

3 Decadenza dell'interpretazione meccanicistica – fluidi elettrici e magnetici – la luce

3.1 L'etere

In realtà il titolo mente, in parte: prima di assistere propriamente alla decadenza dell'interpretazione meccanicista ne vedremo ancora alcuni veri e propri trionfi. Ma cominciamo con ordine. Come spesso nelle storie complesse è necessario, faremo un passo indietro per farne due avanti: andiamo a capire un po' meglio cosa fosse questo benedetto **etere** padre del *calorico* e degli altri **fluidi imponderabili** di cui tratteremo oggi. Ci aiuterà anche a ricordarci che la storia della fisica non è nient'affatto semplice e lineare....

Tarsitani-Vicentini (a cura di)/ Sebastiani, *ibidem* pag. 175

L'etere, sul quale Newton svolge varie considerazioni nelle *questioni* XVII-XXIV inserite nell'**Opticks** nel 1717, "*mezzo molto più sottile dell'aria che rimane nel vuoto dopo che l'aria è stata rimossa*", il quale "*come la nostra aria può contenere particelle che si sforzano di allontanarsi l'una dall'altra*", svolge un'importante ruolo unificante nella visione newtoniana della natura, nell'interpretazione qualitativa di tutti i fenomeni fisici.

Poiché secondo Newton esso è il mezzo di propagazione del calore molti newtoniani finiscono con l'identificarlo con la *causa* di tutti i fenomeni termici. Tradendo quindi la concezione cinetica di Newton in favore della concezione sostanzialistica. Analogo percorso seguono i chimici Cartesiani in relazione alla *materia sottile*, o elemento del fuoco, di Cartesio. E questa storia l'abbiamo già vista.

L'**etere** fu introdotto inizialmente da **Newton** per eliminare l'azione a distanza dalla legge di Gravitazione Universale perché "*è inconcepibile che la materia bruta e inanimata possa, senza la mediazione di qualcos'altro che non sia materiale, operare sul resto della materia e influenzarlo senza un mutuo contatto*" (!). Essendo costituito da particelle agenti a loro volta a distanza si potrebbe pensare che con la sua introduzione Newton non faccia che spostare il problema dell'azione a distanza dall'ambito *macroscopico* all'ambito *microscopico*. In realtà ciò non avviene perché Newton tende a identificare nell'etere un principio attivo, un principio spirituale (come è provato dal frequente uso del termine **spirito** per designarlo) la cui natura è profondamente diversa da quella della materia ordinaria (inanimata).

Attenzione che quello dell'esistenza o meno dell'etere è un tema talmente centrale che solo nei primi anni del 1900 i fisici vi rinunciarono, e con quanta fatica lo dimostra anche banalmente il fatto che Einstein, nel libro che sto usando, dedica ai motivi per cui si può/deve rinunciare all'etere un paragrafo molto sofferto.

3.2 I due fluidi elettrici

Torniamo a viaggiare con **Einstein**: il libro che sapete, saltabecando qua e là a partire da pag. 75. Credo che da questo momento in poi anticiperemo argomenti che dovete affrontare ancora a scuola tutte/i, quindi sarete più alla pari.

Come giustamente dice Einstein le pagine seguenti contengono il *resoconto* di esperimenti assai semplici che sarebbe molto più divertente e istruttivo veder realizzati piuttosto che descritti a voce... Accontentiamoci e lavorate di fantasia... Nella presentazione in PP metterò più immagini possibile e sarà a voi riportarne disegni nella versione cartacea.

Oltre alla fantasia vi chiedo anche di attivare un po' di pazienza perché il significato di tali esperimenti sarà chiarito solo mediante la teoria che da tali esperimenti deriveremo e, oltretutto, tale teoria risulterà anche provvisoria... Provate a fare congetture autonomamente e poi confrontate le vostre con quelle "storiche!"

I esperimento *Una verga metallica [orizzontale] sostenuta da un piede di vetro porta [appeso] ad ognuna delle estremità un elettroscopio. Che cos'è un elettroscopio? E' un apparecchio semplicissimo consistente essenzialmente in due sottilissime foglioline d'oro pendenti da un'asticella metallica.*

Muniamoci di una bacchetta di gomma dura e di una pezza di flanella ... Strofriamo vigorosamente la bacchetta di gomma con la flanella e tocchiamo la nostra verga. Vedremo allora le foglioline divergere immediatamente e continuare a rimaner divaricate anche dopo l'allontanamento della bacchetta di gomma.

II esperimento Serviamoci degli stessi mezzi avendo cura che le foglioline dell'elettroscopio non siano divaricate. Per ottenere questo basterà toccare la verga di metallo con il nostro dito.

Questa volta però non porteremo la bacchetta di gomma a contatto con la verga ma l'avvicineremo soltanto. Le foglioline divergeranno lo stesso ma, allorché allontaneremo la bacchetta, senza aver toccato la verga, esse, invece di continuare a divergere, come nel caso precedente, ricadranno subito in posizione "di riposo".

III esperimento Per questo ci serve che la verga metallica sia composta di due parti disgiungibili. Avviciniamo come prima la bacchetta di gomma, dopo averla strofinata, alla verga. Avremo lo stesso fenomeno di prima. Se ora disgiungiamo le due parti della verga e se, dopo di ciò, allontaniamo la bacchetta di gomma, constateremo che le foglioline continueranno a rimanere divaricate, invece di rimettersi in posizione di riposo come nell'esperimento precedente.

