FEDERIGO ENRIQUES: LA FILOSOFIA DELLA FISICA CLASSICA
(Mauro Murzi)

Federigo Enriques (Livorno 1871 – Roma 1946) fu un insigne matematico. Docente universitario, fu rimosso dall'insegnamento a causa delle leggi razziali del 1938. Si interessò di storia e filosofia della scienza. Fu fondatore e presidente della Società Filosofica Italiana. Contribuì alla creazione della rivista *Scientia*, che diresse dal 1907 al 1915. Polemizzò con Benedetto Croce sulla natura della scienza. Croce considerava la scienza un insieme di regole pratiche prive di valore conoscitivo, mentre Enriques attribuiva alla scienza valore conoscitivo e didattico.

In questo articolo descriverò il libro di Enriques *Problemi della scienza*. La prima edizione è del 1906 e la seconda del 1909. La seconda edizione non modifica in modo sostanziale il testo della prima. *Problemi della scienza* tratta di logica, geometria e fisica. Potrebbe apparire un libro datato. *Problemi di scienza* precede i *Principia Mathematica* di Whitehead e Russell, la teoria della relatività e la teoria dei quanti. Il lettore potrebbe domandare perché descrivo un libro di filosofia, che si occupa di logica e fisica, scritto prima delle scoperte che hanno rivoluzionato queste discipline. Si potrebbe rispondere per interesse storico. Ma questa sarebbe una motivazione debole. È indubbio che alcuni autori devono essere studiati approfonditamente per la loro influenza sui posteri. Si pensi a Kant, il cui influsso è così importante da giustificare i più dettagliati studi sulla sua concezione della scienza, pur essendo questa limitata alla meccanica classica elementare. Tuttavia, nel caso di Enriques manca questa influenza sui successori. Il mio interesse verso *Problemi della scienza* non è storico ma teorico. *Problemi della scienza* è una limpida analisi filosofica della fisica classica. È stato scritto prima che la relatività e la meccanica dei quanti fossero ideate. Quindi, i concetti approfonditi in *Problemi della scienza*, quali spazio e tempo, legge naturale, causa ed effetto, osservatore e sistema osservato, assoluto e relativo, sono quelli della fisica classica all'apice del successo. *Problemi della scienza*, è una *summa* della filosofia della scienza classica. Il lettore potrebbe domandare quale residua attualità possa avere la filosofia della scienza classica. È facile rispondere. Come non è possibile capire la teoria della relatività e la fisica dei quanti se non si conosce bene la fisica classica, così non si possono analizzare filosoficamente le teorie moderne senza un'adeguata conoscenza della filosofia della fisica classica. Come non è possibile addentrasi nella teoria quantica dei campi se non si conosce la teoria classica dei campi, né è possibile comprendere le formule della relatività speciale senza conoscere le equazioni dell'elettromagnetismo classico, così è impossibile discutere sensatamente l'indeterminismo in meccanica quantica se non si sa cosa sia il determinismo in meccanica classica. Come si potrebbero discutere le caratteristiche ontologiche ed epistemologiche della funzione d'onda che descrive lo stato di una particella elementare se non si conoscesse la descrizione dello stato di un punto materiale? La conoscenza della filosofia della fisica classica è il prerequisito per lo studio filosofico della fisica moderna. Illustrerò dunque *Problemi della scienza* non da un punto di vista storico, ma come un limpido esempio di un'accurata analisi filosofica della fisica classica.

1. Lo spazio nella fisica classica

Lo spazio è una «*varietà di elementi qualunque*»[1] (161) chiamati "oggetti geometrici". Gli oggetti geometrici soddisfano alcune definizioni e postulati. Da tali definizioni e postulati derivano determinate relazioni tra gli oggetti geometrici. Insiemi diversi di definizioni e postulati implicano relazioni diverse. Esistono dunque differenti geometrie.

Gli oggetti geometrici sono realizzati, in modo approssimato, da oggetti e processi fisici[2]. La "linea retta" è realizzata, in modo approssimato, da un raggio di luce in un mezzo omogeneo. Le relazioni tra gli oggetti geometrici sono realizzate, in modo approssimato, da relazioni tra oggetti e processi fisici. Si consideri la proprietà geometrica "la somma degli angoli interni di un triangolo è 180 gradi". Essa è realizzata dalla proprietà fisica "la somma degli angoli interni di un triangolo i cui lati sono determinati da raggi di luce è 180 gradi con un'approssimazione calcolabile. Tale approssimazione è causata dagli errori sperimentali, dall'imprecisione dell'apparato di misura, dalla non perfetta omogeneità del mezzo e da altri fattori fisici."

