

La filosofia della scienza di Heinrich Hertz

Le pagine che seguono sono state preparate per il corso di *Fondamenti della Fisica*: esse contengono la traduzione di alcuni passi di Heinrich Hertz e alcuni miei commenti finali. Questi scritti di Hertz sono discussi anche in diversi saggi contenuti nella pagina: <http://fiscavolta.unipv.it/percorsi/philosophy.asp>
(G.G.)

*Introduzione*¹

Il problema più diretto e, in un certo senso, il più importante, che la conoscenza consapevole della natura ci permette di risolvere, è quello di poter anticipare gli eventi futuri, in modo tale che noi possiamo predisporre le nostre faccende in accordo con queste anticipazioni. Come base per la soluzione di questo problema, noi facciamo sempre uso della conoscenza di eventi che sono già accaduti, ottenuta mediante un'osservazione casuale o un esperimento preordinato. Nel cercare di trarre delle inferenze sul futuro dal passato, noi procediamo sempre in questo modo. Costruiamo delle immagini o simboli degli oggetti esterni; e diamo loro una forma tale che le necessarie conseguenze delle immagini nel pensiero sono sempre le necessarie conseguenze nella natura delle cose descritte. Affinchè questa condizione sia soddisfatta, ci deve essere una certa conformità tra la natura ed il nostro pensiero. L'esperienza ci insegna che questa condizione può essere soddisfatta, e quindi che questa conformità in effetti esiste. Quando riusciamo a dedurre immagini del tipo desiderato dall'esperienza precedentemente accumulata, possiamo, usandole od usando modelli, dedurne le conseguenze che, nel mondo esterno, emergono solo in tempi relativamente lunghi oppure solo come risultato del nostro intervento. Siamo così in grado di anticipare i fatti, e quindi di prendere delle decisioni nella situazione presente in accordo con la previsione così acquisita. Le immagini di cui stiamo parlando sono le nostre concezioni delle cose. Esse sono in conformità con le cose stesse sotto *un* aspetto importante: perché soddisfano la condizione suesposta. Non è necessario, per i nostri fini, che esse siano in conformità con le cose sotto ogni altro aspetto qualsivoglia. Infatti, noi non sappiamo, né possiamo sapere in alcun modo, se le nostre concezioni delle cose sono in conformità con esse sotto ogni altro che non sia questo *unico* fondamentale aspetto.

Le immagini che ci possiamo formare delle cose non sono determinate senza ambiguità dalla condizione che le conseguenze delle immagini debbono essere

¹Questa è la parte iniziale della introduzione al libro *The principles of mechanics presented in a new form*, Dover Publications, New York, (1956). L'edizione originale tedesca è del 1894.

le immagini delle conseguenze [delle cose]. Sono possibili diverse immagini degli stessi oggetti, e queste immagini possono differire per diversi aspetti. Noi dovremmo innanzitutto considerare inaccettabili tutte le immagini che violano implicitamente le leggi del nostro pensiero. Pertanto noi richiediamo innanzitutto che tutte le nostre immagini siano logicamente permesse, o, brevemente, che siano permesse. Chiameremo scorrette quelle immagini permesse le cui relazioni essenziali contraddicono le relazioni delle cose esterne, *i.e.* quelle che non soddisfano la nostra condizione fondamentale. Pertanto noi richiediamo, in seconda istanza, che le nostre immagini siano corrette. Tuttavia, due immagini permesse e corrette degli stessi oggetti esterni possono ancora differire per quanto concerne l'adeguatezza. Tra due immagini dello stesso oggetto la più adeguata è quella che descrive il maggior numero delle relazioni essenziali dell'oggetto: quella che potremmo chiamare la più precisa. Di due immagini egualmente precise, la più adeguata è quella che contiene, in aggiunta alle caratteristiche essenziali, il minor numero di relazioni superflue o vuote, la più semplice delle due. Le relazioni vuote non possono peraltro essere evitate: esse entrano nelle immagini perché esse sono pure immagini - immagini prodotte dalla nostra mente e necessariamente modellate dalle caratteristiche del suo modo di descrivere.

Le condizioni che abbiamo posto si riferiscono alle immagini: ad una rappresentazione scientifica delle immagini noi imponiamo altre condizioni postulative. Noi chiediamo che una rappresentazione fornisca una chiara visione di quali caratteristiche debbano essere attribuite ad una immagine sulla base della sua permissibilità, della sua correttezza o della sua adeguatezza. Solo così possiamo avere la possibilità di modificare o migliorare le nostre immagini. Ciò che si può attribuire alle immagini sulla base della loro adeguatezza è contenuto nelle notazioni, nelle definizioni, nelle abbreviazioni, in breve, in tutto ciò che può essere aggiunto o tolto arbitrariamente. Ciò che entra nelle immagini sulla base della loro correttezza è contenuto nei risultati dell'esperienza, a partire dalla quale le immagini sono costruite. Ciò che entra nelle immagini in quanto permesse, è regolato dalla natura della nostra mente. Alla domanda se un'immagine sia permessa oppure no, noi possiamo rispondere senza ambiguità sì o no; e la nostra decisione sarà valida per sempre. Ugualmente senza ambiguità possiamo decidere se un'immagine sia o no corretta; ma solo secondo lo stato della nostra esperienza presente, lasciando la possibilità di un appello ad un'esperienza futura e più completa. Ma non possiamo decidere senza ambiguità se un'immagine sia o no adeguata; perché, a questo proposito, possono emergere differenze di opinione. Un'immagine può essere più adatta per un verso, un'altra per un altro; solo mettendo gradualmente alla prova molte immagini possiamo alla fine riuscire ad ottenere la più adeguata.

