

**CIRCOLO DI PSICOBIOFISICA
AMICI DI MARCO TODESCHINI**

presenta:

MAXWELL JAMES CLERK



“Padre dell’Elettromagnetismo”

**Sostenitore dell’Etere Cosmico
quale responsabile dei fenomeni
fisici atomici ed astronomici.**

**Dal Volume II di “*Scientific Papers of Maxwell
James Clerk*” il capitolo “Ether” nella versione
italiana ed originale in lingua inglese.**

a cura di
Fiorenzo Zampieri
Circolo di Psicobiofisica
“Amici di Marco Todeschini”

James Clerk Maxwell è stato uno dei più grandi scienziati del diciannovesimo secolo. È meglio conosciuto per la formulazione della teoria dell'elettromagnetismo e per la connessione tra la luce e le onde elettromagnetiche. Ha anche apportato contributi significativi nei settori della fisica, della matematica, dell'astronomia e dell'ingegneria. Considerato da molti il padre della fisica moderna.

SINTESI BIOGRAFICA

MAXWELL James Clerk - Fisico e matematico scozzese (Edimburgo 1831 - Cambridge, 1879). Studiò all'accademia ed all'Università di Edimburgo fino al 1850, indi passò a Cambridge dove si laureò nel 1854. Dal 1856 al 1860 insegnò filosofia naturale ai collegi di Marischal, Aberdeen, e dal 1860 al 1868 fisica ed astronomia al Collegio reale di Londra. Nel 1871 gli venne affidata la cattedra di fisica sperimentale a Cambridge, dove sotto la sua guida vennero predisposti i piani del Laboratorio Cavendish. Una spiccata genialità lo portò ad occuparsi di vari campi della fisica e principalmente di quello della elettricità. Appena quindicenne si fece notare per un metodo meccanico da lui esposto per il tracciamento della ovale di Cartesio; a 18 anni pubblicò uno studio sull'equilibrio dei solidi elastici nel quale pose le basi di una delle più singolari scoperte che fece in seguito, ossia la temporanea doppia rifrazione prodotta nei liquidi viscosi dalla sollecitazione di taglio. Nel 1854 diede un importante saggio di matematica pura in uno studio sulla trasformazione delle superfici soggette a flessione ed è dello stesso anno la pubblicazione della sua prima memoria sulla linea di forza di Faraday relativa a quelle ricerche nel campo elettrico che dovevano portarlo più tardi alle sue grandi ipotesi. Indi si dedicò all'astronomia e venne premiato nel 1859 per uno studio originale sulla stabilità degli anelli di Saturno, fece ricerche sulla percezione dei calori e diede grande sviluppo alla teoria cinetica dei gas enunciando la legge sulla distribuzione della velocità delle molecole di un gas. È del 1864 una sua pubblicazione nella quale appare il primo tentativo di una teoria fisica dell'elettromagnetismo, teoria che venne via via sviluppata per prendere la sua forma più completa nel 1873 nel famoso trattato *Elettricità e Magnetismo*, ossia la *teoria elettromagnetica della luce* con la quale le onde luminose vengono identificate alle onde elettromagnetiche, teoria derivata dalle due famose *equazioni di Maxwell* sui fenomeni elettrici e magnetici, la prima delle quali esprime il fatto che le correnti elettriche ed i campi elettrici variabili producono un campo magnetico mentre dalla seconda deriva il fatto che i campi magnetici variabili generano forze elettromotrici. Di grande importanza sono inoltre *le relazioni di Maxwell*, tra la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica in un dielettrico e la velocità di propagazione di tale onda nel vuoto, la *regola di Maxwell*, secondo la quale un circuito tende sempre a spostarsi nella direzione tale da rendere massimo il flusso magnetico attraverso lo stesso, il *teorema di Maxwell*, sugli spostamenti di un sistema elastico sotto l'azione di forze e sul quale si basa il procedimento per la costruzione della linea d'influenza delle deformazioni.

Egli rimase ancora legato alla teoria classica – ora abbandonata – della propagazione della luce attraverso l'etere cosmico, quel mezzo ineffabile e sfuggente che avrebbe permeato lo spazio vuoto, del quale riuscì a fornire le caratteristiche fisiche.

Le immense regioni interplanetarie e interstellari non verranno piú considerate come spazi deserti dell'universo, che il Creatore non ritenne adatti a essere occupati dai simboli del molteplice ordine del Suo regno. Noi troviamo che essi sono occupati da questo meraviglioso mezzo; di esso sono cosí colmi che nessuna forza umana lo può rimuovere dalla piú piccola parte dello spazio, né può produrre la piú piccola incrinatura nella sua continuità infinita. Esso si estende uguale da stella a stella; e quando su Sirio una molecola di idrogeno vibra, il mezzo ne riceve gli impulsi, e dopo averli portati in seno per tre anni, li consegna tutti a tempo debito, e nello stesso ordine, nello spettroscopio di Huggins, a Tulse Hill.

Ma il mezzo svolge altre funzioni e operazioni oltre a quelle di portare la luce da un uomo all'altro, e da un mondo all'altro, e di dar rilievo all'unità assoluta del sistema metrico dell'universo. Le sue parti piú piccole possono avere un movimento rotatorio oltre che vibratorio, e gli assi di rotazione formano quelle linee di forza magnetica che si estendono senza soluzione di continuità in regioni in cui nessun occhio è mai penetrato, e che, per mezzo della loro azione sui nostri magneti, ci raccontano, in un linguaggio che non è ancora stato interpretato, quello che avviene da un minuto all'altro e da un secolo all'altro nelle viscere della terra.

Inoltre queste linee non devono essere considerate semplici astrazioni matematiche. Sono le direzioni nelle quali il mezzo esercita una tensione simile a quella di una fune, o, piuttosto, simile a quella dei nostri muscoli. La tensione del mezzo nella direzione della forza magnetica terrestre è in questa regione uguale a 0,9 milligrammi per

millimetro quadrato. In alcuni esperimenti di Joule il mezzo esercitava una tensione di 14 chilogrammi per centimetro quadrato.

Ma il mezzo, per la stessa identica elasticità che gli permette di trasmettere le vibrazioni ondulatorie della luce, è anche capace di agire come una molla. Quando sia opportunamente sollecitato, esercita una tensione — diversa dalla tensione magnetica — per mezzo della quale esso fa unire dei corpi elettrizzati di segno opposto, fa propagare perturbazioni lungo i fili telegrafici, e quando sia di intensità sufficiente dà origine a quelle scintille ed esplosioni chiamate fulmini.

Queste sono alcune delle proprietà finora scoperte, di ciò che spesso è stato chiamato vuoto o addirittura nulla. Esse ci permettono di risolvere alcuni tipi di azione a distanza in azioni tra parti contigue di una sostanza continua. Se questa risoluzione abbia i caratteri di un esplicitare o viceversa di un complicare, è un problema che lascerò ai filosofi.

2. Etere

Etere (*αἰθήρ* probabilmente da *αἶθω*, brucio, quantunque Platone nel *Cratilo* (410, b) derivi il nome dal suo perenne movimento: *ὅτι αἰεὶ θεῖ περὶ τὸν αἶρα ῥέων, αἰθερὸς δικαίως ἂν καλοῖτο* — poiché sempre scorre intorno all'aria correndo — sarebbe stato giusto chiamarlo *αἰθερήρ*): una sostanza materiale di natura più evanescente dei corpi visibili, che si suppone esista nelle parti dello spazio apparentemente vuote.

L'ipotesi di un etere è stata sostenuta da diversi pensatori per ragioni molto differenti. Per coloro che sostenevano l'esistenza di un pieno come principio filosofico, l'orrore della natura per il vuoto era una ragione sufficiente per immaginare un etere che pervade ogni cosa, anche se tutte le prove fossero contro di esso. Per Descartes, che fece dell'estensione l'unica proprietà essenziale della materia, e della materia una condizione necessaria dell'estensione, il solo fatto

che esistano dei corpi distanti l'uno dall'altro provava l'esistenza di un mezzo continuo interposto.