---

1 Le citazione sono tratte dalla ristampa della seconda edizione dei *Problemi di scienza*, Bologna, Zanichelli, 1925.

2 Enriques non usa l'espressione "oggetti e processi fisici" ma "oggetti fisici". È più corretto parlare di "oggetti e processi fisici" poiché alcuni correlati fisici degli oggetti geometrici, quali ad esempio il cammino di un raggio di luce come controparte fisica della linea retta, non sono oggetti ma processi.

Le relazioni fisiche che realizzano quelle geometriche sono indipendenti dal particolare tipo di materia, ma non sono immateriali. Non si può astrarre dalla materia e riferire le relazioni tra oggetti geometrici allo spazio in sé, concepito come ente che esiste anche in assenza della materia. Ogni relazione tra oggetti geometrici presuppone la materia, anche se non dipende dalla particolare materia.

> La generalità della Geometria consiste in questo, che: le distinzioni spaziali non *dipendono* dalla materia […] tale indipendenza significa soltanto la coesistenza o la possibilità di tante distinzioni analoghe riferentesi ugualmente a *materie diverse*, non una relazione fisica *assolutamente generale, propria dello spazio in sé*, la quale conservi un senso *all'infuori di ogni materia*. (153)

Lo spazio non è una cosa in sé. Lo spazio non è un substrato immateriale al quale riferire le relazioni tra oggetti geometrici. Le relazioni tra gli oggetti geometrici sono approssimativamente realizzate da relazioni tra oggetti e processi fisici. Queste relazioni fisiche, pur essendo indipendenti dal particolare tipo di materia, richiedono l'esistenza della materia.

Nessun oggetto geometrico è esattamente realizzato da un determinato oggetto o processo fisico. Si consideri l'oggetto geometrico "linea retta". Una realizzazione fisica è un raggio di luce in un mezzo omogeneo. Questa realizzazione è approssimata. Il raggio di luce ha uno spessore finito, mentre la linea retta non ha spessore. Il raggio di luce si disperde. Nessun mezzo è perfettamente omogeneo, quindi il raggio di luce devia dalla linea retta. Un raggio di luce in un mezzo omogeneo realizza l'oggetto geometrico "linea retta" soltanto in modo approssimato. Forse – si potrebbe pensare – il raggio di luce realizza la "linea retta" in una situazione ideale che, pur non essendo fisicamente realizzabile, può essere allestita con il grado di approssimazione desiderato. Si potrebbe diminuire lo spessore del raggio di luce e aumentare l'omogeneità del mezzo. È tuttavia impossibile ridurre gli errori oltre un certo limite. Se lo spessore del raggio di luce diminuisse fino a diventare confrontabile con la lunghezza d'onda, si manifesterebbero fenomeni ondulatori e la propagazione non sarebbe rettilinea. È fisicamente impossibile realizzare, con un grado qualsiasi di approssimazione, gli oggetti geometrici mediante oggetti e processi fisici. Ciò ha indotto alcuni filosofi, tra i quali Kant, a negare la realtà dello spazio:

> si solleva ancora dai filosofi della scuola kantiana la tesi pregiudiziale: non potersi parlare della Geometria come di una scienza fisica, perché lo spazio non risponde ad alcun oggetto reale, ma esprime soltanto una forma subiettiva della sensibilità. (152)

È possibile attribuire un significato fisico determinato e controllabile alle affermazioni della geometria, traducendole in affermazioni su oggetti e processi fisici. Si consideri la proposizione della geometria relativa alla somma degli angoli interni di un triangolo. Nella geometria euclidea tale somma è 180 gradi, nella geometria di Lobačevskij è minore di 180 gradi e in quella di Riemann è maggiore. Si supponga di misurare gli angoli di un triangolo fisico, realizzato tramite raggi di luce che congiungono tre punti scelti. L'imprecisione degli strumenti di misura e gli effetti dell'atmosfera terrestre causeranno errori nella misurazione. La misura della somma degli angoli non sarà 180 gradi, ma sarà talvolta minore e talvolta maggiore. È così preclusa la possibilità di controllare sperimentalmente se i triangoli fisici soddisfino la geometria euclidea, la geometria di Lobačevskij o quella di Riemann? È possibile controllare quale geometria sia soddisfatta dagli oggetti e processi fisici solo se si riconosce apertamente che le relazioni tra gli oggetti geometrici sono fisicamente realizzate in modo approssimato. Sia d la differenza tra la somma degli angoli interni di un triangolo e 180 gradi. Sia A l'area del triangolo. Il rapporto tra d e A è costante. Esso prende il nome di «*curvatura* dello spazio» (168). La curvatura dello spazio è nulla nella geometria euclidea, negativa nella geometria di Lobačevskij e positiva nella geometria di Riemann. Misurando diversi triangoli fisici si può determinare, per via statistica, tenendo conto degli errori sperimentali e dei limiti della precisione degli strumenti di misura, se la curvatura dello spazio sia nulla, negativa o positiva. Il procedimento è il medesimo con cui si determina il valore di una qualsiasi costante fisica, la cui misura è approssimata e affetta da un margine di errore calcolabile. La misurazione della curvatura dello spazio è tanto più facile quanto più è grande il triangolo considerato. Triangoli grandi – osserva Enriques – sono quelli astronomici, con una stella come vertice e il diametro dell'orbita terrestre come base. Non è possibile misurare gli angoli interni di un triangolo astronomico. Si può invece misurare la parallasse della stella, ossia l'angolo con il quale la stella vede l'orbita terrestre. Se lo spazio fisico corrispondesse alla geometria di Lobačevskij, la parallasse di qualsiasi stella sarebbe positiva e superiore a una costante non nulla. Se corrispondesse alla geometria di Riemann, la parallasse sarebbe in alcuni casi negativa. Nella geometria euclidea la parallasse sarebbe positiva senza alcun limite inferiore, cioè tenderebbe a zero al crescere della distanza. La misurazione delle parallassi indica che lo spazio fisico è euclideo. I valori misurati sono