B. Teoria²

E ora, per essere più precisi, che cosa è quella che chiamiamo la teoria di Faraday - Maxwell? Maxwell ci ha lasciato, come prodotto del suo pensiero maturo, un grande trattato sulla Eletticità e sul Magnetismo; si potrebbe pertanto dire che la teoria di Maxwell è quella esposta in quel trattato. Ma una simile risposta verrebbe a mala pena considerata soddisfacente da tutti gli scienziati che avessero esaminato la questione da vicino. Molti si sono lanciati in uno studio diligente del trattato di Maxwell, e, quand'anche non abbiano inciampato in difficoltà matematiche inconsuete, sono stati tuttavia costretti ad abbandonare la speranza di costruirsi un'immagine coerente delle idee di Maxwell. Io non mi sono comportato meglio. Nonostante la più grande ammirazione per le concezioni matematiche di Maxwell, non sono sempre stato sicuro di avere afferrato il significato fisico delle sue asserzioni. Pertanto, non mi è stato possibile essere guidato nei miei esperimenti direttamente dal libro di Maxwell. Sono stato piuttosto guidato dai lavori di Helmholtz, come in realtà si può facilmente verificare dal modo in cui gli esperimenti sono stati approntati. Ma, sfortunatamente, nel caso limite della teoria di Helmholtz che conduce alle equazioni di Maxwell – alla quale erano mirati gli esperimenti – il supporto fisico della teoria di Helmholtz scompare, come infatti succede sempre, nel caso in cui si ignori l'azione a distanza. Mi sono pertanto sforzato di sviluppare in modo coerente le concezioni fisiche necessarie, partendo dalle equazioni di Maxwell, ma cercando d'altra parte di semplificare al massimo la teoria di Maxwell eliminando o semplicemente non prendendo in considerazione quelle parti che possono essere tralasciate in quanto non possono influire su alcun possibile fenomeno. Ciò spiega come e perché i due articoli teorici (che costituiscono la conclusione di questa raccolta) siano stati scritti. Così, la rappresentazione della teoria nello stesso lavoro di Maxwell, la sua rappresentazione come caso limite della teoria di Helmholtz, e la sua rappresentazione in questi lavori – sebbene diverse nella forma – hanno sostanzialmente lo stesso intimo significato. Questo significato comune dei diversi modi di rappresentazione (ed altri modi possono certamente essere trovati) è, a mio giudizio, la parte imperitura del lavoro di Maxwell. Questo [significato comune], e non le concezioni o i metodi particolari di Maxwell, è quello che intendo per “teoria di Maxwell”. Alla domanda, “Che cosa è la teoria di Maxwell?” io non so rispondere in modo più conciso o più preciso che dicendo: “la teoria di Maxwell è il sistema di equazioni di Maxwell”. Ogni teoria che conduce allo stesso sistema di equazioni, e pertanto include gli stessi possibili fenomeni, verrà da me considerata come una forma od un caso particolare della teoria di Maxwell;

²Questa è la parte ‘teorica’ della introduzione di Hertz alla raccolta di scritti denominata *Electric Waves*, Dover Publications, New York, (1962), 20 - 28. Essa fu scritta nel 1892.

ogni teoria che conduce ad equazioni diverse, e pertanto a possibili fenomeni diversi, è una teoria diversa. Pertanto, in questo senso, e solo in questo senso, le due discussioni teoriche di questo volume possono essere considerate come rappresentazioni della teoria di Maxwell. In nessun senso esse possono essere intese come un'appropriata esposizione delle idee di Maxwell. Al contrario, si può dubitare che Maxwell, se fosse vivo, riconoscerebbe che esse rappresentano le sue vedute in ogni loro aspetto.

