi. La nostra domanda è ora: da dove proviene questa energia? Dal momento che si parla di fotosintesi, sappiamo già che la risposta dev'essere: dalla luce del Sole. Cercheremo ora di stimare quanta energia un albero ricava dalla luce del Sole, per vedere se i conti tornano.

Prendiamo in considerazione un albero alto 10 metri, con una chioma di 40 m² di superficie, e con un tronco di 30 cm di diametro. Un tale albero potrebbe avere un secolo di vita, grosso modo. Dobbiamo in primo luogo stimare la sua massa, e qui occorre un'avvertenza: è chiaro che non possiamo fare misure e calcoli precisi, ma per il nostro scopo – come capita spesso nei problemi scientifici – ci basta un ordine di grandezza. Mi sembra ragionevole stimare che il volume totale (tronco, rami, radici) possa essere intorno al metro cubo, che dà meno di 1000 kg di legno secco, corrispondenti a $3.5 \times 10^6 \text{ kcal} = 14 \times 10^9 \text{ J}$. Questa è dunque l'energia necessaria per la sintesi della materia presente nel nostro albero.

Calcoliamo ora l'energia ricevuta dal Sole. Si sa che la luce solare manda sulla Terra in un giorno un'energia di circa 10^7 J/m^2 (sarebbero più di 1000 J al secondo nelle ore e nella stagione più favorevoli, ma bisogna tener conto anche della notte e delle ore in cui il Sole è basso...). Sul nostro albero arrivano dunque $4 \times 10^8 \text{ J/giorno}$.

Se l'albero utilizzasse tutta questa energia, potrebbe dunque svilupparsi in soli 35 giorni, anziché in 100 anni; e questo ci pone un nuovo problema: dove va a finire tutta l'energia che manca? Notate che fra 35 giorni e 100 anni c'è circa un fattore 1000: sembra dunque che solo 1/1000 dell'energia solare sia utilizzata. Cerchiamo di capire come stanno le cose.

In primo luogo, non tutta la radiazione solare viene assorbita da una pianta: una parte viene riflessa (se non fosse così, la piante apparirebbero nere, anziché verdi). Poi non tutta l'energia assorbita viene usata per la fotosintesi: ad es. una parte non piccola è spesa per far evaporare l'acqua dalle foglie. Gli esperti stimano che un albero possa in media utilizzare per la fotosintesi solo 1/100 dell'energia solare incidente. Ma anche così, siamo fuori di un fattore 10: che cosa abbiamo dimenticato?

Prima di continuare, lasciatemi ricordare che questo discorso non ha lo scopo di fare un bilancio esatto dell'energia in una pianta, ma solo di farvi vedere come si possono affrontare i diversi problemi che vengono fuori; perciò le nostre conclusioni non pretendono di essere né esatte, né definitive. Ma torniamo all'energia che manca, e andiamo in cerca di qualcosa che abbiamo trascurato.

A me viene in mente prima di tutto una cosa: nella nostra stima della massa dell'albero, noi abbiamo calcolato la massa presente sull'albero *oggi*, ma abbiamo dimenticato che l'albero ogni anno perde le foglie, e che queste foglie cadute sono anch'esse massa prodotta per fotosintesi. Non so stimare questa massa, ma non è irragionevole che in un secolo di vita la massa di foglie possa essere molto maggiore della massa attuale dell'albero: forse proprio 10 volte.

Conclusioni

Vorrei concludere riassumendo la linea del discorso che abbiamo fatto. Abbiamo visto in primo luogo come si esprime in fisica una legge di conservazione, in termini di bilancio fra entrate e uscite di un sistema fisico. Abbiamo esaminato diversi esempi di grandezze conservate: numero, volume, massa, elementi chimici; per poi passare all'energia. La conservazione dell'energia ci ha portati a parlare delle diverse forme di energia, e della loro equivalenza, anche quantitativa. Abbiamo passato in rassegna alcune unità di misura dell'energia, e ne abbiamo vista l'applicazione in problemi pratici. Infine, abbiamo tentato di discutere il bilancio dell'energia di un albero, ossia l'utilizzazione dell'energia solare per la fotosintesi della materia vegetale.