Come spiegare l'esito di tali esperimenti? La prima teoria che fu formulata fu la seguente:

Esistono due fluidi elettrici, l'uno è denominato positivo (+), l'altro negativo (-).

Tale denominazione è puramente convenzionale e vedrete abbondantemente a lezione quali sono gli esperimenti che portano ad attribuire, di volta in volta, ad un corpo un'eccedenza di fluido negativo e positivo. Per ora fidatevi.

Essi hanno in certo qual modo il carattere di una sostanza, nel senso individuato nella precedente lezione: quantitativamente sono suscettibili di aumento o diminuzione, ma in un sistema isolato il loro totale non varia.

Vediamo però le differenze fra il caso attuale e quello del calore:

1. Non abbiamo una sostanza elettrica soltanto ma ne abbiamo due
2. Un corpo è "**elettricamente**" **neutro** se i fluidi elettrici, il positivo e il negativo, si annullano reciprocamente.
3. I fluidi elettrici della stessa specie si **respingono** (è questo il motivo per cui le foglioline dell'elettroscopio si respingono, ma lo riprenderemo fra breve) e della specie opposta si **attragono**
4. Esistono due specie di corpi: quelli nei quali i fluidi elettrici possono muoversi liberamente e quelli nei quali non possono farlo. I primi vengono detti **conduttori** e i secondi **isolanti** [invero tale distinzione si poteva già fare l'altra volta per il calore, lo sa bene chi di voi si sia avventurato a girare il sugo con il cucchiaino di acciaio!). Come sempre in casi simili tale distinzione non va presa alla lettera: il conduttore o l'isolante ideale non esistono (anche se adesso, con i superconduttori... Ma dovete pazientare un po'...). I metalli, la Terra, il corpo umano, sono esempi di conduttori, benché non tutti ugualmente buoni. Il vetro, la gomma, la porcellana e simili, sono isolanti. L'aria, specialmente umida, è un cattivo isolante: la presenza di aria umida attorno agli oggetti utilizzati nei nostri esperimenti, avrebbe "disturbato" il buon esito degli stessi.

Queste supposizioni teoriche sono sufficienti per spiegare i tre esperimenti descritti:

I esperimento La bacchetta di gomma, come tutti i corpi in condizioni normali, è elettricamente neutra: essa contiene i due fluidi, il positivo ed il negativo, in quantità uguali. Strofinando con la flanella noi li separiamo. La specie di elettricità che la bacchetta di

gomma, dopo lo strofinamento, possiede in eccesso è quella che abbiamo chiamato di tipo negativo. Se gli esperimenti fossero stati effettuati utilizzando una bacchetta di vetro strofinata con una pelle di gatto il fluido rimasto in eccesso sarebbe stato quello di tipo positivo.

Toccando la verga con la gomma strofinata, poiché la verga è di materiale conduttore, le apportiamo il fluido elettrico in più sulla bacchetta di gomma che si muove liberamente espandendosi nell'intera superficie metallica, comprese le foglioline d'oro. Poiché l'elettricità negativa respinge l'elettricità negativa le due foglioline si discostano il più possibile l'una dall'altra. Il sostegno di vetro su cui posa la verga fa sì che il fluido elettrico non vada disperso se non per l'aria, quindi in tempi lunghi. Se tocchiamo la verga il fluido passa attraverso di noi e le foglioline tornano vicine.

II esperimento Si comincia l'esperimento nello stesso modo del precedente, ma invece di portare la gomma strofinata a contatto con il metallo l'avviciniamo a breve distanza. In tal caso non c'è passaggio di elettricità dalla gomma al metallo, ma i due fluidi che nel metallo possono muoversi liberamente si separano e il positivo viene attirato dalla bacchetta, mentre il negativo viene respinto. Essi tornano a mescolarsi quando allontaniamo la bacchetta perché i fluidi di specie opposta si attraggono mutuamente.

III esperimento Si comincia l'esperimento come il precedente solo che, quando i fluidi si sono separati, la bacchetta viene divisa in due parti. Perciò, quando allontaniamo la bacchetta di gomma, i due fluidi non possono mescolarsi di nuovo e le foglioline d'oro, conservando un eccesso di uno dei fluidi elettrici [ciascuna coppia di foglioline di un tipo differente], continuano a divergere.

Alla luce di questa teoria assai semplice tutti i fatti menzionati fin qui appaiono comprensibili. La teoria stessa ci permette inoltre d'intendere molti altri fatti nel dominio dell'elettrostatica.

Lo scopo di qualsiasi teoria è quello di orientarci verso fatti nuovi, di suggerire nuovi esperimenti e di condurre alla scoperta di nuovi fenomeni e nuove leggi...

Ho già dato i riferimenti bibliografici a chi volesse approfondire l'evoluzione del concetto di teoria fisica che c'è stata dopo Einstein: i testi di riferimento sono quelli di Khun e Popper.

L'introduzione del concetto di fluidi elettrici ci mostra l'influenza delle idee meccanicistiche. Rileggetevi le modalità con cui B. Franklin descriveva le caratteristiche dei fluidi elettrici.