comunque compatibili con le geometrie di Lobačevskij e Riemann, se si suppone che la curvatura dello spazio sia prossima a zero ma non nulla[3]. Enriques conclude quindi che

> *nello stato attuale delle nostre conoscenze, lo spazio fisico è da riguardarsi positivamente come euclideo*. Ma ciò non giustifica la pretesa che la cosa *non potesse* essere diversa. (169)

È possibile che il dubbio sulla natura geometrica dello spazio fisico sia «rimosso soltanto per il presente e rimandato forse ad un lontano avvenire.» (169) Enriques errò circa il «lontano avvenire». Già nel 1917 Einstein pubblicò l'articolo *Considerazioni cosmologiche sulla teoria generale della relatività* nel quale descriveva un modello di universo statico con curvatura costante positiva[4]. Enriques suggerì correttamente dove cercare le prove di uno spazio fisico non euclideo: nella meccanica del sistema planetario. L'ipotesi non euclidea può essere controllata in più modi, non solo attraverso la misurazione di triangoli terrestri e astronomici, ma anche

> studiando le conseguenze di essa per riguardo al sistema planetario; e poteva ben darsi che certe piccole divergenze dalla legge di Newton trovassero così una correzione soddisfacente per la maggiore concordanza dei risultati. […] Infine ripetiamo ancora che, se pure la questione geometrica delle parallele non avrebbe potuto forse essere *risoluta* definitivamente da osservazioni ottiche nel campo dell'Astronomia stellare, queste avrebbero potuto ad ogni modo convalidare il dubbio dei geometri non euclidei, e, rendendolo più determinato, condurre quindi a cercare ad esso una conferma indiretta nel campo della Meccanica planetaria. (170)

I dati a disposizione della fisica classica indicano che lo spazio fisico è euclideo. Tuttavia, la fisica classica non esclude *a priori* la possibilità che lo spazio fisico sia non euclideo. In base ai dati sperimentali conosciuti, la fisica classica esclude *a posteriori* che lo spazio sia non euclideo. La fisica classica dispone degli strumenti sperimentali e teorici per contemplare la possibilità di uno spazio fisico non euclideo. Per la fisica classica, la natura non euclidea dello spazio fisico è un'ipotesi logicamente e fisicamente possibile falsificata dall'evidenza sperimentale. Dunque, la fisica classica non conferma il punto di vista kantiano sul carattere necessario della geometria euclidea.

Questa conclusione è soggetta ad una critica apparentemente decisiva. Gli esperimenti che abbiamo immaginato utilizzano triangoli realizzati da raggi di luce. Non si assume implicitamente che i raggi di luce si propaghino in linea retta? Per controllare se il cammino di un raggio di luce sia rettilineo, non si deve *prima* essere in grado di determinare se una linea sia retta? Non si presuppone, prima ancora di ipotizzare che la luce si propaghi in linea retta, che lo spazio fisico si conformi alla geometria euclidea, le cui proprietà determinano il significato fisico di "linea retta"? Se le esperienze condotte sui triangoli indicassero che lo spazio fisico ha proprietà non euclidee, non si potrebbe dedurre che il cammino della luce non è rettilineo, conservando la geometria euclidea? Se la misurazione degli angoli interni di un triangolo realizzato mediante raggi di luce o se la misurazione delle parallassi stellari indicassero la natura non euclidea dello spazio fisico, gli scienziati si troverebbero di fronte a questa alternativa:

1) conservare l'ipotesi che i raggi di luce si propagano in linea retta e concludere che lo spazio fisico non è euclideo; *oppure*
2) assumere che lo spazio fisico sia euclideo, indipendentemente dai risultati empirici, e concludere che i raggi di luce non si propagano in linea retta.