Ma a parte queste alte istanze metafisiche a favore di un mezzo, gli eteri erano chiamati a svolgere le funzioni piú diverse. Vennero immaginati eteri per farvi navigare i pianeti, per dar corpo ad atmosfere elettriche ed effluvi magnetici, per trasmettere le sensazioni da una parte del corpo all'altra, e cosí via, fino a un punto in cui tutto lo spazio si trovò riempito tre o quattro volte di eteri. Soltanto ricordando l'ampia e nociva influenza che le ipotesi intorno all'etere esercitarono in altri tempi sulla scienza, possiamo capire l'ostilità per ogni sorta di etere concepita dagli intelletti piú rigorosi del diciottesimo secolo e che si ritrova, probabilmente per una specie di pregiudizio trasmesso ereditariamente, ancora in John Stuart Mill.

I discepoli di Newton affermavano che l'attrazione reciproca dei corpi pesanti, secondo la legge di Newton, ne spiegava completamente anche sul piano quantitativo i movimenti; ed essi cercarono di procedere sulla strada aperta da Newton, studiando e misurando le attrazioni e repulsioni dei corpi elettrizzati e magnetici, nonché le forze di coesione all'interno dei corpi, senza cercare di dare una spiegazione della natura di queste forze.

Newton stesso, tuttavia, fece dei tentativi per spiegare la gravità mediante differenze di pressione in un etere; ma non pubblicò la sua teoria "perché in base agli esperimenti e alle osservazioni non era riuscito a rendere ragione in maniera soddisfacente di questo mezzo e del modo in cui esso produce i principali fenomeni naturali".

D'altra parte, coloro che immaginarono un etere per spiegare dei fenomeni non furono in grado né di specificare la natura del movimento di questi mezzi, né di dimostrare che, cosí concepiti, essi producessero gli effetti in vista dei quali erano stati escogitati. Il solo etere che è sopravvissuto fino a noi è quello immaginato da Huygens per spiegare la propagazione della luce. Le prove a favore di un etere che veicola la luce sono andate accumulandosi a mano a mano che venivano scoperti nuovi fenomeni luminosi e altri tipi di

radiazioni; si è inoltre scoperto che le proprietà di questo mezzo, quali si deducono dai fenomeni luminosi, sono esattamente quelle necessarie per spiegare i fenomeni elettromagnetici.

FUNZIONE DELL'ETERE NELLA PROPAGAZIONE DELLA RADIAZIONE Darremo altrove per esteso le prove a favore della teoria ondulatoria della luce; ma dato che essa ha attinenza con il problema dell'etere sarà utile riassumerla qui.

Per mezzo del fenomeno dell'interferenza si può dimostrare che la luce non è una sostanza. Un raggio di luce proveniente da un'unica sorgente viene diviso con metodi ottici in due parti, che dopo aver viaggiato lungo percorsi differenti, vengono fatte riunire e fatte cadere su uno schermo. Se si intercetta una delle due metà del raggio, l'altra metà, cadendo da sola sullo schermo, lo illumina uniformemente; se invece tutte e due le parti del raggio originario vengono fatte passare e fatte cadere sullo schermo, questo apparirà in alcuni punti scuro, ciò che dimostra che le due porzioni di luce si sono reciprocamente distrutte.

Ora noi non possiamo ammettere che due corpi, messi insieme, possano annullarsi a vicenda; la luce non può quindi essere una sostanza. L'esperimento dimostra che una parte di luce può essere esattamente l'opposto di un'altra parte, proprio come $+a$ è esattamente l'opposto di $-a$, qualunque cosa sia a . Tra le quantità fisiche ne troviamo alcune il cui segno può essere invertito, mentre per altre ciò non è possibile. Così uno spostamento in una direzione è esattamente il contrario di un uguale spostamento nella direzione opposta. Queste quantità non sono misure di sostanze, bensì sempre misure di processi che hanno luogo in una sostanza. Arriviamo quindi alla conclusione che la luce non è una sostanza, e che il processo che si svolge in una delle due parti del raggio di luce è sempre esattamente l'opposto di quello che si svolge nell'altra in quello stesso istante, di modo che quando le due porzioni vengono riunite non si svolge più nessun processo. Per determinare la natura del processo della radiazione della luce, noi modifichiamo la lunghezza del percorso di una

o di entrambe le porzioni del raggio: troviamo così che la luce si estingue quando la differenza di lunghezza dei due percorsi è un multiplo dispari di un certo piccolo valore chiamato semi-lunghezza d'onda. In tutti gli altri casi vi è una maggiore o minore quantità di luce; in particolare, quando i due percorsi sono uguali, o quando la loro differenza è un multiplo di un'intera lunghezza d'onda, lo schermo appare quattro volte più luminoso di quando viene colpito da una sola delle due porzioni del raggio. Nella forma in cui si realizza solitamente l'esperimento queste diverse possibilità si verificano contemporaneamente in punti diversi dello schermo, in modo che vediamo su di esso una serie di frange formate da bande equidistanti alternate a bande luminose.

Se consideriamo quello che in un dato istante avviene in due punti disposti sull'asse di un raggio di luce, troveremo che se la distanza tra i punti considerati è multipla della lunghezza d'onda in essi avviene lo stesso processo, mentre se la distanza è un multiplo dispari della semilunghezza d'onda, il processo che si svolge in un punto è esattamente l'opposto di quello che avviene nell'altro punto.

Ora, noi sappiamo che la luce si propaga con una certa velocità ($3,004 \times 10^{10}$ centimetri al secondo nel vuoto, secondo Cornu). Quindi, se immaginiamo un punto mobile che si sposti lungo il raggio a questa velocità, troveremo che lo stesso processo si svolge in ogni punto del raggio non appena il punto in movimento vi arriva. Se, invece, consideriamo un punto fisso sull'asse del raggio, osserveremo un rapido alternarsi di questi opposti processi, e l'intervallo di tempo tra processi simili è il tempo che la luce impiega a percorrere la distanza di una lunghezza d'onda.

Questi fenomeni si possono riassumere nell'espressione matematica

$$u = A \cos(mt - px + \alpha)$$

che ci dà u , l'ampiezza del processo, alla distanza x da un punto fisso sul raggio, al momento t .

Finora non abbiamo stabilito nulla circa la natura del processo. Potrebbe trattarsi di uno spostamento, o di una rotazione, o di un

disturbo elettrico, o in fondo di qualsiasi quantità fisica suscettibile di assumere sia valori negativi che valori positivi. Il processo che si svolge in un punto fisso, qualunque sia la sua natura, purché lo si possa esprimere con una equazione di questa forma, si chiama *vibrazione*; la costante A prende il nome di *ampiezza*; il tempo $2\pi/n$ quello di *periodo*; infine $nt - px + a$ è l'angolo di fase.

La configurazione a un dato istante viene chiamata *onda* e la distanza $2\pi/p$ si chiama lunghezza d'onda. La velocità di propagazione è n/p . Quando le diverse parti di un mezzo subiscono lo stesso processo una di seguito all'altra, usiamo la parola "ondulatorio" per indicare questo aspetto del processo, senza nulla implicare circa la sua natura fisica.

Un ulteriore aspetto della natura fisica del processo ci è rivelato dal fatto che se i due raggi sono polarizzati e si fa ruotare il piano di polarizzazione di uno di essi attorno all'asse del raggio, quando i due piani di polarizzazione sono paralleli compaiono gli stessi fenomeni di interferenza descritti più sopra. Facendo ruotare ulteriormente uno dei due piani di polarizzazione, le bande chiare e scure diventano meno distinte, e quando i due piani vengono a trovarsi in posizione ortogonale l'illuminazione dello schermo diventa uniforme, e nessuna traccia di interferenza è più rivelabile.

