

Sulle rivoluzioni scientifiche: sviluppo dell'idea di scienza nella
cultura

Gioacchino Antonelli

5 luglio 2013

Indice

1	Filosofia della scienza: “La struttura delle rivoluzioni scientifiche”. L’epistemologia di T. Khun	4
1.1	Paradigmi e Scienza normale	4
1.2	Scienza normale come soluzione di rompicapi	6
1.3	Anomalie e Scoperte	7
1.4	Crisi e Rivoluzioni Scientifiche	8
1.4.1	Anomalie profonde, crisi e risposte	8
1.4.2	Scienza straordinaria	9
1.4.3	Natura delle rivoluzioni e concezione del mondo	10
1.4.4	Soluzione delle rivoluzioni	14
1.5	Progresso	15
2	Uno sguardo al passato	17
2.1	Matematica e ricerca nell’antichità: Egitto e Mesopotamia	17
2.2	Scienza e tecnica in Grecia	19
2.3	Erudizione latina: Seneca, Plinio il Vecchio	20
3	Una summa della scienza enciclopedica medioevale: la “Divina Commedia” e la cosmologia dantesca	22
3.1	Epistemologia di Dante	22
3.2	La geografia e l’astronomia di Dante con spiegazioni moderne	23
4	Storia dell’elettricità. Il paradigma delle equazioni di Maxwell	28
4.1	Breve storia dell’elettricità	28
4.2	Equazioni di Maxwell	29
4.2.1	Rudimenti matematici: Operatore Nabla, gradiente, divergenza, rotore	29
4.2.2	Equazioni di Maxwell in forma ingenua. Passaggio alla forma integrale e differenziale	29
4.3	Derivazione dell’equazione di D’alembert: la luce è un’onda	31

Introduzione

Tutti noi abitualmente adoperiamo il termine *scienza* quasi con frequenza giornaliera per riferirci ad alcune attività di cui forse non abbiamo grande cognizione: la *scienza* la fanno i ricercatori, quelli che, ad esempio in televisione, si vedono armeggiare con degli strumenti a noi conosciuti; gli scienziati sono quelli "che studiano molto" secondo una definizione popolare, e non è un caso che, molto spesso impropriamente, il termine "scienziato" sia attribuito a chi eccelle in ambito scolastico, con tutta una serie di luoghi comuni di cui questo termine si fa portatore. *Scienziato* è nell'immaginario collettivo, eroe allo stesso tempo, e figura ricoperta da un alone di mistero: non tanto la sua persona quanto la sua attività è difficilmente decifrabile, da cui, con deferenza, se ne prendono le distanze. L'obiettivo di questo micro-saggio è innanzitutto chiarire cosa s'intende per scienza sulla base di un'opera che è il cuore dell'epistemologia novecentesca: "La struttura delle rivoluzioni Scientifiche" di T. Khun che può servire a sfatare molti miti contemporanei: Cosa vuol dire fare scienza? La scienza ha in pugno delle certezze assolute? È possibile che *anche gli scienziati* possano sbagliarsi? Esiste una assoluta *verità scientifica* o un *criterio decisionale assoluto e neutro* per dire cos'è giusto e cosa no? In che senso la scienza *sbaglia e progredisce*? Sono queste alcune delle domande a cui si può trovare risposta nelle prime pagine, dall'analisi puntuale del pensiero di T. Khun, messo a confronto, ad esempio, con quello di un altro grande epistemologo novecentesco quale Karl Popper. Il pensiero filosofico, la riflessione speculativa, però, non può esimersi dall'essere corredata di esempi: il saggio di Khun è servito come potente strumento per analizzare alcune delle più importanti esperienze scientifiche dell'umanità: partendo dal passato, **le matematiche pre-elleniche**, con i loro tratti salienti, che ci mettono in comunicazione con periodi persi della memoria ma che, se venissero fatti rivivere, potrebbero mostrare la potenza del ragionamento *pseudo-scientifico* agli albori, seppur con le dovute limitazioni. Si può parlare di *scienza* in quest'ambito o no? Sembra che molti elementi siano a favore della risposta affermativa ma la mancanza di una precisa cognizione e delimitazione dell'ambito di ricerca porta ad avallare una risposta negativa: nell'antichità la figura del filosofo e quella dello scienziato coincidono, come emerge dall'analisi della riflessione scientifica nella Grecia, oppure prevale decisamente l'aspetto erudito-tecnologico, come in ambito latino.