Il matematico e filosofo francese Henri Poincaré sosteneva che, posto di fronte a questa alternativa, lo scienziato avrebbe scelto la seconda possibilità, adducendo come motivo la maggiore semplicità della geometria euclidea. La scelta tra la geometria euclidea e non euclidea sarebbe quindi *convenzionale*.

Il convenzionalismo trae parte della propria credibilità dalla constatazione che alcuni sistemi geometrici, pur utilizzando definizioni e postulati apparentemente molto diversi, descrivono le medesime ipotesi fisiche. Un esempio è la geometria non archimedea. Essa si basa su postulati molto diversi dalla geometria ordinaria, ma questi postulati descrivono la medesima realtà fisica della geometria ordinaria. La scelta tra la geometria euclidea e quella non archimedea è convenzionale. Non esiste alcuna esperienza fisica che possa distinguere tra le due geometrie, poiché esse descrivono la medesima realtà fisica. Tuttavia,

> accanto a questi sistemi di postulati equivalenti, vi sono anche (come vedemmo) [il riferimento è alla geometria non euclidea] sistemi non equivalenti, cui rispondono possibilità fisiche discernibili con l'esperienza (173).

---

[3] L'ipotesi oggi più accreditata è che lo spazio (o meglio, lo spazio-tempo) sia euclideo. Localmente, in presenza di grandi masse, lo spazio-tempo è non euclideo.

[4] A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1917 (1), 142-152.

Nel caso del confronto tra la geometria euclidea e quella non euclidea, l'impiego di postulati geometrici diversi comporta la previsione di esperienze fisiche diverse. L'esperienza – osserva Enriques nel 1906 – non è ancora in grado di decidere quale geometria descriva correttamente lo spazio fisico. Le osservazioni sono compatibili con la geometria euclidea, con quella di Lobačevskij e quella di Riemann, assumendo per la curvatura dello spazio un valore prossimo a zero. Lo scienziato si trova ancora – siamo nel 1906 – nella condizione di poter scegliere convenzionalmente, secondo il proprio libero arbitrio, quale sistema geometrico adoperare. Esiste dunque un elemento convenzionale nella scelta dei postulati geometrici, che può essere esercitato in due casi:

1) sistemi geometrici diversi che descrivono la medesima realtà fisica;
2) sistemi geometrici diversi che descrivono realtà fisiche diverse che, allo stato della conoscenza, risultano sperimentalmente indistinguibili.

Il primo caso è quello della geometria non archimedea e della geometria ordinaria. Il secondo caso è quello della geometria euclidea e di quella non euclidea, allo stato della conoscenza scientifica nel 1906.

Riconosciuto che il convenzionalismo descrive correttamente alcuni rapporti tra geometri diverse, Enriques critica con attenzione un particolare aspetto del convenzionalismo di Poincaré. Costui sosteneva che eventuali esperienze, realizzate sui triangoli di luce, che indicassero la natura non euclidea dello spazio fisico avrebbero potuto essere riconciliate con la geometria euclidea assumendo che la luce non si propaghi in linea retta. Lo scienziato – argomentava Poincaré – potrebbe sempre avvalersi di tale ipotesi poiché è impossibile stabilire se il cammino della luce sia rettilineo, *se non si è stabilito in precedenza cosa sia una linea retta*. La determinazione sperimentale della geometria dello spazio fisico presuppone che la luce si propaghi in linea retta. Questa ipotesi presuppone che si sappia realizzare fisicamente un linea retta. La realizzazione fisica della linea retta presuppone che si conosca la geometria dello spazio fisico. Il circolo vizioso può essere rotto solo tramite una convenzione, assumendo il concetto geometrico di linea retta della geometria euclidea e spiegando eventuali anomalie con l'ipotesi della propagazione non rettilinea della luce. Poincaré rafforza la propria conclusione tramite alcuni esempi architettati per mostrare come falsificazioni apparenti della geometria euclidea possano essere spiegate tramite l'introduzione di un opportuno campo di forza, il cui valore dipenda *unicamente* dalla posizione, che deformi i corpi rigidi e alteri il cammino dei raggi di luce. Lo spazio fisico di queste «geniali costruzioni artistiche» (155) è intrinsecamente euclideo. Qualunque esperienza che contraddica la geometria euclidea può essere spiegata con l'ipotesi del campo di forza. Enriques obietta che gli esempi proposti da Poincaré raggiungono il loro scopo solo perché suppongono che il campo di forza, che è responsabile delle distorsioni dei regoli rigidi e dell'incurvamento della luce, dipenda *unicamente* dalla posizione. In tal caso – argomenta Enriques – il campo di forza sarebbe una *proprietà geometrica*. Esso non ha nulla in comune con le vere e proprie grandezze fisiche, quali la temperatura e la densità, che non dipendono solo dalla posizione, ma anche dal tempo e da altre proprietà della materia circostante. Una grandezza fisica – afferma Enriques – che dipende solo dalla posizione è una proprietà geometrica dello spazio fisico. Contrariamente a questo ipotizzato da Poincaré, il campo di forza è una proprietà dello spazio. Lo spazio fisico descritto negli esempi di Poincaré è dunque – conclude Enriques – non euclideo.