Per accertare se il punto di vista meccanicistico possa venire applicato [fino in fondo] alla descrizione dei fenomeni elettrici dobbiamo considerare il problema seguente:

*Siano date due **piccole** sfere elettricamente cariche, vale a dire che posseggano un eccesso di uno dei due fluidi elettrici. Sappiamo che le due sfere si attireranno o respingeranno.*

Ma **la forza** con cui si attrarranno o respingeranno, da che dipende? La teoria meccanicistica vorrebbe che sia diretta secondo la retta congiungente le sfere e che dipenda unicamente dalla distanza. Di più: perché le cose funzionino proprio "per benino" tale forza dovrebbe dipendere dall'inverso del quadrato della distanza, com'era per la forza d'interazione gravitazionale...

E così è! Fra il 1777 e il 1785 gli esperimenti di Coulomb (1736-1806) mostrarono che la

legge d'interazione elettrostatica fra due cariche è: $\vec{F}_{el} = k_0 \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2} \cdot \hat{d}$.

Ricordate che la legge d'interazione gravitazionale è: $\vec{F}_{grav} = -G \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{d^2} \cdot \hat{d}$

Sono formalmente identiche! Le **differenze** sono minime: l'interazione gravitazionale si attiva fra qualunque coppia di masse mentre l'interazione elettrostatica solo fra corpi carichi elettricamente, la forza elettrostatica può essere sia di tipo attrattivo che repulsivo, mentre quella gravitazionale è solo attrattiva, ovviamente le unità di misure sono differenti

e così il valore della costante di proporzionalità: $k_0 = 8,99 \cdot 10^9 N \cdot \frac{m^2}{C^2}$ dove C è il Coulomb: l'unità di misura della carica elettrica. Il pedice 0 sta ad indicare un'altra differenza: la forza d'interazione elettrostatica non è la stessa nel vuoto e in presenza di materia: cambia la costante d'interazione. Il valore numerico fornito è il valore nel vuoto.

Dev'essere stata una grande emozione ottenere un tale risultato. Siamo nello stesso periodo storico in cui si registravano successi su successi con la teoria del calorico: un'apoteosi!

Tutto sembra andare a confermare le istanze del programma meccanicista... E non è finita:

3.3 I fluidi magnetici

Procederemo come abbiamo fatto sinora: partendo da fatti molto semplici e cercandone poi una spiegazione teorica.

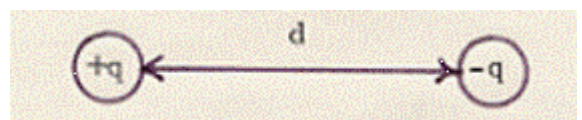
I esperimento Ci serviremo di due calamite di ferro a forma di sbarretta: una sospesa al suo baricentro e quindi libera di ruotare e l'altra tenuta in mano. Avvicinando le estremità delle due calamite può avvenire o che si attraggano o che si respingano. Impugniamo la calamita che teniamo in mano in modo che le estremità più vicine fra le due si attraggano. Le estremità delle calamite le chiameremo **poli**.

Conduciamo il polo della calamita che teniamo in mano lungo l'altra calamita. Possiamo constatare che l'attrazione va diminuendo fino a cessare completamente quando arriviamo in prossimità del centro dell'altra calamita. Se continuiamo a condurre il polo nello stesso verso osserveremo una repulsione che raggiunge la sua maggior intensità all'altro polo della calamita sospesa.

Il esperimento Ogni calamita presenta dunque due poli. E' possibile isolarne uno? Viene subito un'idea molto semplice: basterà spezzare la calamita in due parti uguali. Abbiamo visto che nessuna forza si manifesta fra il polo di una calamita e il punto mediano dell'altra. MA quando si spezza una calamita il risultato è inatteso e sorprendente: ripetendo l'esperimento precedente con la metà della calamita sospesa i risultati sono esattamente gli stessi di prima: quello che era il punto mediano diventa un polo che si attrae con il polo della calamita che teniamo in mano!

Come possiamo spiegar questi fatti? Possiamo cercare di modellare una teoria del magnetismo su quella dei fluidi elettrici. Ciò ci viene suggerito dalla circostanza che qui, come per i fluidi elettrostatici, abbiamo attrazione e repulsione.

Costruiamo quindi un semplice apparecchio come quello illustrato in figura: un **dipolo elettrico**



Per spiegare il primo esperimento va benissimo, ma il secondo? Spezzando la bacchetta otteniamo no un nuovo dipolo ma due cariche isolate...

Dobbiamo escogitare dunque una teoria più sottile...

Possiamo immaginare che una calamita sia costituita da tanti piccoli **dipoli elementari** (puoi rappresentarli mediante freccette) che non possono venir ulteriormente spezzati in due poli separati. In tal caso nella calamita considerata come un tutto regna l'ordine, poiché tutti i dipoli elementari sono orientati nello stesso verso. E si capisce anche perché, spezzando una calamita, due nuovi poli appaiono alle nuove estremità.



Questa teoria più raffinata spiega entrambi gli esperimenti.

Resta da valutare l'aspetto quantitativo. Prendendo due calamite sufficientemente lunghe (affinché l'effetto del secondo polo possa essere considerato trascurabile) e andando a misurare l'intensità della forza d'iterazione delle due estremità che si vanno avvicinando, di

nuovo si trova che la forza d'interazione va come l'inverso del quadrato della distanza come per la legge di Newton e per la legge di Coulomb!