Di curiosità inaspettata si mostra la lettura di Dante che dimostra il carattere enciclopedico della cultura trecentesca e permette di comprendere come in ambito *pre-paradigmatico*, quello a cui sarà eternamente legata certa filosofia per esempio, la scienza si dimostri influenzata da metafisiche di moda o da elementi non propriamente scientifici. L'analisi dell'epistemologia di Dante mette in evidenza, infatti, un grandissimo tributo che egli deve ad Aristotele sulla cui idea di *scienza e sapere* fonda la sua *ricerca della verità*.

Come esempio di rivoluzione moderna sembra di vasta portata quella dell'elettromagnetismo, che lo stesso Khun non esita a citare ripetutamente nella sua opera: dall'antichità, dagli esperimenti con l'ambra, dal cui nome greco "electron" deriva il nostro "elettricità", si arriva alla definizione del paradigma di Maxwell e alla dimostrazione che la luce sia un'onda trasversale diffusa nello spazio. Questo, però, non è il punto finale della ricerca: rimane in sospeso il problema del trascinamento dell'etere che sarà risolto con la relatività einsteiniana.

In cauda vorrei chiarire che il discorso non ha l'ambizione di essere totalizzante ed esaurire gli aspetti presi in considerazione ma ha l'obiettivo di fornire un punto di vista più *oggettivo* su cosa voglia dire fare *ricerca*, e quindi sulla natura dell'attività scientifica.

N.B: Quest'articolo è stato pensato come sviluppo di un'idea di percorso per gli esami di Stato. Nel tentativo di sviluppare un discorso il più coerente possibile, ho evitato collegamenti "forzati", o, a mio avviso, fuori luogo o che non volevo entrassero a far parte di questo micro-saggio. D'altra parte gli esempi di rivoluzioni scientifiche possono moltiplicarsi: gli studi sulla luce e sul colore permearono l'arte dell'ottocento portando

*alcuni artisti come **George Seurat** ad aderire a quella scuola definita Impressionismo Scientifico. Un collegamento con Storia potrebbe riguardare l'analogia fra rivoluzioni politiche e scientifiche che viene analizzata da Khun, e per Inglese si potrebbe tener conto dell'analogia che chiude il saggio dell'epistemologo che vede gli scienziati di un certo "periodo normale" paragonati ai personaggi di 1984 di Orwell, nella misura in cui sono completamente ciechi al significato storico della scienza, avendo formato la propria "educazione" sui manuali scientifici che, fra gli altri, hanno questo effetto*

Capitolo 1

Filosofia della scienza: “La struttura delle rivoluzioni scientifiche”. L’epistemologia di T. Khun

1.1 Paradigmi e Scienza normale

Cos’è la scienza normale?: Il filosofo la definisce “ricerca stabilmente fondata su uno o su più risultati raggiunti dalla scienza del passato a cui una particolare comunità scientifica per un certo periodo di tempo, riconosce la capacità di costituire il fondamento della sua prassi ulteriore”.

Cosa sono i paradigmi?: Si tratta di un insieme di conoscenze “sufficientemente nuove per attrarre un gruppo di seguaci” e che mostrano una “apertura per risolvere problemi d’ogni genere”.

I paradigmi sono un segno di maturità nello sviluppo di una disciplina scientifica. Per motivare quest’affermazione l’epistemologo adduce una serie di esempi che mostrano come una scienza guidata da *paradigmi* possa agire in maniera più matura:

- Per quanto riguarda la concezione della luce, e quindi la branca dell’ottica, l’articolazione segue in linea di massima tre direttive principali
 - Newton riteneva la luce fosse formata da corpuscoli
 - Young e Fresnel dimostrarono che si trattava di un’onda
 - Planck e Einstein parlano di ambiguità onda-particella

Prima di una coerente formulazione di un *paradigma* sulla luce, il panorama *pseudo-scientifico* è caratterizzato da scuole e sottoscuole (a seconda dei casi, la luce viene vista come particelle, come modificazione del mezzo frapposto fra l’occhio e l’oggetto, come interazione del mezzo con un’emanazione dell’occhio).