Quindi non solo il processo fisico implicato nella propagazione della luce deve essere una quantità orientata nello spazio o un vettore del quale si può invertire la direzione, ma questo vettore deve essere ortogonale al raggio, e situato o sul piano di polarizzazione o perpendicolare a esso. Fresnel suppose che si trattasse di un'oscillazione del mezzo perpendicolarmente al piano di polarizzazione; Maccullagh e Neumann, invece, di un'oscillazione nel piano di polarizzazione. Bisogna rimandare il confronto tra queste due teorie alla trattazione dei fenomeni dei mezzi densi.

Potrebbe però trattarsi di un processo elettromagnetico; in questo caso, poiché oscillazione elettrica e disturbo magnetico sono perpendicolari l'uno all'altro, ciascuno dei due può essere immaginato come verificantesi sul piano di polarizzazione.

Tutto quanto si è detto nei confronti delle radiazioni che impressionano i nostri occhi, e che noi chiamiamo luce, vale anche per quelle radiazioni che non producono in noi un'impressione luminosa; sono stati infatti osservati i fenomeni di interferenza, e misurate le lunghezze d'onda, anche nel caso di quelle radiazioni che si possono cogliere solo per i loro effetti termici o chimici.

ELASTICITÀ, TENACITÀ E DENSITÀ DELL'ETERE. Dopo aver determinato le caratteristiche geometriche del processo, dobbiamo rivolgere la nostra attenzione al mezzo in cui esso ha luogo. Possiamo usare il termine etere per indicare questo mezzo, qualunque esso sia.

In primo luogo esso è capace di trasmettere energia. Le radiazioni che esso trasmette possono non solo agire sui nostri sensi, ciò che basta da solo a indicare che un certo lavoro è stato compiuto, ma possono anche riscaldare i corpi che le assorbono; e misurando il calore trasmesso a questi corpi, si può calcolare l'energia della radiazione.

In secondo luogo questa energia non è trasmessa istantaneamente dal corpo irradiante al corpo assorbente, ma si trova per un certo tempo nel mezzo.

Se adottiamo la teoria ondulatoria nella formulazione di Fresnel o in quella di Maccullagh, metà di questa energia è in forma di energia potenziale, per la deformazione delle porzioni elementari del mezzo, e metà in forma di energia cinetica, per il movimento del mezzo. Dobbiamo quindi ritenere che l'etere possieda un'elasticità analoga a quella dei corpi solidi e abbia inoltre una densità finita. Se prendiamo il valore di 1,7633 calorie, calcolato da Pouillet per la quantità di calore prodotta dalla luce solare diretta su un centimetro quadrato in un minuto, troviamo che equivale a $1,234 \times 10^6$ erg il secondo. Dividendo questo valore per $3,004 \times 10^{10}$, che è la velocità della luce in centimetri il secondo, troviamo che l'energia in un centimetro cubo è $4,1 \times 10^{-5}$ erg. In vicinanza del sole l'energia in un centimetro cubo sarebbe circa 46000 volte maggiore, cioè 1,886 erg. Se poi ammettiamo, con W. Thomson che l'ampiezza

non sia maggiore di un centesimo della lunghezza d'onda, noi abbiamo $Ap = 2\pi/100$, ossia circa $1/16$; abbiamo quindi:¹

energia per centimetro cubo	$= \frac{1}{2}\rho V^2 A^2 p^2 = 1,886$ erg
sforzo tangenziale massimo per cm^2	$= \rho V^2 Ap = 30,176$ dine
coefficiente di rigidità dell'etere	$= \rho V^2 = 842,8$
densità dell'etere	$= \rho = 9,36 \times 10^{-19}$.

Il coefficiente di rigidità dell'acciaio è circa 8×10^{11} e quello del vetro $2,4 \times 10^{11}$.

Se la temperatura dell'atmosfera fosse ovunque 0°C , e se l'atmosfera fosse in equilibrio tutt'attorno alla terra supposta in quiete, la sua densità a una distanza infinita dalla terra sarebbe 3×10^{-346} , cioè circa $1,8 \times 10^{327}$ volte minore della densità calcolata dell'etere. Nelle regioni dello spazio interplanetario la densità dell'etere è quindi molto grande in confronto a quella dell'atmosfera, molto rarefatta, dello spazio interplanetario, mentre la massa di tutto l'etere racchiuso in una sfera di raggio pari a quello [dell'orbita] del più lontano pianeta è molto piccola rispetto alla massa del pianeta stesso.²

L'ETERE DISTINTO DALLA MATERIA ORDINARIA Quando la luce viaggia attraverso l'atmosfera, è evidente che il mezzo attraverso il quale essa si propaga non è l'aria in sé, in primo luogo perché l'aria non può trasmettere vibrazioni trasversali, e poi perché le normali vibrazioni trasmesse dall'aria viaggiano circa un milione di volte più lentamente della luce. I corpi solidi trasparenti, come il vetro e i cristalli, sono indubbiamente capaci di trasmettere vibrazioni trasversali, ma con una velocità di trasmissione che è ancora centinaia di migliaia di volte minore di quella con cui la luce viene trasmessa attraverso questi corpi. Siamo quindi costretti a supporre che il mezzo attraverso cui si propaga la luce sia qualcosa di distinto dai

¹ [I numeri in questa colonna sono calcolati in modo inesatto dai dati. Dovrebbero essere, nell'ordine: 1,886; 60,352; 965,632; $1,07 \times 10^{-18}$.]

² W. THOMSON, in Trans. roy. Soc. Edinb., Edinburgo, vol. 21, p. 60.

mezzi trasparenti che conosciamo, sebbene compenetri tutti i corpi trasparenti e probabilmente anche quelli opachi.

La velocità della luce, tuttavia, è divisa nei diversi mezzi trasparenti e dobbiamo quindi supporre che questi mezzi prendono parte in qualche modo al processo, e che le loro particelle vibrino come quelle dell'etere, ma l'energia di vibrazione delle particelle della materia ordinaria deve essere molto più piccola di quella dell'etere, perché altrimenti, quando un raggio passa dal vuoto al vetro o dal vetro al vuoto, dovrebbe venir riflessa una parte molto maggiore di luce incidente di quanto effettivamente non accada.

MOVIMENTO RELATIVO DELL'ETERE Bisogna quindi considerare l'etere all'interno dei corpi densi come qualcosa che ha un legame debole con i corpi densi stessi, e vedere se questi corpi densi, quando si muovono attraverso il grande oceano dell'etere, trasportano con sé l'etere che contengono, o se invece l'etere li attraversa come l'acqua del mare passa tra le maglie di una rete trascinata da una barca. Se fosse possibile determinare la velocità della luce in base al tempo che essa impiega a viaggiare sulla superficie terrestre da una stazione ad un'altra, potremmo determinare la velocità dell'etere rispetto a queste stazioni terrestri confrontando la velocità della luce in direzioni opposte.

Purtroppo tutti i metodi per determinare la velocità della luce per mezzo di esperimenti compiuti sulla terra, si basano su misurazioni del tempo richiesto per compiere il doppio tragitto da una stazione all'altra e ritorno, e l'aumento di questo tempo a causa della velocità relativa dell'etere, che è uguale alla velocità di rotazione della terra sulla sua orbita, sarebbe soltanto la centomilionesima parte dell'intero tempo di trasmissione, e sarebbe perciò assai difficilmente rilevabile.

La teoria del movimento dell'etere ha a mala pena uno sviluppo sufficiente a permetterci la formulazione di una teoria matematica rigorosa dell'aberrazione della luce, che tenga conto del movimento dell'etere. Stokes, tuttavia, basandosi su un'ipotesi molto probabile

riguardo al movimento dell'etere, ha dimostrato che quest'ultimo non influenzerebbe sensibilmente il valore dell'aberrazione.