Facciamo il punto: le forze della gravitazione, le forze elettrostatiche e le forze magnetiche possono tutte essere rappresentate allo stesso modo. Ma il prezzo da pagare per questa semplicità consiste nell'introduzione di nuove sostanze imponderabili, ossia di concetti piuttosto artificiali e senza rapporto con la sostanza fondamentale: la massa.

3.4 La corrente elettrica

L'enorme sviluppo dell'elettricità come ramo della scienza e della tecnica ebbe inizio con la scoperta della **corrente**, cioè fluido elettrico in moto (il nome *corrente* deriva precisamente della fluidodinamica e ci porta alla mente l'immagine del mare o di un torrente, no?).

Per poter trattare questo argomento ci servono delle nozioni tecniche che, per non spezzare il ritmo della storia, avevo precedentemente sorvolato: andiamo a ragionare un po' sulla **grandezza fisica responsabile di tale movimento di fluido elettrico**.

Il solito Einstein propone un parallelo con argomenti già visti: *rammentate quanto fosse essenziale, per bene intendere i fenomeni calorifici, distinguere fra calore e temperatura? Nel caso presente è altrettanto importante distinguere fra: **potenziale elettrico** e carica elettrica. L'analogia che propone Einstein è la seguente (pag. 81):*

Potenziale elettrico	Temperatura
Carica elettrica	Calore

Il parallelo si realizzerebbe in questo: come una differenza di temperature innesca un passaggio di calore così una differenza di potenziale innesca un passaggio di carica elettrica. Sì, ma cos'è il potenziale?

Per spiegarlo un po' meglio Einstein escogita l'esempio seguente:

*Due conduttori, per esempio due sfere di grandezza differente, possono avere la stessa carica elettrica, vale a dire lo stesso eccesso d'uno dei fluidi elettrici, il fluido elettrico [di uno stesso tipo perciò autorepulsivo] possiederà maggior densità sulla sfera più piccola: su questa sarà perciò "più stipato". Si trovano così le particelle che lo compongono più vicine aumentando così la forza repulsiva, cioè la **tendenza della carica a sfuggire dal conduttore***

Questa tendenza della carica a sfuggire da un conduttore fornisce una misura diretta del suo potenziale.

Il potenziale è una grandezza legata alla posizione delle cariche e che rende conto della "velocità", più o meno alta con la quale è possibile metterle in moto. Si ricollega in questo senso, con dei distinguo che forse è meglio lasciar stare, all'energia potenziale che abbiamo visto all'opera la lezione scorsa...

Resta da specificare qualche altro aspetto. Torniamo a servirci dell'**analogia**:

- Come due corpi aventi inizialmente temperature differenti, finiscono per trovarsi alla stessa **temperatura di equilibrio** qualche tempo dopo l'essere stati messi in contatto, così due conduttori isolati aventi inizialmente potenziali elettrici differenti si trovano rapidamente ad uno stesso **potenziale di equilibrio**, allorché sono messi in contatto.
- Come un **termometro** messo in contatto di un corpo indica -mediante l'altezza della colonna di mercurio- la propria temperatura e pertanto la temperatura del corpo, così un **elettroscopio** a contatto con un conduttore indica, con la divergenza delle foglioline d'oro- il proprio potenziale e pertanto quello del conduttore
- Come il calore fluisce dai corpi a **temperatura maggiore** ai corpi a temperatura minore stabiliamo, per convenzione (vedremo che i modelli più moderni scardinano questa

convenzione che funzionava però benissimo per la teoria dei fluidi elettrici) che la carica fluisca dai punti a potenziale maggiore ai punti a potenziale minore.

E torniamo alla nostra STORIA:

Verso la fine del XVIII secolo Alessandro **Volta** (1745 – 1827) costruì la prima **pila**. Il principio della sua costruzione è semplice: essa si compone di un certo numero di coppe di vetro contenenti acqua mista a poco acido solforico. In ogni coppa due piastre metalliche, una di rame, l'altra di zinco, sono immerse nella soluzione. La piastra di rame di ogni coppa è congiunta con la piastra di zinco della seguente, in modo che soltanto la piastra di zinco della prima e la piastra di rame dell'ultima non sono congiunte [i disegni che si trovano in giro mostrano una pila costruita con dischi di zinco e di rame intervallati da dischi di tessuto imbibito d'acqua sulfurea: un modello più avanzato!].

E' soltanto allo scopo di ottenere un effetto facilmente misurabile che occorre una pila composta di parecchi elementi. Ai fini della discussione del fenomeno un solo elemento basta: servendoci di un elettroscopio si rileva che **il potenziale del rame risulta più elevato di quello dello zinco.**

Abbiamo detto che una differenza di potenziale fra due conduttori viene rapidamente annullata se li congiungiamo mediante un filo metallico, producendo così un flusso di fluido elettrico da un conduttore all'altro. Si applica forse tutto ciò ad una pila voltaica? Nella sua relazione, Volta dichiarò:

LE PIASTRE SI COMPORTANO COME CONDUTTORI DEBOLMENTE CARICHI CHE AGISCONO
INCESSANTEMENTE, OSSIA IN MODO CHE LA LORO CARICA SI RISTABILISCE DA SÉ DOPO OGNI SCARICA;
CHE, IN UNA PAROLA, FORNISCONO UNA CARICA ILLIMITATA, OVVERO PROVOCANO UN'AZIONE O
PROPULSIONE PERPETUA DEL FLUIDO ELETTRICO

La differenza di potenziale perciò permane e perciò, in base alla teoria dei fluidi, essa deve dar luogo ad un flusso permanente del fluido elettrico dal livello di potenziale superiore (rame) a quello inferiore (zinco). Per salvare la teoria dei fluidi potremmo ricorrere alla supposizione che qualche forza costante agisca in modo tale da rigenerare la differenza di potenziale e da mantenere così il flusso del fluido elettrico.