Si può parlare di scienza?: Gli uomini, allora, possono essere definiti scienziati, ma il prodotto della loro opera non è scienza se limitiamo il nostro campo di indagine al periodo *pre-paradigmatico*.

- Per quanto riguarda l’elettricità nel diciottesimo secolo c’erano altrettante opinioni divergenti quanti scienziati, le quali derivavano dalla filosofia corpuscolare meccanicistica. Si possono distinguere scuole secondo cui:
 - Attrazione e generazione per frizione sono i fenomeni elettrici fondamentali;
 - Attrazione e repulsione sono parimenti fondamentali;
 - L’elettricità è un fluido emanato dai conduttori.

Franklin, invece, propone un coerente paradigma basato sull'elettricità vista come fluido, che guiderà le ricerche dei successivi elettricisti.

- Per quanto riguarda la **matematica** e l'**astronomia**: I loro paradigmi risalgono all'antichità, e dunque si sono mostrate sempre come scienze paradigmatiche.

Come emerge un paradigma? Cosa guida la ricerca prima?: Per l'emergere di un paradigma serve una raccolta di fatti che perlomeno all'inizio è piuttosto casuale e in cui spesso la tecnologia ha giocato un ruolo fondamentale perché elimina questo fattore di casualità. D'altra parte anche nei periodi *pre-paradigmatici* ci deve essere qualcosa a guidare la ricerca. E di solito si tratta di "una metafisica di moda", "un'altra scienza" o "casi storici e personali". E per emergere deve mostrare che "è migliore delle altre teorie in lizza" (per esempio come i fluidisti che, in virtù della loro credenza, tentarono di imbottigliare l'elettricità ottenendo, quale successo, un rudimentale condensatore, la bottiglia di Leyda)

Cosa accade dopo la formazione del paradigma?: Di solito si assiste a una frattura: alcuni si convertono dal vecchio mondo, altri rimangono fedeli alle vecchie teorie, "potendo essere riconosciuto in altri ambiti ma non pi in quella disciplina". A livello di comunicazione si assiste alla nascita di giornali specializzati, società di specialisti, e all'istituzione di un riconoscimento speciale per i risultati raggiunti nella disciplina. Per comunicare fra di loro gli *specialisti* usano brevi articoli indirizzati a colleghi della stessa specializzazione, in grado, gli unici, di leggerli. Viene quasi del tutto eliminato il libro: infatti "lo scienziato che scrive ha maggiore probabilità di veder danneggiata la propria reputazione professionale, che di accrescerne il prestigio". In campi in cui i risultati non sono ancora specifici, infatti, il profano può interagire con la comunità scientifica attraverso il libro, ma ad esempio per la matematica non è più così da tempo.

Quali sono le limitazioni del paradigma?: Il paradigma non può risolvere tutto. È una "promessa di successo che si può intravedere in alcuni esempi scelti ed ancora incompleti". La scienza normale, allora, non è altro che "la realizzazione di quella promessa", che si esplica nell'articolazione del paradigma stesso.