Il solo metodo possibile per determinare direttamente la velocità relativa dell'etere rispetto al sistema solare è di confrontare i valori della velocità della luce calcolati dall'osservazione delle eclissi dei satelliti di Giove, quando Giove e la Terra si trovano in punti pressoché opposti dell'eclittica.

Arago ha proposto di confrontare le deviazioni prodotte nel raggio di luce di una stella dall'attraversare un prisma acromatico, con valori diversi dell'angolo tra la direzione del raggio entro il prisma e la direzione di rotazione orbitale della terra. Se l'etere si muovesse rapidamente attraverso il prisma, ci si dovrebbe aspettare una deviazione diversa quando la direzione della luce è la stessa di quella dell'etere e quando le due direzioni sono opposte.

L'autore¹ ha realizzato l'esperimento in un modo più pratico usando uno spettroscopio ordinario, in cui uno specchio piano sostituisce la fessura del collimatore. I fili a croce nel telescopio osservatore venivano illuminati. Da ogni punto del filo un fascio di raggi di luce paralleli passava attraverso l'obiettivo e i prismi fino a cadere sull'obiettivo del collimatore, andava a fuoco sullo specchio, dove veniva riflessa, e dopo essere nuovamente passata attraverso l'obiettivo, formava un fascio che passava attraverso ciascuno dei prismi parallelamente alla sua direzione originale, in modo che l'obiettivo del telescopio osservatore la metteva a fuoco in corrispondenza del punto dei fili metallici incrociati da cui era partita. Poiché l'immagine coincideva con l'oggetto non la si poteva osservare direttamente, ma deviando il raggio con una riflessione parziale su una superficie piana di vetro, si trovò che si riusciva a vedere nitidamente l'immagine del più sottile dei reticoli, sebbene la luce che la formava fosse passata due volte attraverso tre prismi di 60 gradi. L'apparecchio veniva dapprima orientato in modo che la luce, quando passava per la prima volta attraverso il secondo prisma

¹ Phil. Trans., vol. 158, 532 (1868).

avesse la stessa direzione del moto della terra nella sua orbita. Successivamente veniva orientato in modo che la direzione della luce fosse opposta a quella del moto della terra. Se durante il primo percorso la deviazione del raggio a opera del prisma aumentava o diminuiva per questa ragione, sarebbe di converso diminuita o aumentata nel percorso di ritorno, e l'immagine sarebbe apparsa al lato dell'oggetto. Orientando l'apparato in direzione opposta l'immagine sarebbe apparsa dall'altro lato. L'esperimento è stato eseguito in diversi momenti dell'anno, ma si sono ottenuti soltanto risultati negativi. Tuttavia non possiamo da ciò concludere in via definitiva che l'etere in vicinanza della superficie terrestre viene trasportato con la terra lungo la sua orbita, in quanto è stato dimostrato da Stokes¹ che secondo l'ipotesi di Fresnel il rapporto tra le velocità relative dell'etere all'interno del prisma e al suo esterno sarebbe inversamente proporzionale al quadrato dell'indice di rifrazione, e che in questo caso, perciò, la deviazione non sarebbe sensibilmente modificata a causa del movimento del prisma attraverso l'etere.

Fizeau, tuttavia, osservando il cambiamento del piano di polarizzazione della luce trasmessa obliquamente attraverso una serie di lastre di vetro, ha ottenuto dei dati che ha ritenuto dimostrativi di una differenza nei risultati quando venga mutata la direzione del raggio nello spazio,² e Ångström ha ottenuto risultati analoghi per diffrazione. Non mi risulta che alcuno di questi difficilissimi esperimenti sia stato ripetuto e confermato.

In un altro esperimento, che sembra più probante, Fizeau ha osservato che in una corrente d'acqua la luce si propaga con velocità maggiore nella direzione del moto del liquido che nella direzione opposta, mentre il fenomeno non si verifica sostituendo l'acqua con aria. Questo esperimento sembra confermare la teoria di Fresnel sull'etere; ma l'intera questione dello stato del mezzo di trasmissione della luce attorno alla terra, e dei suoi rapporti con la materia ordinaria, è per ora ben lontano dall'essere risolto.

¹ *Phil. Mag.* (Londra 1846) p. 53.

² *Ann. Chim. (Phys.)*, Parigi, febbraio 1860.

FUNZIONE DELL'ETERE NEI FENOMENI ELETTROMAGNETICI Faraday ha supposto che lo stesso mezzo che è interessato nella propagazione della luce potrebbe essere l'elemento attivo nei fenomeni elettromagnetici. "Per parte mia — egli afferma — considerando il rapporto tra la forza magnetica e il vuoto e i caratteri generali dei fenomeni magnetici esterni al magnete, sono più favorevole all'idea che all'esterno del magnete esista un'azione di trasmissione della forza, piuttosto che all'idea che gli effetti siano soltanto attrazione e repulsione a distanza. Un'azione di questo tipo potrebbe essere esercitata dall'etere; non è infatti improbabile che l'etere, qualora esista, abbia altre funzioni oltre a quella di trasmettere semplicemente le radiazioni."¹ Questa ipotesi ha ricevuto solo delle conferme dalle ricerche successive.

Vi sono due generi di energia elettrica, quella elettrostatica e quella elettrocinetica. Abbiamo motivi per ritenere che la prima dipenda da una proprietà del mezzo, in virtù della quale uno spostamento elettrico suscita una forza elettromotrice in direzione opposta, e la forza elettromotrice per spostamento unitario è inversamente proporzionale alla capacità induttiva specifica del mezzo.

L'energia elettrocinetica, invece, non è altro che l'energia del movimento suscitato nel mezzo da correnti elettriche e da magneti, movimento che non è limitato ai fili che trasportano la corrente, ma esiste ovunque si può riscontrare una forza magnetica.

TEORIA ELETTROMAGNETICA DELLA LUCE Le proprietà del mezzo elettromagnetico sono perciò, per quanto abbiamo visto, simili a quelle del mezzo in cui viaggia la luce; ma il modo migliore per fare un confronto è di determinare la velocità con cui un disturbo elettromagnetico si propaga attraverso il mezzo. Se questa fosse uguale alla velocità della luce, avremmo forti ragioni per pensare che i due mezzi, che intanto occupano lo stesso spazio, sono in realtà identici. I dati per questo calcolo sono presi dagli esperimenti

¹ Experimental Researches, 3075.

fatti per confrontare il sistema di unità elettromagnetico con quello elettrostatico. La velocità di propagazione di un disturbo elettromagnetico nell'aria, calcolata in base a diverse serie di dati, non differisce dalla velocità della luce nell'aria, calcolata da diversi osservatori, più di quanto non differiscano tra loro i diversi valori calcolati per queste quantità.

Se la velocità di propagazione di un disturbo elettromagnetico è uguale a quella della luce in altri mezzi trasparenti, allora in mezzi non magnetici la capacità induttiva specifica dovrebbe essere uguale al quadrato dell'indice di rifrazione.

Boltzmann ha trovato che per i gas da lui esaminati questa legge è rigorosamente vera.¹ I liquidi e i solidi, invece, si discostano di più da questa legge, ma non possiamo aspettarci di ottenere una verifica sia pure approssimativa quando dobbiamo confrontare i risultati dei nostri lenti esperimenti elettrici con le vibrazioni della luce, che avvengono miliardi di volte al secondo.

La teoria ondulatoria, in quanto tratta i fenomeni luminosi come movimenti di un solido elastico, incontra ancora numerose difficoltà.²

La prima e la più importante di queste è che secondo questa teoria possono esservi movimenti ondulatori consistenti in vibrazioni ortogonali alla superficie dell'onda. Il solo modo di spiegare perché i fenomeni ottici che queste onde provocherebbero non avvengono è di ammettere che l'etere è incompressibile.