Il semplice fatto che diverse rappresentazioni contengano quello che sostanzialmente è la stessa cosa, rende particolarmente difficile una corretta comprensione di ciascuna di esse. Idee e concetti che sono al contempo simili e diversi possono essere rappresentati dagli stessi simboli nelle diverse rappresentazioni. Pertanto, per una corretta comprensione di ciascuna di esse, la prima cosa che bisogna fare è quella di comprendere ciascuna rappresentazione per se stessa, senza introdurre in essa idee che appartengono ad un'altra. Può forse essere utile a molti miei colleghi una breve esposizione delle concezioni fondamentali delle tre rappresentazioni della teoria di Maxwell cui ho già fatto riferimento. Avrò così la possibilità di indicare dove, a mio avviso, sta la particolare difficoltà della stessa rappresentazione di Maxwell. Non posso concordare con l'opinione diffusa che questa difficoltà sia di natura matematica.

Quando vediamo dei corpi che agiscono l'uno sull'altro a distanza, possiamo costruirci varie concezioni della natura di questa azione. Possiamo pensare che l'effetto sia dovuto ad una azione - a - distanza diretta, che si propaga nello spazio, o possiamo pensarlo come la conseguenza di una azione che si propaga da punto a punto in un ipotetico mezzo. Tuttavia, applicando queste concezioni alla elettricità, possiamo fare una serie di distinzioni più sottili. Nel passare da una concezione di pura attrazione diretta ad una concezione di pura attrazione indiretta, possiamo distinguere tra quattro punti di vista.

Dal primo punto di vista, noi guardiamo all'attrazione tra due corpi come ad una specie di affinità spirituale tra di essi. La forza che ciascuno di essi esercita è legata alla presenza dell'altro corpo. Affinché ci sia la forza, ci debbono essere almeno due corpi. In qualche modo un magnete ottiene la sua forza solo quando un altro magnete è posto nelle sue vicinanze. Questa concezione è la concezione della azione - a - distanza pura, la concezione della legge di Coulomb. Nella teoria della elettricità essa è stata quasi abbandonata, ma è ancora usata nella teoria della gravitazione. L'astronomia matematica parla dell'attrazione tra sole e pianeti, ma non si preoccupa dell'attrazione attraverso lo spazio vuoto.

Dal secondo punto di vista, noi guardiamo ancora all'attrazione tra due corpi come ad una specie di influenza spirituale dell'uno sull'altro. Ma sebbene ammettiamo che possiamo osservare questa azione solo quando abbiamo almeno due corpi, assumiamo in più che ognuno dei due corpi si sforza in

continuazione di eccitare in tutti i punti circostanti attrazioni di grandezza e direzione definita, anche se nessun altro corpo simile si trova nelle vicinanze. Con questi sforzi, che variano da punto a punto, noi riempiamo (secondo questa concezione) lo spazio circostante. Nello stesso tempo non assumiamo che ci sia alcun cambiamento nel posto dove questa azione viene esercitata; il corpo che agisce è ancora la sede e la sorgente della forza. Questo è, all'incirca, il punto di vista della teoria del potenziale. E' naturalmente anche il punto di vista di certi capitoli del trattato di Maxwell, anche se non è il punto di vista della teoria di Maxwell. Per confrontare queste concezioni più facilmente, noi descriveremo da questo punto di vista due piastre di un condensatore elettrizzate l'una positivamente, l'altra negativamente (Figura 1).

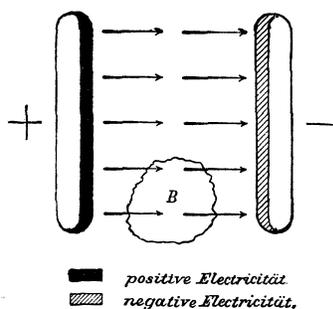


Figura 1.

Il disegno sarà facilmente compreso; sulle piastre è visibile l'elettricità positiva e negativa (come se fossero materiali); la forza tra le armature è indicata dalle frecce. Da questo punto di vista è irrilevante se lo spazio tra le armature è vuoto o pieno. Se ammettiamo l'esistenza dell'etere, ma supponiamo che esso sia rimosso dalla regione *B* dello spazio, la forza non cambierà in questa regione dello spazio.

Il terzo punto di vista assume le concezioni del secondo, ma aggiunge un'ulteriore complicazione. Esso assume che l'azione tra due corpi separati non è determinata soltanto dalle forze che agiscono a distanza. Esso assume infatti che le forze inducono cambiamenti nello spazio (supposto non essere vuoto da alcuna parte), e che questi di nuovo danno origine a nuove forze - a - distanza. L'attrazione tra corpi separati dipende, allora, parzialmente dallo loro azione diretta e parzialmente dall'influenza dei cambiamenti del mezzo. Il cambiamento nel mezzo stesso è concepito come una polarizzazione elettrica o magnetica delle sue parti più piccole sotto l'influenza della forza agente. Questa concezione è stata sviluppata da Poisson in relazione ai fenomeni statici del magnetismo, ed è stata estesa da Mossotti ai fenomeni elettrici. Nel suo sviluppo più generale, e nella sua estensione sull'intero dominio dell'elettromagnetismo, è rappresentata dalla teoria di Helmholtz.