Finito di stampare nel mese di Novembre 2009
da Monotipia Cremonese - Cremona

LA FISICA NELLA SCUOLA

QUADERNO N. 20

Energia e vita

Cecilia Anguillesi - Luigia Bosman - Isa Grilli - Umberto Penco

BOLLETTINO TRIMESTRALE DELL'ASSOCIAZIONE PER L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA

ANNO XLII- N. 3 SUPPLEMENTO

LUGLIO-SETTEMBRE 2009

Prefazione (Anna Maria Mancini)

I

Introduzione (Paolo Meletti)

II

**Sezione 1 - Osservazioni astronomiche per l'introduzione
di argomenti di fisica** (Umberto Penco)

- | | |
|--|-------|
| 1. Osservazioni sul moto del Sole | p. 1 |
| 2. Ciclo diurno e stagionale dell'illuminamento | p. 19 |
| 3. Luce e colori: osservazioni e interpretazioni | p. 35 |

**Sezione 2 - Lavoro sperimentale per l'introduzione di Volume,
Densità ed Energia** (Luigia Bosman)

- | | |
|---|-------|
| 1. Il volume di un corpo e la sua misura | p. 49 |
| 2. La grandezza "densità" e la sua misura | p. 54 |
| 3. Utilizzazione di energia fornita da sorgenti diverse | p. 59 |

Sezione 3 - Esperienze di Biologia vegetale (Cecilia Aguillesi, Isa Grilli)

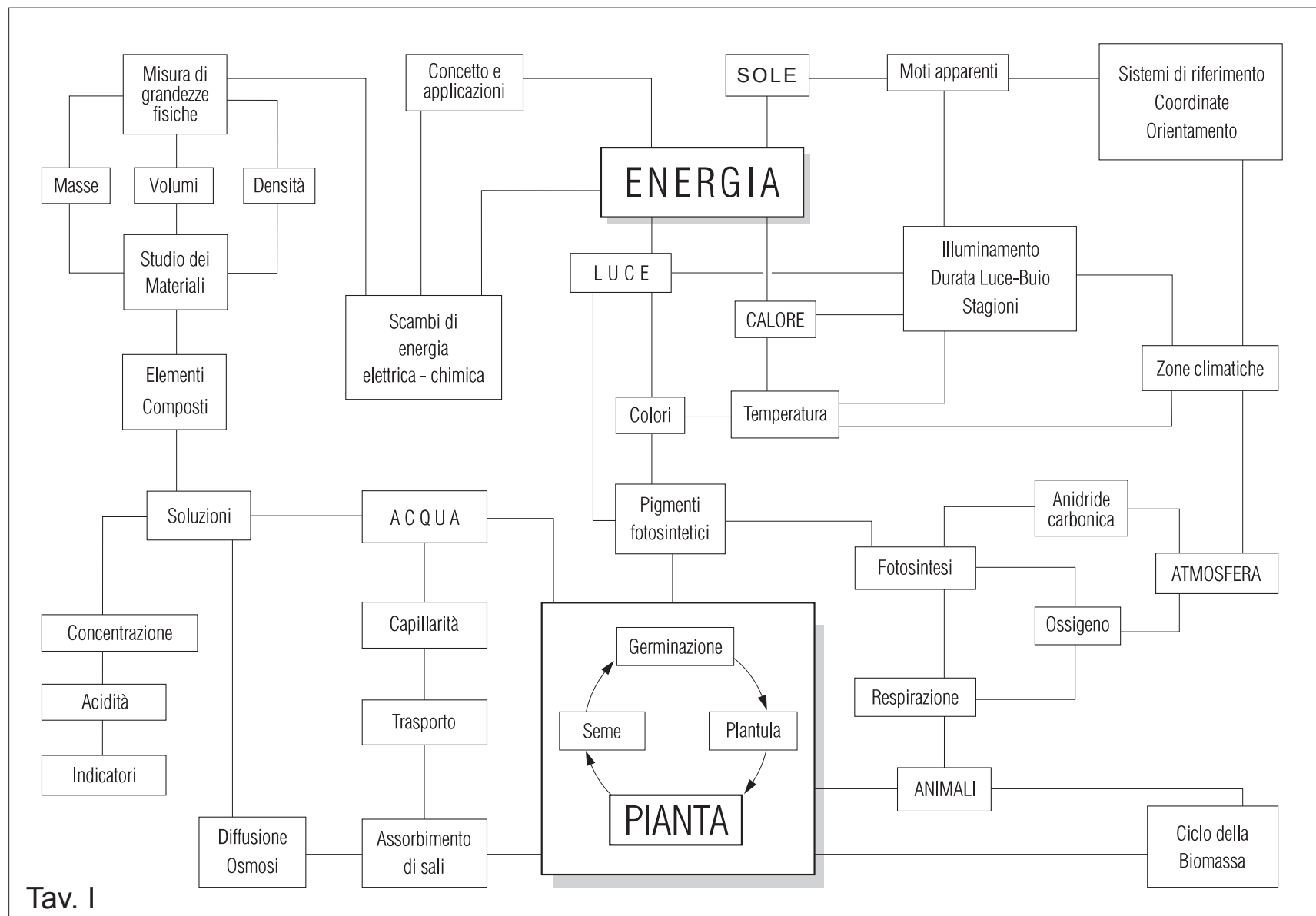
- | | |
|---|-------|
| 1. Le soluzioni nella biologia vegetale | p. 65 |
| 2. Dal seme alla pianta | p. 73 |
| 3. La fotosintesi | p. 90 |