Qual è il compito della scienza normale?: Il compito della scienza normale non è scoprire nuovi fenomeni, non è inventare nuove teorie ma semplicemente funge da "articolazione di quei fenomeni e di quelle teorie che sono già fornite dal paradigma"

Come avviene l'articolazione del paradigma da parte della scienza normale?: Si possono distinguere fondamentalmente due modi di articolare; uno a livello pratico e l'altro a livello teorico. A livello pratico si tratta di:

- Analisi dei dati che il paradigma pone come rivelatori della natura delle cose, i quali debbono essere misurati e determinati con una maggiore precisione;
- Analisi di fatti che pur non essendo interessanti possono venire direttamente messi a confronto con le previsioni ricavate dalla teoria paradigmatica. (Ad esempio gli studi sulla messa a punto della "macchina di Atwood" per dimostrare la seconda legge di Newton, oppure la costruzione del contatore a scintillazione per dimostrare l'esistenza del neutrino);
- Lavoro empirico per articolare la teoria paradigmatica e quei fatti su cui essa si era semplicemente limitata a richiamare l'attenzione in precedenza. In particolare si tratta di, ad esempio:
 - Determinazione di costanti fisiche (Ad esempio l'esperimento di Cavendish per determinare la costante di gravitazione universale del 1790, oppure la determinazione dell'unità astronomica, del numero di Avogadro, della carica elettronica e così via);
 - Formulazione di leggi quantitative (Ad esempio la legge di Boyle, la legge di Coulomb). Non sembra evidente la correlazione ma è essenziale un paradigma per tali leggi: Coulomb, senza l'idea dell'azione a distanza fra particelle, non avrebbe mai realizzato lo strumento che gli permise di ricavare la famosa legge;
 - capire quali "varie possibilità del paradigma" siano più probabili rispetto ad altre e per distinguerle le une dalle altre.

A livello teorico, invece, si tratta di:

- Prevedere informazioni su fatti di valore intrinseco (ad esempio compilazione delle caratteristiche delle lenti);
- Manipolazioni della teoria "compiute perché le previsioni cui esse danno luogo possano venire messe a confronto con gli esperimenti" a causa dell'immensa difficoltà nello sviluppare punti di contatto fra *natura* e *teoria*. Ad esempio è questo il lavoro di determinazione di importanti strumenti matematici per perfezionare l'accordo tra il paradigma dei *Principia* di Newton e la *natura* che tenne impegnati i più grandi matematici del diciottesimo secolo;
- Riformulazione della teoria in una forma logicamente equivalente ed esteticamente soddisfacente.

Al di là di queste distinzioni, però, è anche vero che teoria e pratica si interscambiano: per costruire un'apparecchiatura per fare esperimenti c'è bisogno di teoria, e la stessa apparecchiatura servirà per un affinamento della teoria.

1.2 Scienza normale come soluzione di rompicapi

Lo spettro di previsione di una scienza è piuttosto limitato: si conosce già la gamma dei risultati ottenibili, e l'articolazione del paradigma non porta a novità inattese. Molto spesso, infatti, l'incapacità nella risoluzione del risultato anticipato è "fallimento dello scienziato" e non della scienza.

Quali sono le caratteristiche dei rompicapi strumentali e concettuali di una scienza normale?:

- La certezza che esista una soluzione. La scienza normale fa progressi così rapidi perché la ricerca è concentrata solo su problemi specifici la cui soluzione è impedita solo dalla "mancanza di ingegnosit del loro risolutore";
- Esistono regole che delimitano la natura delle soluzioni accettabili, e i passaggi attraverso cui ottenerli. Ad esempio colui che costruisce uno strumento per determinare le lunghezze d'onda non deve accontentarsi di una apparecchiatura che attribuisce a numeri particolari linee spettrali ma mostrare che i numeri prodotti dal suo apparato sono quelli che nella teoria corrispondono alle lunghezze d'onda. D'altra parte questi procedimenti vanno applicati nel modo giusto: come nel caso della derivazione del movimento osservabile della luna dalle leggi newtoniane del moto della gravitazione.

Cosa influenza la formulazione di certi tipi di rompicapi?: A contribuire ad influenzare la formulazione dei problemi non solo il paradigma ma anche una serie di altri assunti concettuali, strumentali e metodologici. Ad esempio dal 1630 gli scritti di Cartesio assunsero che l'universo fosse composto di corpuscoli. Ciò contiene un'importante direttiva metafisica perché si pongono la domanda "Cosa forma l'universo?" e metodologica perché dicono su cosa concentrarsi, in particolare ridurre tutti i problemi ad interazione di corpuscoli.