Enriques avanza un'ulteriore critica al convenzionalismo di Poincaré. L'ipotesi dell'incurvamento della luce è sufficiente a riconciliare le esperienze con la geometria euclidea? Secondo Enriques, tale ipotesi non è sufficiente. Anzi, porta a esiti inaccettabili per un convenzionalista. Si può dare un significato fisico approssimato al concetto geometrico di "linea retta" in modi diversi (156):

1) tramite i corpi rigidi, realizzando la linea retta con un asse di rotazione del corpo;
2) impiegando la meccanica classica, ove la linea retta è realizzata dalla traiettoria di un corpo non soggetto a forze esterne;
3) con l'ottica, ove la linea retta è realizzata da un raggio di luce.

Sono quindi teoricamente possibili tre diverse geometrie, ciascuna dipendente da una diverse realizzazione fisica approssimata del concetto geometrico di "linea retta". Allo stato attuale della conoscenza – dice Enriques – le tre geometrie coincidono nello spazio fisico, nei limiti degli errori sperimentali e delle approssimazioni fisicamente realizzabili. L'ipotesi che la luce non si propaghi in linea retta, avanzata per salvare la geometria euclidea, romperebbe l'identità delle tre geometrie.

> Ma, in tal caso, si tratterebbe di ben altro che di rettificare semplicemente una proposizione della teoria della luce; imperocchè l'insieme dei fatti che vengono significati dalla *ipotesi della linea retta* riuscirebbe smentito in quell'ordine progredito di approssimazione. (157)

Le geometrie costruite utilizzando, come approssimazione fisica della retta, rispettivamente i corpi rigidi, il moto inerziale e i raggi di luce coincidono. Se si modifica l'ipotesi della propagazione rettilinea dei raggi di luce – osserva Enriques – questa coincidenza decade. Quindi, l'introduzione dell'ipotesi dell'incurvatura della luce per proteggere la geometria euclidea da osservazioni che la falsificano non ristabilirebbe la situazione che vigeva prima di tale falsificazione.

2. Il tempo nella fisica classica

Le due proprietà fondamentali del tempo sono la successione e la durata (204). Il giudizio sulla successione temporale consente di determinare se due fenomeni che accadono nello stesso luogo siano contemporanei oppure se l'uno preceda l'altro. Il giudizio sulla durata temporale consente di comparare due intervalli di tempo individuati da fenomeni che accadono nello stesso luogo per stabilire se i due intervalli siano uguali o se l'uno sia maggiore dell'altro. I giudizi sulla successione e sulla durata stabiliscono, per ciascun osservatore in un determinato luogo, una scala temporale. La topologia (il prima e il dopo) è determinata dalla successione dei fenomeni. La metrica (la misura degli intervalli di tempo) è determinata dalla durata.

Gli osservatori posti nel medesimo luogo concordano sulla successione temporale. Se il primo osservatore trova che il fenomeno A accade prima di B e il secondo osservatore trova che B accade prima di C, allora un terzo osservatore, nel medesimo luogo dei primi due, troverà che A accade prima di C. La successione temporale è la medesima per tutti gli osservatori che si trovano nel medesimo luogo. È quindi possibile costruire un'unica successione temporale valida per un dato luogo. La successione temporale può essere utilizzata per misurare la durata. L'intervallo di tempo AB è confrontabile con l'intervallo di tempo CD quando i fenomeni A e C, che segnano l'inizio dei due intervalli di tempo, sono contemporanei. In tal caso, AB è maggiore di CD se e solo se il fenomeno B è successivo al fenomeno D. Ciò consente la costruzione di una scala temporale che coincide per tutti gli osservatori posti nel medesimo luogo. L'estensione di questa scala temporale a luoghi diversi, che consentirebbe il raffronto temporale tra fenomeni spazialmente separati, non è immediata. Essa

> incontra una difficoltà nel fatto seguente: talune sensazioni che associamo pensandole come inerenti a un fenomeno localizzato, le quali si presentano contemporanee ad un osservatore sul luogo del fenomeno, si presentano invece come successive ad un osservatore che si trovi in un luogo diverso. (205)