Ma ciò non toglie che il fenomeno nel suo complesso non appaia assai sorprendente dal punto di vista energetico: una notevole quantità di calore si manifesta nel filo conduttore della corrente, al punto da fonderlo se esso è sottile. Assistiamo dunque, apparentemente, alla creazione di energia nel filo, sotto forma di calore. Ma l'intera pila voltaica costituisce un sistema isolato, giacché non vi è nessun apporto di energia da fuori.

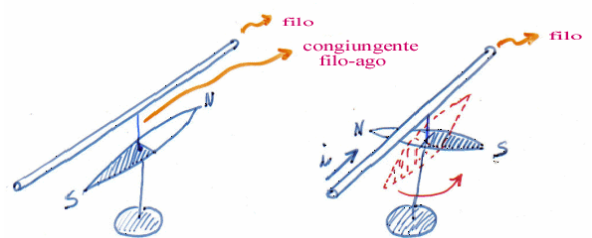
Se vogliamo attenerci alle leggi di conservazione dell'energia dobbiamo scoprire dove avviene la trasformazione e a spese di che cosa c'è creazione di calore. Non è difficile rendersi conto che nella pila si producono processi chimici complessi, processi ai quali il rame, lo zinco e il liquido nel quale sono immersi prendono parte attiva. Dal punto di vista energetico la catena delle trasformazioni che si producono è la seguente:

energia chimica → energia del fluido elettrico in moto, vale a dire della corrente → calore

Una pila voltaica non dura eternamente: esaurita l'energia chimica smette di funzionare.

3.5 La prima grave difficoltà del programma meccanicista

Hans **Oersted** (1777-1851), fisico danese, circa nel 1820, effettuò il seguente esperimento (per il quale servono una pila voltaica, un filo conduttore, un ago magnetico): allacciamo il filo alla piastra di rame; pieghiamo il filo a forma di cerchio e collochiamo al centro un ago magnetico, in modo che filo e ago giacciono nello stesso piano



Congiungiamo ora il filo alla piastra di zinco. Si produrrà immediatamente un fatto strano: l'ago magnetico girerà intorno al suo perno

d'appoggio e cambierà posizione, e si posizionerà ortogonalmente rispetto al piano in cui giaceva prima (quindi "ortogonalmente" al filo)

Nell'immagine è riportata solo la parte dell'apparato contenente l'ago magnetico:

*Quest'esperimento è assai interessante anzitutto perché rivela una relazione fra fenomeni apparentemente diversi: magnetismo e corrente elettrica. Ma l'interesse maggiore deriva da un'altra circostanza: la forza agente fra il polo magnetico e le piccole porzioni del filo attraverso cui passa la corrente non può giacere lungo linee congiungenti il filo e l'ago, ovvero fra le particelle del fluido elettrico in moto nel filo e i dipoli elettrici elementari dell'ago. La **forza** è **perpendicolare** a queste **linee di congiunzione**! Per la prima volta ci troviamo in presenza di una forza completamente diversa da quella cui volevamo ricondurre tutte le azioni del mondo esterno, in base al programma meccanicistico.*

Ma non basta: sessanta anni dopo, Henry Augustus **Rowland** (1848 - 1901), fisico statunitense, realizzò un esperimento che "ci mise il carico da undici":

Immaginiamo una piccola sferetta carica. Immaginiamo inoltre che si muova velocemente lungo una circonferenza, al cui centro si trova un ago magnetico. L'esperimento si basa sullo stesso principio di quello di Oersted e l'unica differenza consiste nel fatto che, in luogo di corrente elettrica, abbiamo una carica elettrica mossa meccanicamente. Rowland constatò lo stesso risultato di Oersted con in più la possibilità di valutare come la deflessione dell'ago fosse legata anche alla velocità della carica in movimento.

Ne risultò che, maggiore è la velocità della carica, maggiore è la deflessione dell'ago dalla posizione originaria. Quindi: non soltanto la forza non giace sulla linea congiungente carica e magnete, ma **l'intensità della forza stessa dipende dalla velocità** e non quindi dalla distanza come voleva il programma meccanicista!

Certo la teoria è ancora salvabile: basterebbe cedere un po' sulle richieste di semplicità delle forze: non basta un piccolo ago magnetico a demolire una teoria che ha portato a tanti successi e che ha basi tanto solide. Un altro attacco ben più vigoroso arriverà ben presto però da un *angolo visuale* del tutto diverso, ma la prima crepa nella struttura c'è.

3.6 Che cos'è la luce?

La maggior parte, nel test d'ingresso, di voi risponde: "la luce è un'onda elettromagnetica"

Tre domande sorgono spontanee:

- 1) cos'è un'onda
- 2) che vuol dire elettromagnetica
- 3) Come ci si è arrivati a dire che la luce è un'onda elettromagnetica

Partiamo dalla fine: è ovvio a tutte/i che asserire che la luce è un'onda significa mandare all'aria il programma meccanicista definitivamente (almeno come programma monolitico e onnicomprensivo!)?