Che rapporto c'è fra le regole che guidano la ricerca e i paradigmi?: Le regole derivano dai paradigmi, ma i paradigmi possono guidare la ricerca anche in assenza di regole. Insomma i paradigmi sono prioritari. Infatti "l'esistenza di un paradigma non implica necessariamente neppure l'esistenza di un qualsiasi insieme completo di regole".

Il punto fondamentale è che ciò che i paradigmi hanno in comune non è il soddisfare regole o assunzioni comuni, ma avere rapporti di somiglianza con questa o quella parte del corpo scientifico che la comunità riconosce come uno dei suoi punti fermi acquisiti. L'esempio che viene fatto quello di Wittgenstein che parla di famiglie naturali ("gioco", "sedia", "foglia") che non hanno un criterio di identificazione assoluto comune, ma sono legati da una serie fitta di rassomiglianze.

Dunque i paradigmi determinano la scienza e gli scienziati non imparano mai concetti, leggi e teorie in astratto per se stesse. Al contrario, i paradigmi si mostrano e si fanno conoscere attraverso le loro applicazioni. Dunque qualcosa ci lascia supporre che "ad un certo momento della sua formazione, lo scienziato abbia astratto per intuizione le regole del gioco".

Inoltre i paradigmi sono prioritari perché possono determinare, a differenza delle regole, diverse tradizioni di ricerca che possono coincidere in parecchi punti ma non sono coestensive come nel caso della meccanica quantistica. È però vero che "regole esplicite sono comuni ad una comunità scientifica relativamente vasta, ma i paradigmi non necessariamente". Infatti essi determinano, anche se sono gli stessi, diverse specializzazioni e particolarismi tali che "una rivoluzione prodotta all'interno di una di queste tradizioni non dovrà necessariamente ripercuotersi sulle altre".

1.3 Anomalie e Scoperte

Lo schema generale che viene seguito nel caso dell'esistenza di un'anomalia è spesso il seguente:

- Presa di coscienza di un'anomalia;
- Esplorazione della stessa;
- Riadattamento della teoria paradigmatica in modo che l'anomalia ci appaia non più tale

Quando si può dire che viene fatta una nuova scoperta, in seguito ad una anomalia?: Per comprendere il meccanismo *anomalia-scoperta* si possono produrre diversi esempi.

- **Ossigeno:** *Chi ha scoperto l'ossigeno e come?* In ordine di arrivo per la scoperta dell'ossigeno ci fu **Scheele**, un farmacista svedese, il cui studio fu pubblicato dopo che ormai il risultato era divenuto conclamato. Poi **Priestley** che raccolse il gas liberato dall'ossido rosso di mercurio riscaldato, identificandolo nel 1774 come ossido d'azoto e poi come un tipo di aria contenente una quantità di flogisto inferiore rispetto al comune. **Lavoisier** nel 1775 annotò che il gas era aria senza alterazione, più pura e respirabile. Egli stesso nel 1777 arrivò alla conclusione che fosse un elemento distinto che costituiva principalmente l'aria.

La paternità della scoperta potrebbe essere di **Priestley**: è effettivamente stato il primo ad averlo isolato ma il campione non era puro e l'aveva identificato prima come ossido d'azoto e poi come aria deflogistizzata.

Lavoisier d'altra parte lo identificò prima come aria stessa e poi nel 1777 e per tutta la sua vita pensò fosse "principio di acidità" atomico e che gas di ossigeno si creavano quando quel principio si univa al calorico.

Come si può evincere nessuno ha veramente scoperto l'ossigeno finora: infatti l'"osservazione" e la "concettualizzazione", "il fatto e la sua assimilazione" sono insperabilmente collegati nella scoperta e dunque tale è un processo che richiede tempo.