Appendice

Il concetto di energia e le sue applicazioni (Elio Fabri)

p. 100

6 Tavole fuori testo con sagome da ritagliare per costruire semplici strumenti di misura



Tav. I





Possibile sviluppo
nei tre anni

**Biologia
vegetale**

1° anno

*Acqua
Capillarità
Trasporto e
assorbimento di sali*

Chimica

*Soluzioni
Indicatori di acidità*

Fisica

*Volume
Massa
Densità*

Astronomia

*Luce e ombre
Posizione del Sole
(osservazioni preliminari)*

2° anno

*Plantula
Seme
Germinazione*

*Energia e scambi energetici
Riscaldamento
Temperatura*

*Posizione del Sole
(osservazioni sistematiche)
Latitudine*

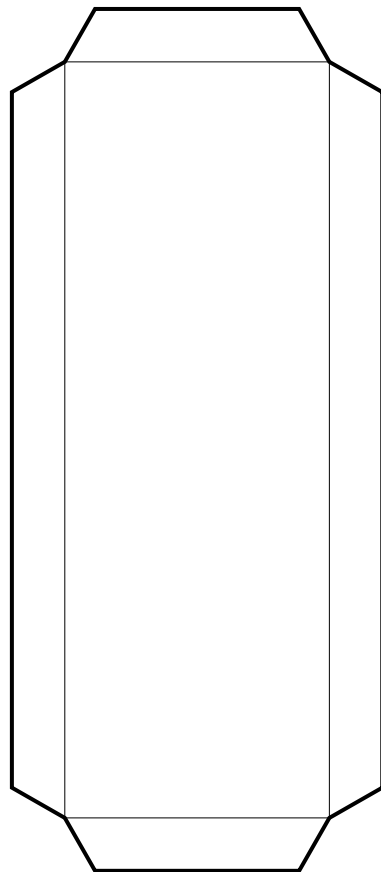
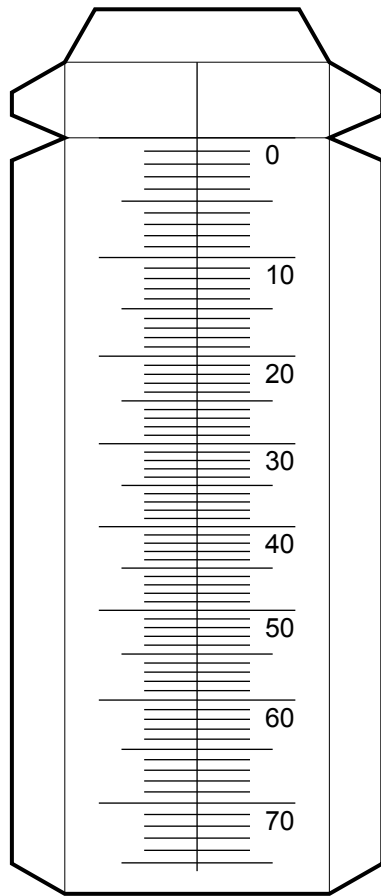
3° anno