Se avete risposto no allora non sapete cos'è un'onda. Se avete risposto sì comunque non credo sappiate quali esperimenti decretarono tale conclusione. Nel dubbio procederò con ordine e se voi già sapete tutto, sorvolerete!

Innanzitutto la luce, nel vuoto, viaggia ad una velocità impressionante: circa 300.000 Km/s che corrisponde a 1.080.000.000 Km/h! su Wikipedia c'è un modello in scala che mostra come un impulso luminoso viaggi dalla Terra alla Luna in circa 1,2 secondi! L'impostazione del problema di come misurare la **velocità della luce** risale al solito, ottimo, Galilei ma l'esperimento da lui progettato fu realizzato, in maniera efficace, circa 250 anni più tardi da Fizeau. Potete trovare facilmente il rendiconto di tale esperimento.

Il programma meccanicista, essendo fondato su un atomismo dinamico, considera la luce come *fasci di particelle o corpuscoli* emessi dai *corpi luminosi* che viaggiano in **linea retta** (per **raggi**) i quali, colpendo i nostri occhi creano la visione e la *sensazione* di luce.

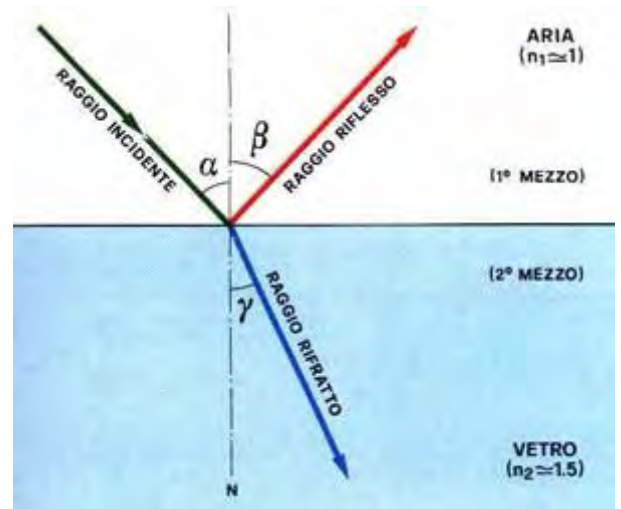
Questo modello di luce permette di spiegare tutti i fenomeni conosciuti sino ad allora:

- ◆ la **riflessione**: un raggio di luce che incide su uno specchio (raggio incidente) viene riflesso seguendo due semplici leggi:

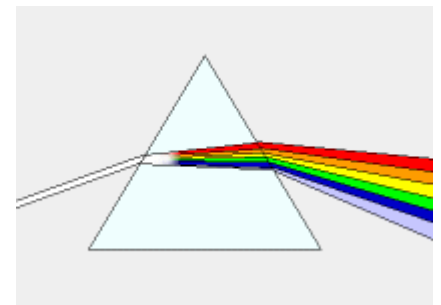
1. raggio incidente, normale allo specchio nel punto d'incidenza e raggio riflesso stanno su di uno stesso piano

2. angolo d'incidenza (angolo formato da raggio incidente e normale) e angolo di riflessione (angolo formato da normale e raggio riflesso)

- ◆ La **rifrazione** (il ben noto fenomeno per cui un remo immerso nell'acqua, sembra piegato è una delle tante manifestazioni della rifrazione) che regola il passaggio di un raggio di luce da un mezzo di propagazione all'altro mediante una legge che vi risparmio che lega angolo d'incidenza angolo di rifrazione alla densità dei rispettivi mezzi (il punto **1** della riflessione viene rispettato anche in questo caso): lo spiego meglio all'interno del punto seguente.



- ◆ La **dispersione** (la divisione della luce solare nei suoi componenti o **colori**). Fu lo stesso Newton a risolvere l'enigma del colore mediante famosi esperimenti con i prismi ottici. L'immagine qui di fianco credo sia nota a tutte/i e, nuovamente, si tratta di un esperimento la cui esecuzione sarebbe molto semplice... L'interessante per noi è sapere che spiegazione diede Newton, in linea con la teoria corpuscolare della luce, di tale fenomeno (Einstein pag. 102): *Newton spiega questo fenomeno ammettendo che tutti i colori siano già presenti nella luce bianca, per cui questa consisterebbe in una miscela di altrettante specie diverse di corpuscoli, quanti sono i diversi colori.*



*Essi traversano lo spazio interplanetario e l'atmosfera all'unisono producendo così l'effetto della luce bianca; ma si separano allorché **rifrangono**, passando per un prisma come quello di Newton perché, secondo la teoria meccanicistica, la rifrazione è dovuta a forze che risiedono nelle particelle vetrose e agiscono sui corpuscoli di luce [le quali forze, già sappiamo dalla lezione 1, modificano la velocità dei corpi su cui agiscono]. Queste forze devono presumersi differenti a seconda dei differenti corpuscoli, le più intense agendo sul violetto e le più deboli sul rosso. Perciò ogni colore viene rifratto on misura diversa ed esce dal prisma separato dagli altri. Nel caso dell'arcobaleno dopo la pioggia le gocce d'acqua presenti nell'aria assumono le funzioni del prisma.*

*Il modello della **luce sostanza** funziona egregiamente in tutti i suddetti casi, ancorché la necessità di ammettere altrettante sostanze quanti sono i colori, ci lasci alquanto perplessi.*

Per vedere come e perché lo si è abbandonata in virtù di un modello ondulatorio dobbiamo capire bene che cos'è un'onda e che caratteristiche peculiari ha, cioè quali **esperimenti** ci permettono di decretare che un certo fenomeno è o non è di tipo ondulatorio.