Dunque la scoperta implica un processo di assimilazione concettuale esteso nel tempo, anche non necessariamente lungo. Dunque essa comporta un leggero mutamento nel paradigma. Senza questo leggero mutamento del paradigma indotto proprio dall'anomalia non si potrebbe mai affermare che **Lavoisier** ha visto dell'ossigeno! D'altra parte è conveniente dare a lui proprio il merito della scoperta di questo nuovo elemento poiché egli era quello ad aver capito che effettivamente la teoria del flogisto fosse sbagliata avendo depositato una lettera sigillata all'Accademia Francese nel 1772. Dunque egli sosteneva che nella combustione qualcosa venisse sottratto nell'atmosfera e quelle sue ricerche possono essere ritenute propedeutiche a mostrare le caratteristiche di ciò che veniva sottratto all'atmosfera. Per vedere ciò che **Lavoisier** vide c'era bisogno di "revisione di un paradigma fondamentale".

- **Raggi X:** Rontgen notò che, in una ricerca normale sui raggi catodici, uno schermo di platinocianuro di bario collocato ad una certa distanza dal suo apparecchio diventava incandescente mentre era in corso la scarica. Egli notò che l'effetto era dovuto ad un agente che presentava somiglianze con la luce.

Qui si nota l'analogia con l'esempio precedente: fu necessario un processo di sperimentazione e assimilazione, diverse settimane in cui Rontgen non abbandonò il laboratorio, per capire di cosa si trattasse

Perché l'ossigeno sconvolge il paradigma teorico e i raggi X no?: L'ossigeno sconvolge la teoria del flogisto mentre i raggi X, anche se non previsti dal paradigma comune, non venivano esclusi, almeno

in maniera evidente, come possibilmente esistenti. D'altra parte, anche se non erano in contraddizione con la teoria accettata, contraddicevano aspettative radicate, di tipo "strumentale". Ovverosia gli strumenti e i dati venivano analizzati senza aspettarsi l'esistenza di questi raggi, che forse erano stati gi in precedenza osservati ma ignorati. "In breve, la decisione di usare una particolare apparecchiatura e di usarla in un particolare modo indica che si dà per scontato in forma più o meno cosciente che si dovranno verificare solo circostanze di un certo tipo".

Fissione dell'uranio: Come esempio di quest'ultima affermazione si potrebbe considerare la ritardata identificazione della fissione dell'uranio. Infatti coloro che la studiavano si aspettavano come prodotto elementi appartenenti all'estremo superiore della tavola periodica e scelsero prove chimiche adatte a mostrare questi.

- **Scoperte indotte dalla teoria:** Nei periodi preparadigmatici e rivoluzionari gli scienziati sono soliti sviluppare molte teorie congetturali e inarticolate che possono esse stesse dare il via alla scoperta. Ad esempio la bottiglia di Leyda che emesse come scoperta dal sottoparadigma dei teorici dell'elettricità che ritenevano essa un fluido. Tale teoria, in un certo modo, fornì il paradigma completo poi.

In conclusione l'emergere di una nuova visione avviene solo sullo sfondo fornito dal paradigma, da parte di colui che "conoscendo con precisione cosa dovrebbe aspettarsi, in grado di rendersi conto di qualcosa che non funziona".

1.4 Crisi e Rivoluzioni Scientifiche

1.4.1 Anomalie profonde, crisi e risposte

Cos'è la crisi?: È semplicemente la presa di coscienza di "un'anomalia più profonda". In alcuni casi "la coscienza dell'anomalia diviene così profondamente radicata che crea una crisi crescente" dovuta alla persistente incapacità di risolvere i problemi anche attraverso le regole. Alcuni esempi di crisi profonde:

- **Crisi della teoria tolemaica:** Tolomeo mette a punto una teoria in grado di fornire accurate previsioni per la posizione delle stelle e dei pianeti ma spesso per la precessione degli equinozi le previsioni fatte non collimavano con le migliori disponibili. Ciò portò all'introduzione di numerosissimi adattamenti nel sistema tolemaico, ma il risultato finale mostra che "l'astronomia cresceva ad un ritmo molto più rapido della sua accuratezza e che una discrepanza corretta in un punto poteva saltare fuori in un altro";
- **Nascita della chimica dei gas:** I chimici credevano che l'aria fosse l'unica specie di gas esistente, fino a che Black mostrò che l'aria fissata (CO_2) potesse essere distinta da quella normale anche se si pensava differissero solo per l'impurezza. Ciò permise di distinguere tanti tipi di gas e per adattare la teoria del flogisto ci fu altrettanta proliferazione di teorie. Ciò è sintomo di crisi (vedi pag. seguente)