*Respirazione
Fotosintesi
Biomassa*

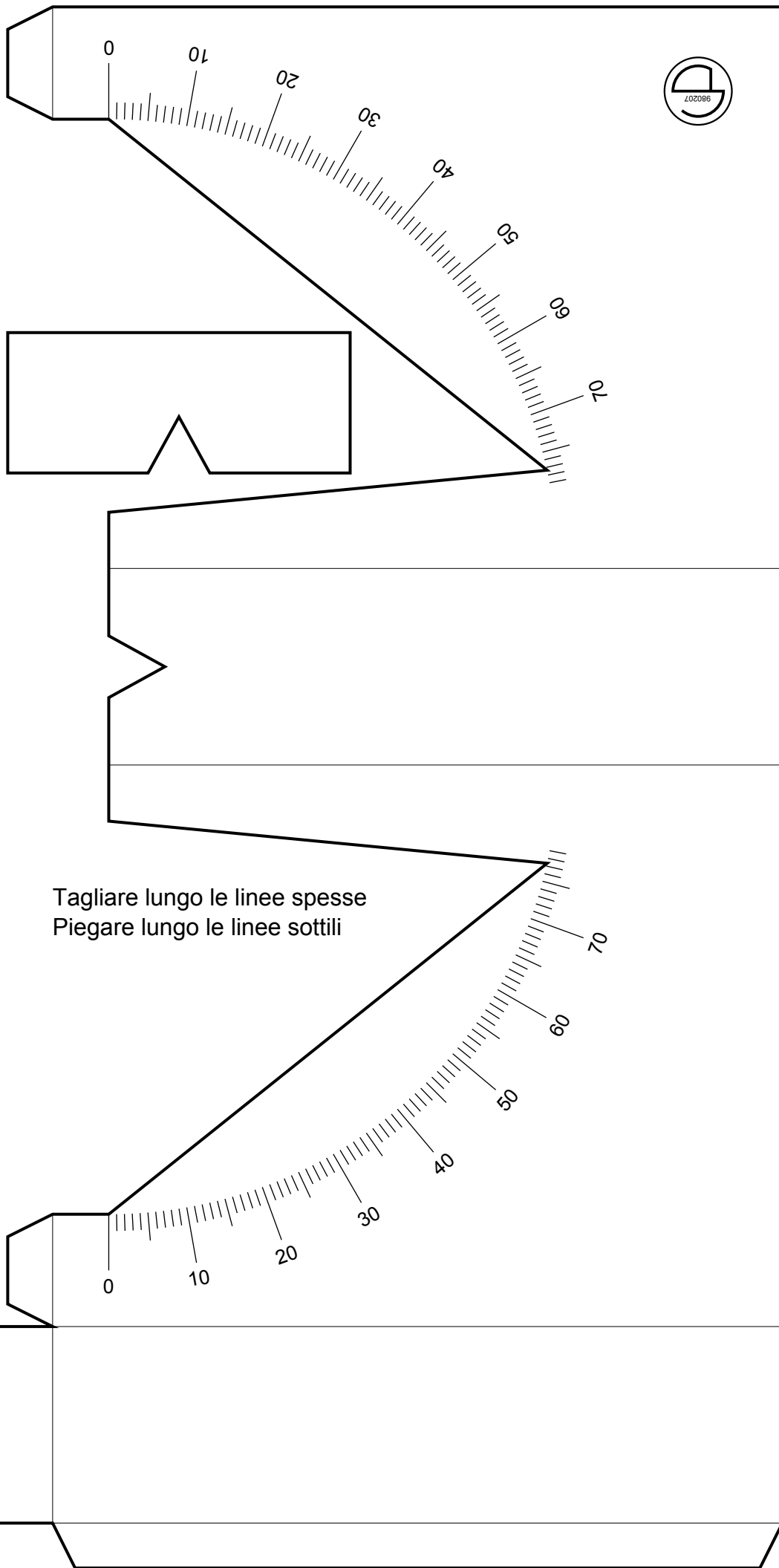
Luce e colori

*Obliquità
Stagioni