3.7 Che cos'è un'onda?

Il vento che passa sopra un campo di frumento (stile "Il Gladiatore") produce un'onda che si propaga attraverso l'intero campo. Le piante restano al proprio posto, oscillando attorno alla base del gambo, ma l'onda *viaggia*. Tutte/i, spero, avrete visto le onde circolari che si propagano attorno al punto in cui avete lanciato un sasso nell'acqua ferma. Il moto dell'onda è del tutto diverso dal moto dei singoli volumetti d'acqua i quali si muovono su e giù (o meglio ruotano attorno ad un centro posto sotto il pelo dell'acqua): il moto dell'onda che vediamo propagarsi è quello di uno **stato della materia** e non di materia stessa.

Per comprendere meglio cosa sia un'onda facciamo un esperimento ideale. Supponiamo che nel centro di una stanza sferica piena omogeneamente d'aria vi sia una piccola sfera. Ad un tratto la sfera comincia a pulsare aritmicamente, dilatandosi e contraendosi. Variando cioè di volume, ma conservando la forma sferica. Che cosa accadrà nel mezzo circostante?

*Separiamo i vari momenti: quando **la sfera si dilata** le particelle del mezzo nelle immediate vicinanze della sfera vengono spinte in fuori e in tal modo si forma un guscio sferico di aria la cui densità è superiore a quella degli strati circostanti. Quando **la sfera si contrae**, lo strato d'aria che la circonda più da vicino subisce una diminuzione di densità. Queste variazioni di densità si propagano attraverso l'intero mezzo: si trasmettono da un guscio sferico al guscio successivo. Vengono così ad alternarsi strati più densi e strati meno densi alternati e successivi. In una sorta di grande fisarmonica sferica! Il moto delle particelle costituenti il mezzo consiste soltanto di piccole vibrazioni, mentre **il moto generale è quello di un'onda sferica che avanza progressivamente.***

*La novità essenziale, che per la prima volta abbiamo qui l'occasione di considerare è il **moto di qualche cosa che non è materia, bensì energia, che si muove propagandosi attraverso la materia.***

Basandoci sull'esempio della sfera pulsante cerchiamo di mettere a fuoco tre concetti fondamentali che riguardano l'onda:

La **lunghezza d'onda**: è la distanza che separa una cresta dall'altra nelle onde del mare e un punto di massima densità dall'altro nell'esempio della sfera pulsante.

La **frequenza**: numero di pulsazioni in un secondo, o numero di creste che tagliano un certo traguardo in un secondo

Inverso della frequenza è il **periodo**: il tempo impiegato ad effettuare ciascuna pulsazione (per capirlo pensate ad un caso più concreto: il rapporto fra la frequenza con cui passa un autobus e l'intervallo di tempo fra il passaggio di un autobus e il successivo)

La **velocità di propagazione** dell'onda: è il rapporto fra la lunghezza d'onda e il periodo o il prodotto fra lunghezza d'onda e frequenza. Dipende dal mezzo di propagazione. Nel caso di onde isolate come lo Tsunami coincide con la velocità propria con cui viaggia l'onda.

Il concetto di onda si è mostrato assai fecondo in fisica. Esso è un concetto **prettamente meccanico** [e allora perché dovrebbe scardinare la concezione meccanicista se applicato alla luce? Provate a rispondere da sole/i...] La spiegazione dei **fenomeni acustici** è basata essenzialmente su tale concetto: un corpo vibrante, come una corda di violino, o la corda vocale di un interlocutore propaga nell'aria le sue vibrazioni che poi giungono al nostro orecchio e fanno vibrare il timpano e l'organo dell'udito decodifica tali vibrazioni in pacchetti d'informazione che vanno al nostro cervello e ci portano suoni, rumori, voci, ecc..

Siamo quasi arrivate/i. Ci resta qualche precisazione da fare: abbiamo considerato due tipi di onda differenti: l'**onda del mare** e l'**onda della sfera pulsante**. Cosa distingue tali tipi di onde? Nel primo caso le oscillazioni avvengono (in buona approssimazione) *giù e su* e la direzione di propagazione è ortogonale alla direzione di oscillazione. Nel secondo caso direzione di propagazione e direzione di oscillazione sono parallele.

Le onde per le quali direzione di oscillazione del mezzo e direzione di propagazione dell'onda siano parallele si dicono **onde longitudinali**.

Le onde per le quali direzione di oscillazione del mezzo e direzione di propagazione dell'onda siano ortogonali si dicono **onde trasversali**. Vedremo queste seconde quanto saranno importanti per il nostro discorso...