Un'altra difficoltà è che, mentre i fenomeni di riflessione si spiegano meglio con l'ipotesi che le vibrazioni sono perpendicolari al piano di polarizzazione, quelli di doppia rifrazione richiedono l'ipotesi che le vibrazioni avvengano sul piano stesso.

La terza difficoltà è che, per spiegare perché in un cristallo a doppia rifrazione la velocità dei raggi polarizzati in ognuno dei piani principali è la stessa, dobbiamo ammettere delle relazioni molto macchinose tra i coefficienti di elasticità.

¹ Wiener Sitzb., 23 aprile 1874.

² STOKES, *Report on Double Refraction*, British Ass. Report (1862) p. 253.

La teoria elettromagnetica della luce soddisfa tutte queste condizioni con la sola ipotesi che lo spostamento elettrico è perpendicolare al piano di polarizzazione.¹ Non può esistere alcuno spostamento ortogonale, e si ammette che nei cristalli a doppia rifrazione la capacità dielettrica specifica per ciascun asse principale è uguale al quadrato dell'indice di rifrazione di un raggio perpendicolare a quell'asse, e polarizzato in un piano anch'esso perpendicolare a quell'asse. Boltzmann ha trovato che queste relazioni sono approssimativamente vere nel caso dello zolfo cristallizzato, una sostanza cristallina a tre assi disuguali.² La capacità dielettrica specifica per questi assi è rispettivamente: 4,773; 3,970; 3,811; i quadrati degli indici di rifrazione sono: 4,576; 3,886; 3,591.

COSTITUZIONE FISICA DELL'ETERE Qual è la struttura elementare dell'etere? È molecolare o continua?

Sappiamo che l'etere trasmette delle vibrazioni trasversali a grandissima distanza senza una sensibile perdita di energia per dispersione. Un mezzo molecolare, se si muove in condizioni tali che le molecole che si trovano vicine rimangono tali durante tutto il moto, riesce probabilmente a trasmettere vibrazioni senza molta dispersione di energia; se invece il movimento è tale che la disposizione spaziale dei gruppi di molecole non viene solo lievemente modificata ma completamente sconvolta, e si formano nuovi raggruppamenti, nel passaggio da una disposizione all'altra l'energia delle vibrazioni regolari verrà dispersa nell'agitazione irregolare che chiamiamo calore.

Non possiamo quindi supporre che la costituzione dell'etere sia simile a quella di un gas, in cui le molecole sono sempre in agitazione irregolare, poiché in un mezzo simile un movimento ondula-

¹ H. A. LORENTZ, *Over de theorie der terugkaatsing en breking van het licht*, Academisch Proefschrift, K. van der Zande, Arnhem 1875.

² L. BOLTZMANN, *Über die Verschiedenheit der Dielektrizitätskonstante des kristallisierten Schwefels nach verschiedenen Richtungen*, Wiener Sitzb., ottobre 1874.

torio trasversale si riduce a meno di un cinquecentesimo della sua ampiezza nello spazio di una sola lunghezza d'onda. Se l'etere è molecolare, il tipo di raggruppamento delle molecole deve rimanere costante e la disposizione dei raggruppamenti deve essere modificata solo lievemente durante il movimento.

S. Tolver Preston ha avanzato l'ipotesi che l'etere sia un gas le cui molecole vengono a contatto molto raramente tra loro, in modo che il loro cammino libero medio sia molto più grande delle distanze interplanetarie.¹ Egli non ha studiato in modo completo le proprietà di un tale mezzo, ma è facile vedere che potremmo formulare una teoria in cui le molecole non vengono *mai* a contatto durante i loro spostamenti, pur muovendosi in tutte le direzioni con la velocità della luce; inoltre se supponiamo che i corpi in vibrazione possono imprimere a queste molecole una qualche proprietà vettoriale (come la rotazione attorno a un asse) che non interferisca con il moto di traslazione, e che quindi resti legata alle molecole, e se la variazione ciclica del valore medio di questo vettore per tutte le molecole entro un elemento di volume è il processo che chiamiamo luce, allora le equazioni che esprimono questa media avranno la stessa forma di quelle che esprimono lo spostamento nella teoria ordinaria.

Si afferma spesso che il semplice fatto che un mezzo è elastico o compressibile prova che il mezzo non è continuo, ma è composto di parti separate da spazio vuoto. Ma non contrasta affatto con l'esperienza il supporre che elasticità e compressibilità siano proprietà di ogni parte, per quanto piccola, in cui si può immaginare suddiviso il mezzo, nel qual caso il mezzo sarebbe rigorosamente continuo. Un mezzo, tuttavia, sebbene omogeneo e continuo quanto alla densità, può essere reso eterogeneo dal suo movimento, come nell'ipotesi di W. Thomson dei vertici di molecole in un liquido perfetto.²

L'etere, se è il mezzo dei fenomeni elettromagnetici, è probabilmente molecolare, almeno in questo senso.

¹ *Phil. Mag.*, Londra, settembre e novembre 1877.

² J. C. MAXWELL, *The Scientific Papers*, Cambridge 1890.

Sir W. Thomson¹ ha dimostrato che l'influenza magnetica sulla luce, scoperta da Faraday, dipende dalla direzione del moto delle particelle, e indica un movimento rotatorio nel mezzo magnetizzato.²

Ora, è evidente che non può trattarsi della rotazione globale del mezzo attorno a un asse, poiché il campo magnetico può avere qualsiasi ampiezza, e non vi è prova che esista un movimento la cui velocità aumenti con l'aumentare della distanza da una ben precisa linea fissa in quel campo. Se vi è un movimento di rotazione, deve trattarsi di una rotazione di porzioni molto piccole del mezzo, ciascuna attorno al proprio asse, cioè il mezzo deve essere diviso in un gran numero di vortici molecolari.

Non possediamo per ora alcun dato con cui determinare la grandezza o il numero di questi vortici molecolari. Sappiamo tuttavia che la forza magnetica nella regione situata in vicinanza di un magnete si mantiene fintantoché il ferro rimane magnetizzato, e poiché non abbiamo ragioni per credere che un magnete perderebbe completamente la sua magnetizzazione con il semplice passare del tempo, concludiamo che i vortici molecolari non richiedono un consumo continuo di lavoro per mantenere il loro movimento, che perciò non necessariamente implica dispersione di energia.

Non è stata finora elaborata alcuna teoria dell'etere che spieghi perché questo sistema di vortici molecolari si mantiene per un tempo indefinito senza che la loro energia sia un po' alla volta dispersa in quel movimento irregolare del mezzo, che nei mezzi ordinari si chiama calore.

Per quante difficoltà possiamo incontrare nella formulazione di una valida teoria della struttura dell'etere, non vi può essere dubbio che gli spazi interplanetari e interstellari non sono vuoti, ma sono occupati da una sostanza o corpo materiale, che è certamente il corpo più esteso e probabilmente il più uniforme che si conosca.

¹ Proc. roy. Soc., Londra, giugno 1856.

² Vedi anche J. C. MAXWELL, *Electricity and Magnetism*, Encyclopaedia Britannica, art. 806.

Se questa vasta e omogenea estensione di materia isotropa oltre a essere un mezzo di interazione fisica tra corpi distanti, e ad avere altre funzioni fisiche, delle quali forse non abbiamo ancora alcuna idea, costituisca anche, come sembrano pensare gli autori di *Unseen Universe*, l'organismo materiale di esseri dotati di vita e di intelligenza altrettanto elevate o piú elevate delle nostre attuali, è un problema che va molto al di là dei limiti di una teoria fisica.