La figura 2 illustra questo punto di vista nel caso in cui il mezzo gioca un piccolo ruolo nell'azione complessiva.

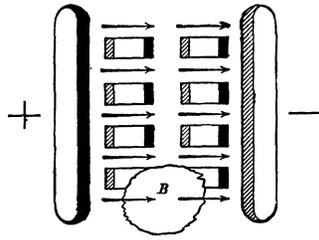


Figura 2.

Sulla piastre si vedono le elettricità libere, e nel dielettrico i fluidi elettrici che sono separati, ma che non possono essere completamente disgiunti l'uno dall'altro. Supponiamo che lo spazio tra le piastre contenga solo l'etere, e supponiamo che una sua regione B sia tolta via; le forze rimarranno in questa regione, ma la polarizzazione vi scomparirà.

Un caso limite di questa concezione è di particolare rilevanza. Come un'analisi più attenta mostra, possiamo suddividere l'azione risultante (la sola che può essere osservata) di un corpo materiale sull'altro in una influenza dovuta alla azione - a - distanza diretta e in una influenza dovuta al mezzo interposto. Noi possiamo aumentare quella parte dell'energia totale che ha sede nei corpi elettrizzati alle spese di quella parte che attribuiamo al mezzo e viceversa. Ora, nel caso limite, noi attribuiamo l'intera energia al mezzo. Siccome nessuna energia corrisponde alle elettricità che esistono sui conduttori, le forze - a - distanza debbono divenire infinitamente piccole. Ma, perché ciò avvenga, è necessario che non ci sia elettricità libera. L'elettricità deve allora comportarsi come un fluido incompressibile. Di conseguenza, possiamo avere solo correnti chiuse; e, di conseguenza, emerge la possibilità di estendere la teoria a tutti i tipi di perturbazione elettrica, nonostante la nostra ignoranza delle leggi riguardanti le correnti aperte.

La trattazione matematica di questo caso limite conduce alle equazioni di Maxwell. Considereremo pertanto questa trattazione come una forma della teoria di Maxwell. Il caso limite è così chiamato anche da v. Helmholtz. Ma in nessun senso ciò deve essere inteso come significante che le idee fisiche su cui esso si basa sono le idee di Maxwell.

La figura 3 mostra lo stato dello spazio tra due piastre elettrizzate in accordo con le concezioni di questa teoria.

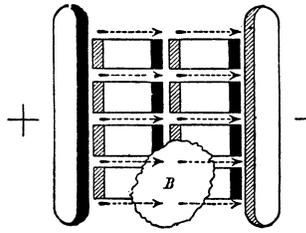


Figura 3.

Le forze - a - distanza sono divenute puramente nominali. L'elettricità è ancora presente sui conduttori, e costituisce una parte essenziale della concezione, ma la sua azione - a - distanza è completamente neutralizzata dalla elettricità di segno opposto del mezzo. La pressione che il mezzo esercita, dovuta alla attrazione della sua elettrizzazione interna, tende a tirare le piastre l'una verso l'altra. Nella regione vuota B sono presenti solo forze - a - distanza tendenti a zero.

Il quarto punto di vista appartiene alla concezione di azione pura attraverso un mezzo. Da questo punto di vista noi ammettiamo che i cambiamenti nello spazio assunti dal terzo punto di vista siano effettivamente presenti e che i corpi materiali agiscono uno sull'altro attraverso di essi. Ma non ammettiamo che queste polarizzazioni siano il risultato di forze - a - distanza; in effetti, noi neghiamo l'esistenza di queste forze - a - distanza; e facciamo a meno delle elettricità da cui si suppone che queste forze traggano origine. Piuttosto, concepiamo ora le polarizzazioni come le sole cose che sono realmente presenti; esse sono la causa dei movimenti dei corpi ponderabili, e di tutti i fenomeni che permettono la nostra percezione dei cambiamenti di questi corpi. Noi attribuiamo la spiegazione della natura delle polarizzazioni, delle loro relazioni e dei loro effetti, o cerchiamo di trovarla sulla base di ipotesi meccaniche; ma ci rifiutiamo di riconoscere nelle elettricità e nelle forze - a - distanza, come sinora si è usualmente fatto, una spiegazione soddisfacente di queste relazioni e di questi effetti. Le espressioni elettricità, magnetismo, ecc., hanno per noi, d'ora innanzi, solo il valore di una abbreviazione.

Dal punto di vista matematico, questo quarto modo può essere considerato completamente coincidente con il caso limite del terzo modo. Ma dal punto di vista fisico le due rappresentazioni differiscono in modo fondamentale. E' impossibile negare l'esistenza di forze - a - distanza, e nel contempo considerarle la causa delle polarizzazioni. Qualunque cosa designiamo come "elettricità", da questo punto di vista, non si comporta come un fluido incompressibile.