Zone climatiche*

Tav. II

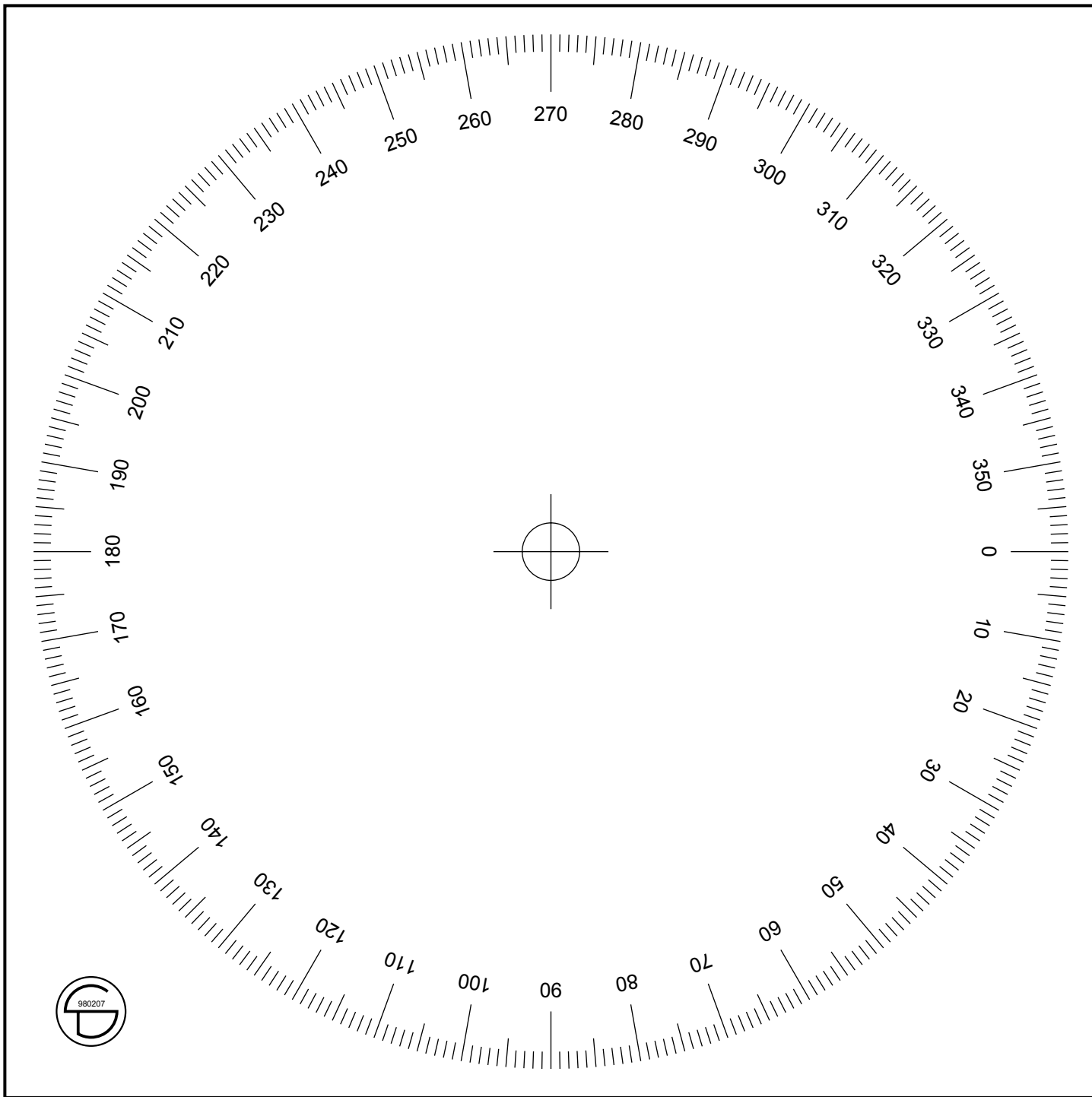


Tav. III



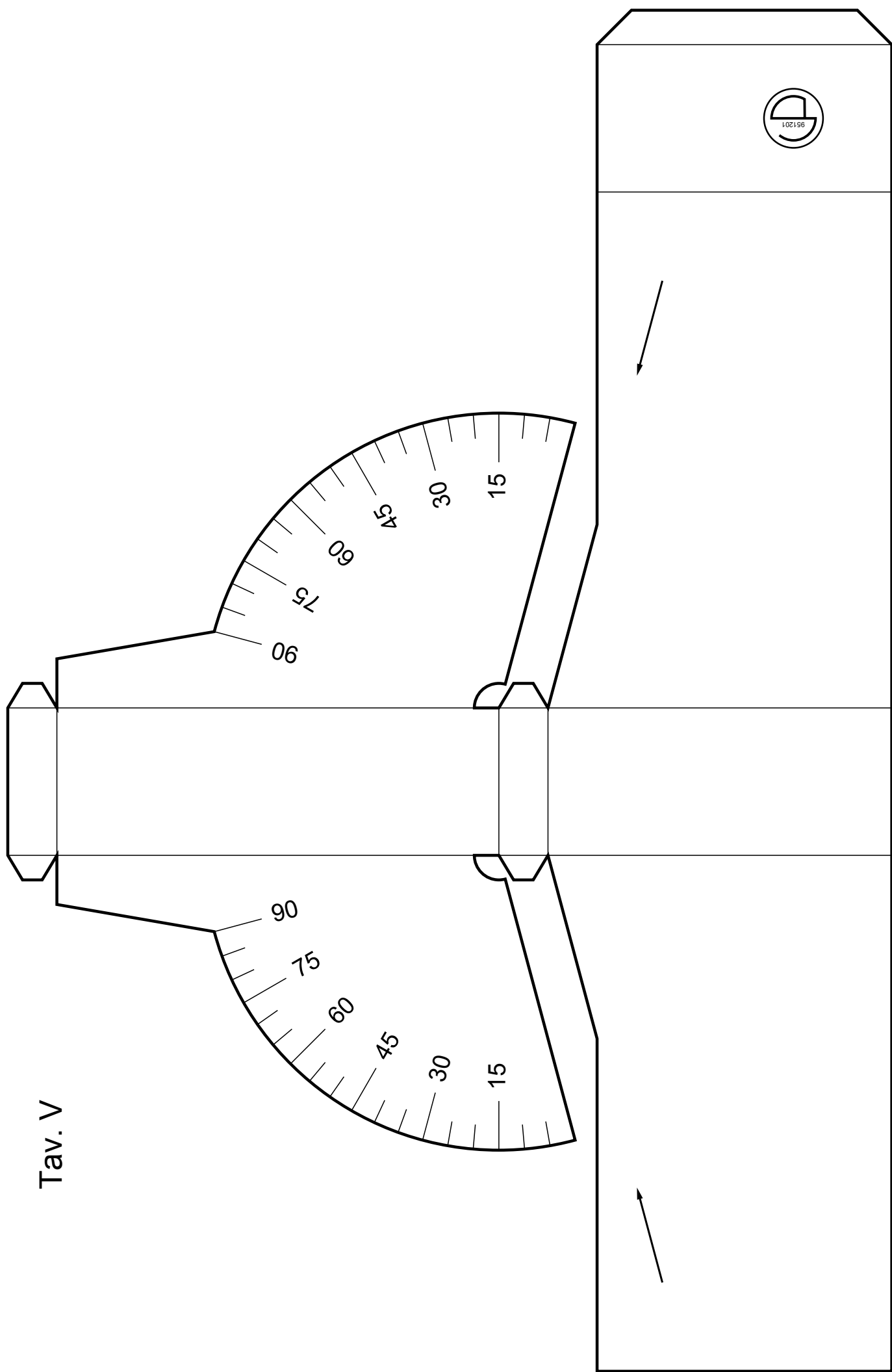
Tagliare lungo le linee spesse
Piegare lungo le linee sottili





Tav. IV





Tav. V





Tav. VI