XCVII. *Ether.*

ETHER, or ÆTHER (*αἰθήρ*, probably from *αἶθω*, I burn, though Plato in his *Cratylus* (410, b) derives the name from its perpetual motion—*ὅτι αἰεὶ θεῖ περὶ τὸν ἀέρα ῥέων, αἰεθεῖρ δὲ δικαίως αὖ καλοῖτο*), a material substance of a more subtle kind than visible bodies, supposed to exist in those parts of space which are apparently empty.

The hypothesis of an æther has been maintained by different speculators for very different reasons. To those who maintained the existence of a plenum as a philosophical principle, nature's abhorrence of a vacuum was a sufficient reason for imagining an all-surrounding æther, even though every other argument should be against it. To Descartes, who made extension the sole essential property of matter, and matter a necessary condition of extension, the bare existence of bodies apparently at a distance was a proof of the existence of a continuous medium between them.

But besides these high metaphysical necessities for a medium, there were more mundane uses to be fulfilled by æthers. Æthers were invented for the planets to swim in, to constitute electric atmospheres and magnetic effluvia, to convey sensations from one part of our bodies to another, and so on, till all space had been filled three or four times over with æthers. It is only when we remember the extensive and mischievous influence on science which hypotheses about æthers used formerly to exercise, that we can appreciate the horror of æthers which sober-minded men had during the 18th century, and which, probably as a sort of hereditary prejudice, descended even to the late Mr John Stuart Mill.

The disciples of Newton maintained that in the fact of the mutual gravitation of the heavenly bodies, according to Newton's law, they had a complete quantitative account of their motions; and they endeavoured to follow out the path which Newton had opened up by investigating and measuring the attrac-

tions and repulsions of electrified and magnetic bodies, and the cohesive forces in the interior of bodies, without attempting to account for these forces.

Newton himself, however, endeavoured to account for gravitation by differences of pressure in an æther (see Art. ATTRACTION*, Vol. III. p. 64); but he did not publish his theory, "because he was not able from experiment and observation to give a satisfactory account of this medium, and the manner of its operation in producing the chief phenomena of nature."

On the other hand, those who imagined æthers in order to explain phenomena could not specify the nature of the motion of these media, and could not prove that the media, as imagined by them, would produce the effects they were meant to explain. The only æther which has survived is that which was invented by Huygens to explain the propagation of light. The evidence for the existence of the luminiferous æther has accumulated as additional phenomena of light and other radiations have been discovered; and the properties of this medium, as deduced from the phenomena of light, have been found to be precisely those required to explain electromagnetic phenomena.

Function of the æther in the propagation of radiation.—The evidence for the undulatory theory of light will be given in full, under the Article on LIGHT, but we may here give a brief summary of it so far as it bears on the existence of the æther.

That light is not itself a substance may be proved from the phenomenon of interference. A beam of light from a single source is divided by certain optical methods into two parts, and these, after travelling by different paths, are made to reunite and fall upon a screen. If either half of the beam is stopped, the other falls on the screen and illuminates it, but if both are allowed to pass, the screen in certain places becomes dark, and thus shews that the two portions of light have destroyed each other.

Now, we cannot suppose that two bodies when put together can annihilate each other; therefore light cannot be a substance. What we have proved is that one portion of light can be the exact opposite of another portion, just as $+a$ is the exact opposite of $-a$, whatever a may be. Among physical quantities we find some which are capable of having their signs reversed, and others which are not. Thus a displacement in one direction is the exact opposite of an equal displacement in the opposite direction. Such quantities

* [p. 485 of the present vol.]

are the measures, not of substances, but always of processes taking place in a substance. We therefore conclude that light is not a substance but a process going on in a substance, the process going on in the first portion of light being always the exact opposite of the process going on in the other at the same instant, so that when the two portions are combined no process goes on at all. To determine the nature of the process in which the radiation of light consists, we alter the length of the path of one or both of the two portions of the beam, and we find that the light is extinguished when the difference of the length of the paths is an odd multiple of a certain small distance called a half wave-length. In all other cases there is more or less light; and when the paths are equal, or when their difference is a multiple of a whole wave-length, the screen appears four times as bright as when one portion of the beam falls on it. In the ordinary form of the experiment these different cases are exhibited simultaneously at different points of the screen, so that we see on the screen a set of fringes consisting of dark lines at equal intervals, with bright bands of graduated intensity between them.

If we consider what is going on at different points in the axis of a beam of light at the same instant, we shall find that if the distance between the points is a multiple of a wave-length the same process is going on at the two points at the same instant, but if the distance is an odd multiple of half a wave-length the process going on at one point is the exact opposite of the process going on at the other.

Now, light is known to be propagated with a certain velocity (3.004×10^{10} centimetres per second in vacuum, according to Cornu). If, therefore, we suppose a movable point to travel along the ray with this velocity, we shall find the same process going on at every point of the ray as the moving point reaches it. If, lastly, we consider a fixed point in the axis of the beam, we shall observe a rapid alternation of these opposite processes, the interval of time between similar processes being the time light takes to travel a wave-length.

These phenomena may be summed up in the mathematical expression

$$u = A \cos (nt - px + a)$$

which gives u , the phase of the process, at a point whose distance measured from a fixed point in the beam is x , and at a time t .

We have determined nothing as to the nature of the process. It may be a displacement, or a rotation, or an electrical disturbance, or indeed any

physical quantity which is capable of assuming negative as well as positive values. Whatever be the nature of the process, if it is capable of being expressed by an equation of this form, the process going on at a fixed point is called a *vibration*; the constant A is called the *amplitude*; the time $\frac{2\pi}{n}$ is called the *period*; and $nt - px + a$ is the *phase*.

The configuration at a given instant is called a *wave*, and the distance $\frac{2\pi}{p}$ is called the *wave-length*. The velocity of propagation is $\frac{n}{p}$. When we contemplate the different parts of the medium as going through the same process in succession, we use the word *undulatory* to denote this character of the process without in any way restricting its physical nature.

A further insight into the physical nature of the process is obtained from the fact that if the two rays are polarized, and if the plane of polarization of one of them be made to turn round the axis of the ray, then when the two planes of polarization are parallel the phenomena of interference appear as above described. As the plane turns round, the dark and light bands become less distinct, and when the planes of polarization are at right angles, the illumination of the screen becomes uniform, and no trace of interference can be discovered.

Hence the physical process involved in the propagation of light must not only be a directed quantity or vector capable of having its direction reversed, but this vector must be at right angles to the ray, and either in the plane of polarization or perpendicular to it. Fresnel supposed it to be a displacement of the medium perpendicular to the plane of polarization. Maccullagh and Neumann supposed it to be a displacement in the plane of polarization. The comparison of these two theories must be deferred till we come to the phenomena of dense media.

The process may, however, be an electromagnetic one, and as in this case the electric displacement and the magnetic disturbance are perpendicular to each other, either of these may be supposed to be in the plane of polarization.

All that has been said with respect to the radiations which affect our eyes, and which we call light, applies also to those radiations which do not produce a luminous impression on our eyes, for the phenomena of interference

have been observed, and the wave-lengths measured, in the case of radiations, which can be detected only by their heating or by their chemical effects.

Elasticity, tenacity, and density of the æther.—Having so far determined the geometrical character of the process, we must now turn our attention to the medium in which it takes place. We may use the term æther to denote this medium, whatever it may be.

In the first place, it is capable of transmitting energy. The radiations which it transmits are able not only to act on our senses, which of itself is evidence of work done, but to heat bodies which absorb them; and by measuring the heat communicated to such bodies, the energy of the radiation may be calculated.

In the next place this energy is not transmitted instantaneously from the radiating body to the absorbing body, but exists for a certain time in the medium.