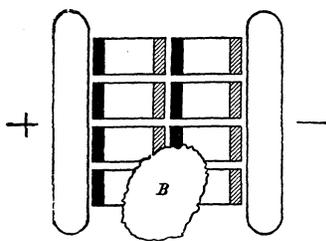


Figura 4.

Se consideriamo la figura 4, che raffigura simbolicamente la concezione sostenuta da questo punto di vista, siamo colpiti da un'altra peculiarità. La polarizzazione dello spazio è rappresentata con lo stesso simbolo usato nella discussione del terzo punto di vista. Ma mentre nelle figure 2 e 3 questa rappresentazione simbolica spiegava la natura della polarizzazione attraverso la natura della elettricità (supposta nota), noi dobbiamo adesso considerare la rappresentazione simbolica come definiente la natura di una carica elettrica attraverso lo stato di polarizzazione dello spazio (considerato come noto). Ogni particella del dielettrico appare qui caricata in senso opposto rispetto a quello che caratterizzava il nostro terzo punto di vista. Se di nuovo rimuoviamo l'etere dalla regione *B* dello spazio, non vi rimane nulla che possa ricordarci le perturbazioni elettriche delle vicinanze.

A mio giudizio, questo quarto punto di vista è il punto di vista di Maxwell. Le spiegazioni generali del suo lavoro non lasciano adito al dubbio che era sua intenzione disfarsi completamente delle forze - a - distanza. Egli esplicitamente afferma che se la forza o lo "spostamento" in un dielettrico è diretto verso la destra, noi dobbiamo concepire ogni particella del dielettrico come carica negativamente a destra e positivamente a sinistra. Ma non può essere negato che altre affermazioni di Maxwell sembrano contraddire le concezioni sostenute da questo punto di vista. Maxwell assume che l'elettricità esista anche nei conduttori; e che questa elettricità si muova sempre in modo tale da formare correnti chiuse con gli spostamenti nel dielettrico. L'affermazione che l'elettricità si muove come un fluido incomprimibile è una delle asserzioni privilegiate da Maxwell. Ma queste affermazioni non si adattano alle concezioni del quarto punto di vista; esse inducono a sospettare che Maxwell vedesse le cose dal terzo punto di vista. La mia opinione è che questo non sia mai stato in realtà il caso; che le contraddizioni siano solo apparenti e che sorgano da incomprensioni verbali. Le cose stanno, se non mi sbaglio, così: Maxwell sviluppò all'inizio la sua teoria con l'aiuto di concezioni definite e particolari circa la natura dei fenomeni elettrici. Egli assunse che i pori dell'etere e di tutti i corpi fossero riempiti da un fluido tenue che, tuttavia, non può esercitare forze - a - distanza. Nei conduttori questo fluido si muove liberamente e il suo moto

costituisce ciò che chiamiamo corrente elettrica. Negli isolanti questo fluido è confinato al suo posto da forze elastiche e il suo “spostamento” è considerato coincidente con la polarizzazione elettrica. Lo stesso fluido, essendo la causa di tutti i fenomeni elettrici, venne chiamato da Maxwell “elettricità”. Ora, quando Maxwell scrisse il suo grande trattato, le ipotesi di questa concezione non lo soddisfacevano più, oppure egli vi scorse delle contraddizioni; così le abbandonò. Ma non le eliminò completamente; rimasero moltissime espressioni che derivavano dalle sue idee precedenti. Pertanto, sfortunatamente, la parola “elettricità”, nel lavoro di Maxwell, ha ovviamente un doppio significato. In primo luogo, egli lo usa (come facciamo anche noi) per denotare una grandezza che può essere sia positiva che negativa e che costituisce il punto di partenza delle forze - a - distanza (o di ciò che sembrano tali). In secondo luogo, quel termine denota il fluido ipotetico da cui non possono trarre origine forze - a - distanza (neppure quelle apparenti), e la cui quantità deve essere sempre positiva in ogni punto dello spazio. Se leggiamo le spiegazioni di Maxwell ed interpretiamo sempre il significato della parola “elettricità” in modo opportuno, quasi tutte le contraddizioni che all’inizio sono così sorprendenti, scompaiono. Tuttavia, debbo ammettere che non sono riuscito a far ciò sistematicamente o in modo per me soddisfacente; altrimenti, invece di esitare, mi sarei espresso in modo più definito.³

Che le cose stiano così oppure no, nei due articoli teorici qui riprodotti è stato fatto un tentativo di presentare la teoria di Maxwell, *i.e.* il suo sistema di equazioni, dal quarto punto di vista. Ho cercato di evitare sin dall’inizio l’introduzione di ogni concezione estranea a questo punto di vista e che avrebbero dovuto poi essere rimosse.⁴ Mi sono inoltre sforzato di limitare il più possibile quelle concezioni che sono introdotte arbitrariamente da noi, e ammettere solo quegli elementi che non possono essere rimossi o cambiati senza alterare contemporaneamente possibili risultati sperimentali. E’ vero che, in conseguenza di questi sforzi, la teoria acquisisce un aspetto molto astratto e incolore. Non è particolarmente piacevole ascoltare asserzioni generali intorno a “cambiamenti diretti di stato” dove eravamo abituati a porre dinnanzi ai nostri occhi immagini di atomi elettrizzati. Non è particolarmente soddisfacente vedersi proporre