L'estensione della scala temporale a luoghi diversi sarebbe possibile se si individuasse un processo[5] che si propaghi istantaneamente. Per le ordinarie determinazioni temporali, che coinvolgono fenomeni terrestri, la propagazione della luce può essere considerata istantanea. Si può così costruire una scala temporale approssimata valida per tutti gli osservatori. La misura del tempo è «puramente relativa» (209). Essa è relativa a una qualsiasi misura convenzionale del tempo rappresentata da una serie di fenomeni che si succedono a intervalli distinti, non necessariamente periodici. In genere, ogni misura t del tempo può essere sostituita da un'altra misura $t' = f(t)$, purché f sia crescente. La scelta della funzione f non è puramente convenzionale. Esistono motivi che fanno preferire alcune funzioni f rispetto alle altre. Usando una funzione f crescente qualsiasi, si riscontrerà che taluni fenomeni apparentemente simili hanno durate diverse. Ciò può indurre a cercare una nuova funzione f' che renda uguale la durata di quei fenomeni. La loro diversa durata rispetto a f sarà, relativamente a f', ascritta a qualche irregolarità di f. Ripetendo questo processo, si ottengono scale temporali f, f', f'',..., che convergono verso una scala ideale, rispetto alla quale i fenomeni appaiono più coerenti. Ad esempio[6], due osservatori che misurano il tempo usando i battiti del polso troveranno che il medesimo fenomeno ha una durata diversa. Se invece utilizzano una scala basata su un orologio a pendolo, concorderanno nel giudizio sulla durata. La differenza di durata tra due fenomeni che appare oggettiva rispetto al battito cardiaco è invece attribuita alla irregolarità del battito quando si usa l'orologio. Enriques osserva che, *a priori*, non c'è alcun motivo per il quale due orologi che segnano lo stesso tempo in un dato istante debbano rimanere sincronizzati negli istanti successivi. Non vi sarebbe nulla di strano se accadesse il contrario. Nella determinazione della scala temporale non vi sono verità necessarie ma soltanto verità *a posteriori*, che consentono di estendere la scala temporale a osservatori diversi in istanti diversi.

Il metodo appena descritto per estendere la scala temporale a osservatori posti in luoghi diversi usa l'ipotesi della propagazione istantanea della luce. Ma sappiamo che la velocità di propagazione della luce è finita. Si deve quindi precisare come trasferire la misura del tempo da un luogo all'altro. Siano A e B due

[5] Enriques non usa l'espressione "processo " ma "fenomeno".

[6] L'esempio è mio, non di Enriques.

luoghi distinti. In A sia definita una scala temporale. Come la si potrebbe trasferire in B? Se A e B sono in quiete relativa, la soluzione è semplice. Si invia da A un segnale luminoso a B, che lo riflette in A. Assumendo, per ragione di simmetria, che la velocità di propagazione della luce sia la stessa in entrambe le direzioni, basterà dividere l'intervallo di tempo che la luce impiega nel tornare ad A per ottenere la misura del tempo in B. Questo metodo non è applicabile – osserva Enriques – se A e B non sono in quiete relativa. In questo caso, se t è il tempo in A e t' in B, varrà la relazione $t' = h \cdot t + k$ dove h e k sono costanti locali dipendenti dalla velocità relativa (213). Alla luce delle conoscenze della fisica classica, non è possibile costruire un scala temporale valida per tutti gli osservatori ovunque si trovino. Data la velocità finita della propagazione della luce, ogni luogo ha il proprio «tempo locale» (213) che si trasforma in base alla relazione $t' = h \cdot t + k$.

3. La relatività nella fisica classica

Le equazioni di Maxwell – osserva Enriques – valgono per i corpi fisici fermi rispetto al mezzo. Per estenderle ai corpi in movimento, il fisico tedesco H. Hertz ha proposto due ipotesi:

1) le equazioni di Maxwell valgono «comunque il *campo elettro-magnetico* sia *prodotto da corpi che si muovano entro il mezzo dato*» (298)
2) esiste una «*indipendenza relativa*» dei mezzi nei quali si muovono i corpi, cosicché ognuno «abbia un campo elettro-magnetico proprio» (298)

Queste due ipotesi consentono di predire le modalità di propagazione della luce rispetto a sorgenti in moto. Tali previsioni non sono confermate dalle osservazioni sull'aberrazione della luce delle stelle[7].

> Per spiegare l'aberrazione astronomica, si può cercare di sostituire al principio hertziano, esprimente una *relatività locale* dei fenomeni elettro-magnetici, un *principio di relatività esteso* (299).

Il «principio di relatività esteso» cui fa riferimento Enriques consente di descrivere la luce come una perturbazione dell'etere. Il moto dei corpi è riferito all'etere. Siano A e B due corpi in moto relativo. Da A parta un raggio di luce verso B. L'aberrazione astronomica può essere spiegata assumendo che A sia fermo rispetto all'etere, mentre B sia in moto rispetto all'etere. L'aberrazione è attribuita al moto di B rispetto all'etere. Questa ipotesi, pur spiegando l'aberrazione, conduce a talune conseguenze – quali la dipendenza dell'angolo di aberrazione dal mezzo attraversato dalla luce – che sono contraddette dall'osservazione. L'angolo di aberrazione è infatti indipendente dal mezzo. Per spiegare questa ulteriore anomalia il fisico olandese H. Lorentz ha proposto una versione dell'elettrodinamica che

> postula un sistema di riferimento *assoluto*, cioè indipendente dalla materia, le cui parti non variano le une rispetto alle altre, e a questo etere preso come immobile si confronta il moto dei corpi. Il postulato è veramente arbitrario (300).