If we adopt either Fresnel's or Maccullagh's form of the undulatory theory, half of this energy is in the form of potential energy, due to the distortion of elementary portions of the medium, and half in the form of kinetic energy, due to the motion of the medium. We must therefore regard the æther as possessing elasticity similar to that of a solid body, and also as having a finite density. If we take Pouillet's estimate of 1.7633 as the number of gramme-centigrade units of heat produced by direct sunlight falling on a square centimetre in a minute, this is equivalent to 1.234×10^6 crgs per second. Dividing this by 3.004×10^{10} , the velocity of light in centimetres per second, we get for the energy in a cubic centimetre 4.1×10^{-5} crgs. Near the sun the energy in a cubic centimetre would be about 46,000 times this, or 1.886 ergs. If we further assume, with Sir W. Thomson, that the amplitude is not more than one hundredth of the wave-length, we have $Ap = \frac{2\pi}{100}$, or about $\frac{1}{16}$; so that we have—

$$\text{Energy per cubic centimetre} \dots\dots\dots = \frac{1}{2}\rho V^2 A^2 p^2 = 1.886 \text{ ergs.}^*$$

$$\text{Greatest tangential stress per square centimetre} = \rho V^2 A p = 30.176 \text{ dynes.}$$

$$\text{Coefficient of rigidity of æther} \dots\dots\dots = \rho V^2 = 842.8.$$

$$\text{Density of æther} \dots\dots\dots = \rho = 9.36 \times 10^{-19}.$$

The coefficient of rigidity of steel is about 8×10^{11} , and that of glass 2.4×10^{11} .

* [The numbers in this column are incorrectly deduced from the data. They should be 1.886, 60.352, 965.632 and 1.07×10^{-18} .]

If the temperature of the atmosphere were everywhere 0°C ., and if it were in equilibrium about the earth supposed at rest, its density at an infinite distance from the earth would be 3×10^{-22} which is about 1.8×10^{20} times less than the estimated density of the æther. In the regions of interplanetary space the density of the æther is therefore very great compared with that of the attenuated atmosphere of interplanetary space, but the whole mass of æther within a sphere whose radius is that of the most distant planet is very small compared with that of the planets themselves*.

The æther distinct from gross matter.—When light travels through the atmosphere it is manifest that the medium through which the light is propagated is not the air itself, for in the first place the air cannot transmit transverse vibrations, and the normal vibrations which the air does transmit travel about a million times slower than light. Solid transparent bodies, such as glass and crystals, are no doubt capable of transmitting transverse vibrations, but the velocity of transmission is still hundreds of thousand times less than that with which light is transmitted through these bodies. We are therefore obliged to suppose that the medium through which light is propagated is something distinct from the transparent medium known to us, though it interpenetrates all transparent bodies and probably opaque bodies too.

The velocity of light, however, is different in different transparent media, and we must therefore suppose that these media take some part in the process, and that their particles are vibrating as well as those of the æther, but the energy of the vibrations of the gross particles must be very much smaller than that of the æther, for otherwise a much larger proportion of the incident light would be reflected when a ray passes from vacuum to glass or from glass to vacuum than we find to be the case.

Relative motion of the æther.—We must therefore consider the æther within dense bodies as somewhat loosely connected with the dense bodies, and we have next to inquire whether, when these dense bodies are in motion through the great ocean of æther, they carry along with them the æther they contain, or whether the æther passes through them as the water of the sea passes through the meshes of a net when it is towed along by a boat. If it were possible to determine the velocity of light by observing the time it takes to travel between one station and another on the earth's surface, we

* See Sir W. Thomson, *Trans. R. S. Edin.* Vol. xxi. p. 60.

might, by comparing the observed velocities in opposite directions, determine the velocity of the æther with respect to these terrestrial stations. All methods, however, by which it is practicable to determine the velocity of light from terrestrial experiments depend on the measurement of the time required for the double journey from one station to the other and back again, and the increase of this time on account of a relative velocity of the æther equal to that of the earth in its orbit would be only about one hundred millionth part of the whole time of transmission, and would therefore be quite insensible.

The theory of the motion of the æther is hardly sufficiently developed to enable us to form a strict mathematical theory of the aberration of light, taking into account the motion of the æther. Professor Stokes, however, has shewn that, on a very probable hypothesis with respect to the motion of the æther, the amount of aberration would not be sensibly affected by that motion.

The only practicable method of determining directly the relative velocity of the æther with respect to the solar system is to compare the values of the velocity of light deduced from the observation of the eclipses of Jupiter's satellites when Jupiter is seen from the earth at nearly opposite points of the ecliptic.

Arago proposed to compare the deviation produced in the light of a star after passing through an achromatic prism when the direction of the ray within the prism formed different angles with the direction of motion of the earth in its orbit. If the æther were moving swiftly through the prism, the deviation might be expected to be different when the direction of the light was the same as that of the æther, and when these directions were opposite.

The present writer* arranged the experiment in a more practicable manner by using an ordinary spectroscope, in which a plane mirror was substituted for the slit of the collimator. The cross wires of the observing telescope were illuminated. The light from any point of the wire passed through the object-glass and then through the prisms as a parallel pencil till it fell on the object-glass of the collimator, and came to a focus at the mirror, where it was reflected, and after passing again through the object-glass it formed a pencil passing through each of the prisms parallel to its original direction, so that the object-glass of the observing telescope brought it to a focus coinciding with the point of the cross wires from which it originally proceeded. Since

* *Phil. Trans.* CLVIII. (1868), p. 532. [Communicated by Prof. Maxwell to Dr Huggins and included by him in his paper on the spectra of some of the stars and nebulae.]

the image coincided with the object, it could not be observed directly, but by diverting the pencil by partial reflection at a plane surface of glass, it was found that the image of the finest spider line could be distinctly seen, though the light which formed the image had passed twice through three prisms of 60°. The apparatus was first turned so that the direction of the light in first passing through the second prism was that of the earth's motion in its orbit. The apparatus was afterwards placed so that the direction of the light was opposite to that of the earth's motion. If the deviation of the ray by the prisms was increased or diminished for this reason in the first journey, it would be diminished or increased in the return journey, and the image would appear on one side of the object. When the apparatus was turned round it would appear on the other side. The experiment was tried at different times of the year, but only negative results were obtained. We cannot, however, conclude absolutely from this experiment that the æther near the surface of the earth is carried along with the earth in its orbit, for it has been shown by Professor Stokes* that according to Fresnel's hypothesis the relative velocity of the æther within the prism would be to that of the æther outside inversely as the square of the index of refraction, and that in this case the deviation would not be sensibly altered on account of the motion of the prism through the æther.

Fizeau, however, by observing the change of the plane of polarization of light transmitted obliquely through a series of glass plates, obtained what he supposed to be evidence of a difference in the result when the direction of the ray in space was different, and Angström obtained analogous results by diffraction. The writer is not aware that either of these very difficult experiments has been verified by repetition.

In another experiment of M. Fizeau, which seems entitled to greater confidence, he has observed that the propagation of light in a stream of water takes place with greater velocity in the direction in which the water moves than in the opposite direction, but that the change of velocity is less than that which would be due to the actual velocity of the water, and that the phenomenon does not occur when air is substituted for water. This experiment seems rather to verify Fresnel's theory of the æther; but the whole question of the state of the luminiferous medium near the earth, and of its connexion with gross matter, is very far as yet from being settled by experiment.

* *Phil. Mag.* 1846, p. 53.

† *Ann. de Chimie et de Physique*, Feb. 1860.

Function of the æther in electromagnetic phenomena.—Faraday conjectured that the same medium which is concerned in the propagation of light might also be the agent in electromagnetic phenomena. "For my own part," he says, "considering the relation of a vacuum to the magnetic force, and the general character of magnetic phenomena external to the magnet, I am much more inclined to the notion that in the transmission of the force there is such an action, external to the magnet, than that the effects are merely attraction and repulsion at a distance. Such an action may be a function of the æther; for it is not unlikely that, if there be an æther, it should have other uses than simply the conveyance of radiation*." This conjecture has only been strengthened by subsequent investigations.