³M. Poincaré, nel suo trattato ‘Electricité et optique’ (vol. I, *Les Théories de Maxwell*, esprime un’opinione simile. Il Signor L. Boltzmann, nei suoi *Vorlesungen über Maxwell’s Theorie*, sembra, come me, mirare ad un sviluppo coerente del sistema di Maxwell piuttosto che ad una esposizione fedele del pensiero di Maxwell. Tuttavia, non si può dare un giudizio definitivo, finchè il lavoro non sarà completato.

⁴In questi articoli l’espressione “forza elettrica” è soltanto un nome che indica uno stato di polarizzazione dello spazio. Sarebbe stato probabilmente meglio, per evitare fraintendimenti, se l’avessi sostituita con un’altra espressione, come, per esempio, “intensità del campo elettrico” o “intensità elettrica” che il Signor E. Cohn propone nel suo articolo che si occupa dello stesso argomento (‘Zur Systematik der Elektrizitätslehre’, *Wied. Ann.* 40 (1890), 625.

delle equazioni come risultati diretti dell'osservazione e dell'esperimento, laddove eravamo abituati ad avere lunghe deduzioni matematiche quali apparenti loro dimostrazioni. Ciononostante, io credo che non sia possibile, senza ingannare noi stessi, estrarre molto di più dai fatti noti di quanto non si sia fatto nei due articoli citati. Se desideriamo dare più colore alla teoria, non c'è nulla che ci impedisca di farlo e di stimolare le capacità della nostra immaginazione con rappresentazioni concrete delle varie concezioni quali la natura della polarizzazione elettrica, della corrente elettrica, ecc.. Ma l'accuratezza scientifica richiede saggiamente di non confondere la semplice e familiare figura, che ci è presentata dalla natura, con i brillanti ornamenti con cui eravamo abituati a vestirla. Di nostro arbitrio non possiamo in alcun modo modificare la prima; possiamo invece scegliere come ci piace il taglio ed il colore degli altri.

Simili ulteriori commenti su punti di dettaglio si trovano nelle note supplementari poste alla fine del libro.

La lettura del saggio di Hertz contenuto in *Electric Waves* richiede, prioritariamente, l'attribuzione di un significato non equivoco ai termini o alle locuzioni in esso usate. Incominciamo con l'asserzione: "la teoria di Maxwell è il sistema di equazioni di Maxwell". In questa asserzione "il sistema di equazioni" deve essere inteso come costituito dalle equazioni in cui i simboli - ad eccezione di quelli corrispondenti alle variabili spaziali ed a quella temporale - non sono stati ancora *interpretati*, cioè non sono state ancora associate ad essi delle entità teoriche o delle grandezze fisiche. Per realizzare questa attribuzione bisogna partire da un 'punto di vista': esso definisce le entità teoriche necessarie per descrivere i fenomeni elettromagnetici ed è caratterizzato da una propria ontologia. All'interno di un 'punto di vista' può essere sviluppata una 'rappresentazione' o 'teoria' che, se vuole descrivere i fenomeni elettromagnetici, deve condurre al sistema di equazioni di Maxwell. Emerge quindi un duplice uso del termine teoria: la teoria di Maxwell è, contemporaneamente, il suo sistema di equazioni e il suo sistema di equazioni interpretato all'interno di una 'rappresentazione'. Tuttavia, tale ambiguità non oscura la comprensione del saggio perché essa è confinata solo in alcuni passaggi. Per lo più il termine usato è 'rappresentazione'.

Hertz prende in considerazione quattro 'punti di vista' i cui estremi si fondano l'uno sulla azione - a - distanza pura e l'altro sulla azione - attraverso - un - mezzo pura. Il primo dei due, dà origine, attraverso alcune articolazioni, anche al secondo ed al terzo 'punto di vista'. Entità teorica fondamentale dei primi tre è quello di elettricità positiva o negativa cui si contrappone, nel quarto 'punto di vista' quello di fluido elettrico "la cui quantità deve essere sempre positiva in ogni punto dello spazio". I primi tre 'punti di vista' ritengono che i fenomeni elettromagnetici siano dovuti alle azioni - a - distanza, variamente intese, esercitate dalle elettricità positiva e negativa. Queste azioni - a - distanza si manifestano come forze che agiscono su corpi carichi. Nel quarto 'punto di vista' le azioni - a - distanza sono escluse ed è lo 'spostamento' del fluido elettrico (considerato coincidente con la polarizzazione elettrica) ad assumere un ruolo fondamentale. Secondo Hertz, questo è - sebbene non sostenuto in modo coerente - il 'punto di vista' di Maxwell.