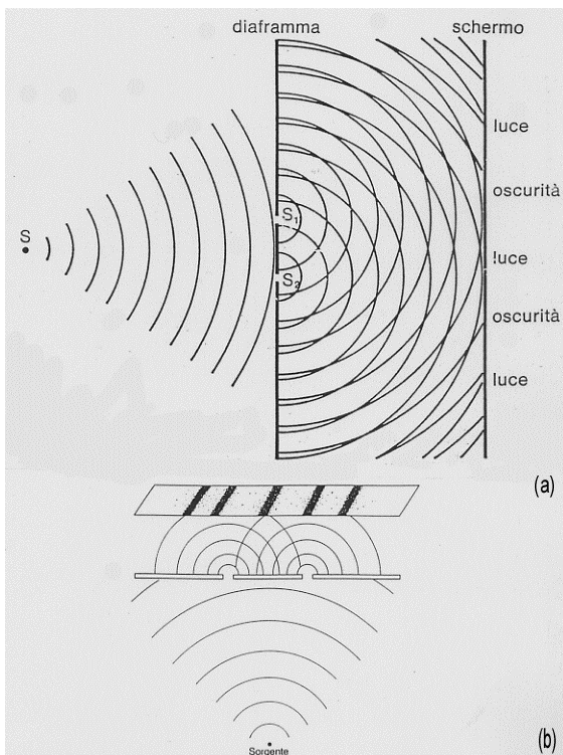
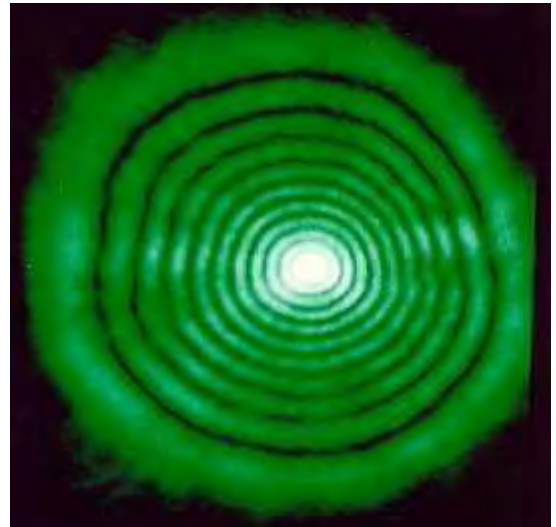
L'ultima osservazione: l'onda prodotta in un mezzo omogeneo da una sfera pulsante è un'**onda sferica**, così chiamata perché in qualsiasi dato istante in tutti i punti situati su uno stesso involucro, attorniante la sorgente del moto, si comportano in modo identico. Tale superficie immaginaria di punti si chiama **fronte d'onda**.

Se consideriamo soltanto un piccolo elemento di un simile involucro sferico, situato a grande distanza dalla sorgente, vediamo che, quanto più è lontano e piccolo tale elemento, tanto più esso somiglia ad una porzione di piano. Cioè che l'onda sia approssimabile ad un'onda **piana**. Come tanti altri modelli fisici il modello di onda piana è ideale, sebbene si accosti con grande approssimazione alla realtà. Esso è, come altri, un modello assai utile, cui dovremo ricorrere più avanti.

3.8 Ma allora la luce è un'onda!

Vorrei arrivare al punto e non lasciarvi in sospeso. Perciò vi chiedo un piccolo atto di fede. Se invece di considerare che la luce si propaghi per raggi come nella teoria meccanicistica, supponiamo si propaghi per onde, i fenomeni caratteristici della luce si spiegano tutti benissimo: basta sostituire al raggio la *direzione di propagazione dell'onda* e fare piccoli aggiustamenti. Sta di fatto che ai tempi di Newton e per oltre cento anni dopo di lui la maggior parte dei fisici preferì la teoria corpuscolare.

Andiamo all'esperimento *clou* che sovvertì questo stato di cose: prendiamo una sorgente puntiforme che emetta una luce intensa e di un solo colore: verde, per esempio. Mettiamola davanti ad uno schermo in cui sia praticato un forellino. Dietro di questo una parete. Cosa vi aspettate di vedere sulla parete? Se il forellino è "grande" vedrete effettivamente un puntino luminoso contornato da un'ombra piuttosto delineata, era questo un esperimento probante del fatto che la luce si propagasse per raggi. Ma se riducete le dimensioni del forellino a, diciamo circa 10^{-6} m, ecco quello che otterrete! Un fenomeno inspiegabile mediante la teoria corpuscolare... Per spiegarlo almeno a larghe linee utilizziamo però un dispositivo diverso: Invece di uno schermo con un forellino prendiamo uno schermo con due forellini ravvicinati. Otterremo una situazione del tipo descritto nel disegno seguente: Sullo schermo appariranno **bande scure** alternate a **bande chiare** (b). Le bande scure corrisponderanno a punti in cui il solco di un'onda passata per *uno* dei forellini incontra la cresta di un'onda passata per *l'altro* forellino: *le due onde si elidono*. Le bande chiare si avranno nei punti in cui la cresta di un'onda passata per *uno* dei forellini incontra la cresta di un'onda passata per *l'altro* forellino: le due onde si *sommano*.



Quest'ultimo fenomeno (somma e elisione di onde) si chiama **interferenza**. Il fatto che le onde passando per un ostacolo di dimensioni confrontabili della propria lunghezza d'onda, cambino forma del proprio fronte o, specularmente, direzione di propagazione, (fenomeno visibile dall'alto nei porti che hanno un'imboccatura stretta) si chiama **diffrazione**.

Diffrazione e interferenza sono fenomeni peculiari unicamente delle onde: **la luce diffrange e interferisce quindi: la luce deve essere un'onda!** Ma qual è il **mezzo di propagazione** della luce !?! L'etere, ovviamente, no?