L'ipotesi dell'etere assoluto, nonostante l'arbitrarietà denunciata da Enriques, spiega il fenomeno dell'aberrazione. Tuttavia, tale ipotesi ha due conseguenze indesiderabili. La prima è l'esistenza di un sistema di riferimento assoluto. La seconda è la possibilità di

> constatare il *moto della materia rispetto all'etere*, cioè un vero *moto assoluto* che non dipende dalle relazione fra i corpi! (303)

La prima conseguenza è concettualmente errata. Nei fenomeni del moto, "assoluto" può significare solo «relativo più esteso» (11). Un sistema di riferimento può apparire "assoluto" in certe circostanze, "relativo" in altre. Riferiamo il nostro moto alla Terra che, supposta immobile, sembra un sistema di riferimento assoluto. Misuriamo il moto della Terra rispetto al Sole, che rappresenta un nuovo riferimento assoluto. Il Sole si muove rispetto alle stelle fisse, che appaiono come un ulteriore sistema di riferimento assoluto. Ma anche le stelle fisse si muovono.

> In conclusione, il movimento che viene concepito come assoluto in un certo tipo di atti, appare relativo in un campo più esteso; è un assoluto suscettibile di gradi, rispondente al bisogno di cercare alla nostra scienza un punto d'appoggio più fisso. (11)

L'etere non può dunque essere un sistema di riferimento assoluto.

---

[7] L'aberrazione della luce delle stelle è il fenomeno per cui la luce proveniente da una stella raggiunge la Terra con un angolo diverso da quello di emissione. Contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare in base a considerazioni basate sulla dinamica e sull'elettromagnetismo classici, l'angolo con cui la luce raggiunge la Terra è indipendente dal mezzo attraversato.

La seconda conseguenza indesiderabile – ossia, la possibilità di osservare il moto della Terra rispetto all'etere assoluto – è contraddetta dall'esperimento di Michelson e Morley, che conferma il

> *principio di relatività: mediante esperienze ottico-elettro-magnetiche interne ad un sistema mobile, non si può determinare il moto traslatorio di questo rispetto all'etere*. (304)

Il risultato di questo esperimento non è sorprendente – osserva Enriques – perché non vi è alcuna ragione fisica che avvalori l'ipotesi dell'etere assoluto. I progressi della fisica confermano continuamente il principio di relatività. Per difendere l'etere assoluto è stata avanzata l'ipotesi della contrazione della lunghezza dei corpi nella direzione del moto. Formulata dal fisico irlandese G. FitzGerald e da Lorentz, tale ipotesi prevede che lunghezza di un corpo in movimento dipenda dalla sua velocità rispetto all'etere. L'ipotesi della contrazione ha ricevuto da Poincaré una soddisfacente formulazione matematica. L'ipotesi della contrazione dei corpi in moto – osserva Enriques – riduce l'etere assoluto a una congettura non controllabile priva di significato fisico. L'argomentazione di Enriques, anche se non del tutto chiara, credo possa riassumersi nei termini seguenti.

1) L'ipotesi dell'etere assoluto spiega l'aberrazione della luce e prevede la possibilità di rilevare il moto assoluto della Terra.
2) L'esperimento di Michelson e Morley conferma il principio di relatività: il moto assoluto della Terra non è rilevabile.
3) L'ipotesi della contrazione della lunghezza nella direzione del moto spiega l'esito negativo dell'esperimento di Michelson e Morley.
4) L'ipotesi della contrazione impedisce ogni esperienza fisica volta a determinare il moto assoluto della Terra.
5) Quindi, l'ipotesi del moto assoluto della Terra è priva di significato fisico.
6) Dunque, l'ipotesi dell'etere assoluto è priva di significato fisico.

Con quale ipotesi potremmo sostituire la congettura dell'etere assoluto che, pur priva di significato fisico, spiega il fenomeno dell'aberrazione? Si può fare a meno dell'etere assoluto sviluppando un'opportuna *meccanica non newtoniana*. La necessità di una meccanica non newtoniana – osserva Enriques – deriva dell'esperienza stessa dell'aberrazione della luce, indipendentemente dalle ipotesi sull'etere e dalle interpretazioni teoriche dell'aberrazione. La luce emessa da una stella raggiunge la Terra con un angolo diverso da quello di emissione. Poiché la luce esercita una pressione sui corpi, la Terra è soggetta a una forza la cui direzione è diversa dalla direzione della luce emessa dalla stella. Quindi, il terzo principio della dinamica newtoniana – il principio di azione e reazione – è violato.