Nel primo dei due lavori teorici raccolti nel volume,⁵ Hertz mira a sviluppare coerentemente il quarto 'punto di vista', ammettendo "solo quegli elementi che non possono essere rimossi o cambiati senza alterare contemporaneamente possibili risultati sperimentali"; ciò facendo, Hertz elimina tra le ipotesi di base quella di fluido elettrico ed assume come entità teoriche fondamentali le

⁵H. Hertz, 'On the fundamental equations of electromagnetics for bodies at rest', in *Electric Waves*, (Dover, 1962), 195 - 240.

‘perturbazioni’ elettriche e magnetiche che si manifestano in ogni corpo (etere compreso): “Noi non conosciamo la natura dei cambiamenti di stato [prodotti da queste perturbazioni], ma solo i fenomeni provocati dalla loro presenza”.⁶ Queste perturbazioni vengono chiamate da Hertz “forza elettrica” e “forza magnetica”.⁷ Le linee di sviluppo dell’articolo sono le seguenti:

1. Definizione dell’energia del campo elettromagnetico nell’etere (nel vuoto). In notazione moderna (sistema SI): $u = (1/2)\epsilon_0 E^2 + (1/2)\mu_0 H^2$, dove u è la densità di energia ($\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$).
2. Assunzione del sistema di equazioni che connettono le componenti dei campi elettrici e magnetici nell’etere (nel vuoto). In notazione vettoriale e moderna : $rot \vec{E} = -\mu_0 \partial \vec{H} / \partial t$; $rot \vec{H} = \epsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$. A queste aggiunge poi $div \vec{E} = 0$ e $div \vec{H} = 0$.
3. Assunzione del sistema di equazioni che connettono le componenti dei campi elettrici e magnetici negli isolanti isotropi e anisotropi. Qui compaiono quelle che chiamiamo la costante dielettrica assoluta e la permeabilità magnetica assoluta.
4. Assunzione del sistema di equazioni che connettono le componenti dei campi elettrici e magnetici nei conduttori isotropi. Questi vengono definiti come quei corpi in cui il campo elettrico, ‘lasciato a se stesso’, decade secondo una formula del tipo $E = E_0 \exp[(-\sigma/\epsilon)t]$, ove σ è la conducibilità del conduttore. Vengono poi definiti i conduttori disomogenei come quei conduttori in cui il campo elettrico, lasciato a se stesso, non decade a zero ma ha un valore definito e variabile da punto a punto. Il campo elettrico viene in questo caso chiamato ‘forza elettromotrice’ e corrisponde a quello che la terminologia contemporanea denota come ‘campo elettrico interno’. Vengono infine considerati i conduttori anisotropi.

L’approccio di Hertz è assiomatico. A questo proposito, Hertz scrive:

Dividerò gli argomenti in due parti. Nella prima parte (A) presenterò le idee fondamentali e le formule che le connettono. Alcune spiegazioni verranno aggiunte alle formule; ma queste spiegazioni non devono essere considerate come dimostrazioni delle formule. Le formule⁸ vanno intese piuttosto come fatti derivati dall’esperienza; e l’esperienza deve essere considerata la loro dimostrazione.

⁶Ivi, p. 197.

⁷In nota del saggio introduttivo osserva però che sarebbe stato meglio usare il termine “intensità del campo elettrico” o “intensità elettrica” (e, implicitamente, locuzioni analoghe per la forza magnetica).

⁸‘Statements’ nel testo inglese.

E' vero, tuttavia, che ogni formula non può essere verificata dall'esperienza, ma solo il sistema [delle formule] nel suo insieme. Ma lo stesso vale per il sistema di equazioni della ordinaria dinamica.⁹

Secondo Hertz, i punti precedentemente elencati costituiscono tutto ciò che è necessario per descrivere i fenomeni elettromagnetici fondamentali. Scrive infatti:

Ciascuna delle precedenti sezioni comporta un aumento nel numero di fatti descritti dalla teoria. Le sezioni che seguono, d'altra parte, trattano solo di nomi e notazioni. Siccome la loro introduzione non aumenta il numero dei fatti descritti, essi sono puramente accessori alla teoria; la loro funzione è quella, in parte, di rendere possibile un modo di esprimersi più conciso, e, in parte, anche di permettere di porre in relazione, correttamente e semplicemente, la nostra teoria con le vecchie vedute della teoria elettrica.¹⁰