Electrical energy is of two kinds, electrostatic and electrokinetic. We have reason to believe that the former depends on a property of the medium in virtue of which an electric displacement elicits an electromotive force in the opposite direction, the electromotive force for unit displacement being inversely as the specific inductive capacity of the medium.

The electrokinetic energy, on the other hand, is simply the energy of the motion set up in the medium by electric currents and magnets, this motion not being confined to the wires which carry the currents, or to the magnet, but existing in every place where magnetic force can be found.

Electromagnetic Theory of Light.—The properties of the electromagnetic medium are therefore as far as we have gone similar to those of the luminiferous medium, but the best way to compare them is to determine the velocity with which an electromagnetic disturbance would be propagated through the medium. If this should be equal to the velocity of light, we would have strong reason to believe that the two media, occupying as they do the same space, are really identical. The data for making the calculation are furnished by the experiments made in order to compare the electromagnetic with the electrostatic system of units. The velocity of propagation of an electromagnetic disturbance in air, as calculated from different sets of data, does not differ more from the velocity of light in air, as determined by different observers, than the several calculated values of these quantities differ among each other.

If the velocity of propagation of an electromagnetic disturbance is equal to that of light in other transparent media, then in non-magnetic media the

* *Experimental Researches*, 3075.

specific inductive capacity should be equal to the square of the index of refraction.

Boltzmann* has found that this is very accurately true for the gases which he has examined. Liquids and solids exhibit a greater divergence from this relation, but we can hardly expect even an approximate verification when we have to compare the results of our sluggish electrical experiments with the alternations of light, which take place billions of times in a second.

The undulatory theory, in the form which treats the phenomena of light as the motion of an elastic solid, is still encumbered with several difficulties†.

The first and most important of these is that the theory indicates the possibility of undulations consisting of vibrations normal to the surface of the wave. The only way of accounting for the fact that the optical phenomena which would arise from these waves do not take place is to assume that the æther is incompressible.

The next is that, whereas the phenomena of reflection are best explained on the hypothesis that the vibrations are perpendicular to the plane of polarization, those of double refraction require us to assume that the vibrations are in that plane.

The third is that, in order to account for the fact that in a doubly refracting crystal the velocity of rays in any principal plane and polarized in that plane is the same, we must assume certain highly artificial relations among the coefficients of elasticity.

The electromagnetic theory of light satisfies all these requirements by the single hypothesis‡ that the electric displacement is perpendicular to the plane of polarization. No normal displacement can exist, and in doubly refracting crystals the specific dielectric capacity for each principal axis is assumed to be equal to the square of the index of refraction of a ray perpendicular to that axis, and polarized in a plane perpendicular to that axis. Boltzmann§ has found that these relations are approximately true in the case of crystallized sulphur,

* *Wiener Sitzb.*, 23 April, 1874.

† See Prof. Stokes, "Report on Double Refraction," *British Ass. Report*, 1862, p. 253.

‡ *Over de theorie der terugkaatsing en breking van het licht*,—Academisch Proefschrift door H. A. Lorentz. Arnhem, K. van der Zande, 1875.

§ "Ueber die Verschiedenheit der Dielektricitätsconstanten des krystallisirten Schwefels nach verschiedenen Richtungen," by Ludwig Boltzmann, *Wiener Sitzb.*, 8th Oct., 1874.

a body having three unequal axes. The specific dielectric capacity for these axes are respectively

4.773	3.970	3.811
-------	-------	-------

and the squares of the indices of refraction

4.576	3.886	3.591
-------	-------	-------

Physical constitution of the æther.—What is the ultimate constitution of the æther? is it molecular or continuous?

We know that the æther transmits transverse vibrations to very great distances without sensible loss of energy by dissipation. A molecular medium, moving under such conditions that a group of molecules once near together remain near each other during the whole motion, may be capable of transmitting vibrations without much dissipation of energy, but if the motion is such that the groups of molecules are not merely slightly altered in configuration but entirely broken up, so that their component molecules pass into new types of grouping, then in the passage from one type of grouping to another the energy of regular vibrations will be frittered away into that of the irregular agitation which we call heat.

We cannot therefore suppose the constitution of the æther to be like that of a gas, in which the molecules are always in a state of irregular agitation, for in such a medium a transverse undulation is reduced to less than one five-hundredth of its amplitude in a single wave-length. If the æther is molecular, the grouping of the molecules must remain of the same type, the configuration of the groups being only slightly altered during the motion.

Mr S. Tolver Preston* has supposed that the æther is like a gas whose molecules very rarely interfere with each other, so that their mean path is far greater than any planetary distances. He has not investigated the properties of such a medium with any degree of completeness, but it is easy to see that we might form a theory in which the molecules *never* interfere with each other's motion of translation, but travel in all directions with the velocity of light; and if we further suppose that vibrating bodies have the power of impressing on these molecules some vector property (such as rotation about an axis) which does not interfere with their motion of translation, and which is then carried along by the molecules, and if the alternation of the average

* *Phil. Mag.*, Sept. and Nov. 1877.

value of this vector for all the molecules within an element of volume be the process which we call light, then the equations which express this average will be of the same form as that which expresses the displacement in the ordinary theory.

It is often asserted that the mere fact that a medium is elastic or compressible is a proof that the medium is not continuous, but is composed of separate parts having void spaces between them. But there is nothing inconsistent with experience in supposing elasticity or compressibility to be properties of every portion, however small, into which the medium can be conceived to be divided, in which case the medium would be strictly continuous. A medium, however, though homogeneous and continuous as regards its density, may be rendered heterogeneous by its motion, as in Sir W. Thomson's hypothesis of vortex-molecules in a perfect liquid (see Art. ATOM)*.

The aether, if it is the medium of electromagnetic phenomena, is probably molecular, at least in this sense.

Sir W. Thomson† has shewn that the magnetic influence on light discovered by Faraday depends on the direction of motion of moving particles, and that it indicates a rotational motion in the medium when magnetized. See also Maxwell's *Electricity and Magnetism*, Art. 806, &c.

Now, it is manifest that this rotation cannot be that of the medium as a whole about an axis, for the magnetic field may be of any breadth, and there is no evidence of any motion the velocity of which increases with the distance from a single fixed line in the field. If there is any motion of rotation, it must be a rotation of very small portions of the medium each about its own axis, so that the medium must be broken up into a number of molecular vortices.

We have as yet no data from which to determine the size or the number of these molecular vortices. We know, however, that the magnetic force in the region in the neighbourhood of a magnet is maintained as long as the steel retains its magnetization, and as we have no reason to believe that a steel magnet would lose all its magnetization by the mere lapse of time, we conclude that the molecular vortices do not require a continual expenditure of work in order to maintain their motion, and that therefore this motion does not necessarily involve dissipation of energy.

* [p. 445 of the present volume.]

† *Proceedings of the Royal Society*, June, 1856.

No theory of the constitution of the æther has yet been invented which will account for such a system of molecular vortices being maintained for an indefinite time without their energy being gradually dissipated into that irregular agitation of the medium which, in ordinary media, is called heat.

Whatever difficulties we may have in forming a consistent idea of the constitution of the æther, there can be no doubt that the interplanetary and interstellar spaces are not empty, but are occupied by a material substance or body, which is certainly the largest, and probably the most uniform body of which we have any knowledge.

Whether this vast homogeneous expanse of isotropic matter is fitted not only to be a medium of physical interaction between distant bodies, and to fulfil other physical functions of which, perhaps, we have as yet no conception, but also, as the authors of the *Unseen Universe* seem to suggest, to constitute the material organism of beings exercising functions of life and mind as high or higher than ours are at present, is a question far transcending the limits of physical speculation.