> *La Fisica, anziché porgere una verifica più precisa della meccanica classica, conduce piuttosto a correggere i principi di questa scienza, presi a priori come rigorosi*. (312)

Non descriverò quali siano – secondo Enriques – le linee guida per lo sviluppo della meccanica non newtoniana. La nuova meccanica era già stata formulata da Einstein che, l'anno prima della pubblicazione dei *Problemi della scienza*, aveva formulato la teoria della relatività speciale. Il punto di maggiore interesse teorico è che, già nell'ambito della fisica classica, è evidente che la meccanica newtoniana richiede modifiche sostanziali per accordarsi con l'elettromagnetismo classico.

4. Conclusioni

Un'attenta analisi filosofica della fisica classica, come quella presentata nel 1906 da Enriques, giunge alle seguenti conclusioni.

1) Le proprietà della geometria rappresentano in modo approssimativo rapporti tra corpi fisici, indipendentemente dalla materia di cui i corpi fisici sono composti, ma non indipendentemente da ogni materia. Non esiste uno spazio fisico in sé che corrisponda allo spazio astratto della geometria, ma esistono relazioni tra corpi fisici che corrispondono approssimativamente a relazioni tra oggetti geometrici.
2) Le geometrie di Euclide, di Lobačevskij e di Riemann esprimono ipotesi fisiche diverse. Non è possibile adottare quel convenzionalismo, invocato da Poincaré, che invece si adatta al confronto tra la geometria ordinaria e quella non archimedea.
3) Gli oggetti geometrici sono realizzati in modo approssimato da oggetti fisici. La linea retta ha tre realizzazioni fisiche approssimative:
   a) tramite i corpi solidi;

   b) tramite il moto inerziale;
   c) tramite un raggio di luce in un mezzo omogeneo.
4) Le esperienze e le conoscenze a disposizione della fisica classica sono a favore dell'ipotesi che lo spazio fisico sia euclideo. Non è tuttavia esclusa la possibilità che lo spazio fisico sia non euclideo. Prove in tale senso possono venire da esperienze con triangoli astronomici o da un più approfondito studio sperimentale e teorico della meccanica classica.
5) Due osservatori, posti in due luoghi diversi, che si muovono l'uno rispetto all'altro, misurano tempi diversi t_a e t_b legati dalla relazione $t_a = k \cdot t_b + h$ dove k e h sono costanti locali che dipendono dalla velocità relativa degli osservatori.
6) Non è possibile costruire una scala temporale valida per tutti gli osservatori, ovunque si trovino, indipendentemente dal loro stato di moto. Esisterebbe una tale scala temporale se la propagazione della luce fosse istantanea.
7) Le esperienze si accordano con il principio di relatività: non è possibile determinare lo stato di moto assoluto di un sistema con esperienze condotte all'interno del sistema. Dunque, l'ipotesi dell'etere assoluto non ha significato fisico.
8) La meccanica newtoniana è contraddetta da talune esperienze ottiche ed elettromagnetiche, indipendentemente dall'interpretazione teorica di tali esperienze.
9) È necessario sviluppare una meccanica non newtoniana che, per velocità piccole in rapporto a quella della luce, si riduca alla meccanica newtoniana.

Queste le conclusione che derivano dai *Problemi della scienza*. Questa visione della fisica classica è diversa da quella cui siamo abituati. Una maggiore attenzione agli aspetti filosofici della fisica classica sarebbe opportuna. Forse lo studio dei lavori che gli scienziati-filosofi hanno dedicato alla fisica classica nei primissimi anni del Novecento potrebbe essere di stimolo per nuovi e più approfonditi studi della filosofia della fisica classica. Con questo intento ho voluto ricordare l'opera di Enriques.

5. Bibliografia

R. Carnap, *Philosophical foundations of physics*, New York, Basic Books, 1966; tr. it. *I fondamenti filosofici della fisica*, Milano, Il Saggiatore, 1971.

A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, in "Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte", 1917 (1), 142-152; tr. it. *Considerazioni cosmologiche sulla teoria generale della relatività*, in *Opere scelte*, Torino, Bollati Boringhieri, 1988, 361-373.

F. Enriques, *Problemi della scienza*, Bologna, Zanichelli, 1906[1], 1909[2], 1925.

H. Poincaré, *La valeur de la science*, Parigi, Flammarion, 1905; tr. it. *Il valore della scienza*, Scandicci (FI), La Nuova Italia, 1994.

H. Poincaré, *Science e méthode*, Parigi, Flammarion, 1908; tr. it. *Scienza e metodo*, Torino, Einaudi, 1997.

H. Reichenbach, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, Berlino, W. de Gruyter, 1928; tr. inglese *The philosophy of space and time*, New York, Dover, 1957; tr. it. dall'inglese *Filosofia dello spazio e del tempo*, Milano, Feltrinelli, 1977.