E' interessante vedere quali siano alcuni di questi 'nomi' o di queste 'notazioni'. Le prime introdotte sono le cosiddette 'polarizzazioni, che, in termini moderni coincidono con i vettori \vec{D} e \vec{B} . Segue poi quella di densità di corrente di 'conduzione' \vec{J} (sempre in termini moderni) e la conseguente riscrittura delle equazioni del campo elettromagnetico in termini di E, D, H, B, J . Un altro nome o notazione è quello di elettricità. Questa questione è particolarmente interessante. Dalle equazioni del campo elettromagnetico Hertz ricava quella che oggi chiamiamo l'equazione della continuità o di conservazione della carica:¹¹

$$\operatorname{div} \vec{J} = -\frac{\partial(\operatorname{div} \vec{D})}{\partial t} \quad (1)$$

scritta, ovviamente, in notazione moderna. Hertz considera poi l'integrale di volume:

$$\int_{\tau} \operatorname{div} \vec{D} \, d\tau = Q \quad (2)$$

Hertz osserva ora che¹²

La grandezza Q è ovviamente una funzione dello stato elettrico del sistema – una funzione di tipo tale che essa non può essere aumentata o diminuita da un processo interno o esterno di natura puramente elettromagnetica. La indistruttibilità della quantità Q – che

⁹Ivi, p. 197.

¹⁰Ivi, p. 209.

¹¹Ricordiamo che noi scriviamo anche: $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$.

¹²Hertz usa per Q il simbolo e .

vale anche per processi diversi da quelli puramente elettromagnetici, finchè essi sono confinati all'interno del sistema – ha suggerito l'idea che Q rappresenti l'ammontare di qualche sostanza contenuta nel sistema. In accordo con questa idea, chiamiamo Q la quantità di elettricità contenuta in un sistema ponderabile.¹³

Hertz osserva poi come la letteratura sia sovente ambigua nell'uso del termine 'elettricità' accompagnato, sovente, da aggettivi. Hertz ne propone l'uso nel modo seguente:

1. Elettricità *vera* è quella descritta dalla $\rho_v = \text{div } \vec{D}$: (in termini moderni essa può essere, per esempio, quella un gas di elettroni nel vuoto, l'eccesso di carica di un segno determinato sulle armature di un condensatore, ecc...). In un isolante ρ_v è sempre nulla.
2. Elettricità *libera* è quella descritta dalla: $\rho_f = \varepsilon_0 \text{div } \vec{E}$.

Si noti che oggi noi scriviamo:

$$\varepsilon_0 \text{div } \vec{E} = \rho + \rho_p$$

dove ρ_p è la densità di carica di polarizzazione. Quindi, mescolando il linguaggio di Hertz con il nostro:

$$\rho_f = \rho + \rho_p$$

In modo analogo al caso elettrico Hertz definisce, anche per il magnetismo, una densità 'vera' e una densità 'libera': $\text{div } \vec{B}$ e $\text{div } \vec{H}$, rispettivamente. In questo caso la densità 'vera' è sempre nulla.

¹³Ivi, p. 212.

Il punto di partenza per comprendere la posizione filosofica e metodologica di Hertz è la sua opzione realista di fondo: il mondo esterno esiste. Su questa si innesta un'articolazione tipica di posizioni strumentaliste: il compito "in un certo senso più importante" della scienza è quello di effettuare predizioni. Questa componente strumentale emerge tuttavia non come esigenza primitiva o programmatica della pratica scientifica ma come prodotto di un'epistemologia che si sforza di individuare i limiti della conoscenza. Il realismo di fondo traspare anche dal ruolo centrale riconosciuto all'esperimento inteso non solo come mezzo per verificare se le 'conseguenze delle immagini sono conformi alle immagini delle conseguenze [delle cose]', ma anche come unica fonte di legittimazione dei postulati da porre a fondamento del procedimento ipotetico - deduttivo. Tuttavia questo realismo di fondo raramente conduce ad asserzioni ontologiche particolari riguardanti cioè l'esistenza di qualche entità teorica o la realtà di qualche grandezza fisica. Consapevole del fatto che un'immagine del mondo ontologicamente fondata non può discendere logicamente dalla conoscenza acquisita, Hertz preferirebbe rinunciare ad essa. Naturalmente questa aspirazione non può essere soddisfatta: un fisico può evitare di affermare la realtà delle entità teoriche o delle grandezze fisiche, ma non può parlare di fisica al di fuori una immagine del mondo ontologicamente fondata che comprenda, perlomeno, gli strumenti di laboratorio. La rinuncia a completare questa immagine del mondo con asserzioni ontologiche che siano compatibili con il complesso della conoscenza acquisita comporta tuttavia anche la rinuncia a beneficiare della funzione euristica che un'immagine del mondo – non assunta come immodificabile – svolge nello sviluppo della scienza. La riluttanza di Hertz nei confronti di un maggiore impegno ontologico può anche essere in parte dovuta alla particolare fase storica in cui si trovava l'elettromagnetismo, caratterizzata dalla coesistenza di diverse immagini del mondo e, quindi, di diverse ontologie. Tuttavia, la scelta dei campi quali entità teoriche fondamentali viene effettuata da Hertz sulla base di un'immagine del mondo in cui non ha cittadinanza l'idea della azione a distanza tra due corpi.