Crisi e rompicapi: La crisi si manifesta anche nell'impossibilità di trovare una risposta soddisfacente ad alcuni rompicapi. È un esempio essenziale quello del peso che, secondo la teoria del flogisto, doveva essere perso. D'altra parte la sempre maggiore attenzione ai gas ottenuti dalle reazioni portò a considerare anche questi nel bilancio complessivo del peso e quindi venne notato, molto spesso, un aumento dello stesso che portò a numerosi studi specifici sull'argomento e poi all'abbandono della teoria

- **Etere Luminifero e Maxwell:** La teoria di Maxwell, che è newtoniana, parte da assunti newtoniani: egli "credeva che la luce e l'elettromagnetismo fossero dovuti a spostamenti variabili delle particelle di un etere meccanico". D'altra parte, la teoria di Maxwell, "nonostante la sua origine newtoniana, finì col produrre una crisi per il paradigma dal quale era derivata", crisi che successivamente Einstein risolse.

Come si risponde alla crisi?: Il paradigma non viene abbandonato tout court: "una volta raggiunto lo status di paradigma, una teoria scientifica dichiarata invalida soltanto se esiste un'alternativa disponibile per

prenderne il posto" e l'accettazione di un nuovo paradigma implica più confronti: "un confronto dei paradigmi con la natura e di un paradigma con l'altro". Non c'è rifiuto netto: quando gli scienziati si trovano di fronte ad un'anomalia, non c'è rapido cambiamento: "gli scienziati escogitano numerose articolazioni e modificazioni ad hoc per eliminare ogni conflitto manifesto".

Che rapporto esiste fra ricerca e controfatti? In che senso si può parlare di dualità controfatto-rompicapo?: D'altra parte, se è vero che i controfatti stimolano la ricerca in questo senso, non pu esistere ricerca senza controfatti. Infatti esiste una strettissima analogia fra "rompicapo" e "controfatto": infatti "la scienza normale esiste perché nessun paradigma che fornisca una base alla ricerca scientifica riesce mai a risolvere completamente tutti i suoi problemi". Il tutto dunque sta nell'interpretazione: Copernico vede un controfatto dove gli articolatori delle teorie geocentriche vedono un rompicapo. [Lavoisier/Einstein]

Che caratteristiche ha un'anomalia profonda?: "Per suscitare la crisi un'anomalia deve essere di solito qualcosa di più di una anomalia pura e semplice", vista la dualità di cui si parla precedentemente. Ad esempio alcune discrepanze con il movimento del perigeo lunare (che risultava metà di quello osservato) e della velocità del suono non furono sufficienti a mettere in crisi la teoria di Newton.

Un'anomalia si approfondisce "quando mette in discussione generalizzazioni esplicite e fondamentali del paradigma" come il problema del trascinarsi dell'etere per i sostenitori della teoria di Maxwell; o quando le "applicazioni che essa impedisce hanno un particolare interesse pratico, come la progettazione dei calendari" nel caso di Copernico.

1.4.2 Scienza straordinaria

Quando una anomalia si presenta così, la transizione alla crisi ed alla scienza straordinaria iniziata. Di solito questo momento è caratterizzato da alcuni tratti salienti:

- Gli scienziati possono giungere a considerare la soluzione del controfatto come l'argomento principale della loro disciplina;
- Si ha, dunque, una "proliferazione di articolazioni divergenti" in cui "le regole della scienza diventano sempre più indistinte". Molti specialisti si trovano in disaccordo su cosa sia il paradigma: addirittura "vengono rimesse in discussione le soluzioni precedentemente accettate di problemi considerati risolti". La ricerca assomiglia molto al periodo *pre-paradigmatico*. Di questa proliferazione disarmante furono protagonisti Copernico e Pauli:
 - Copernico dice che essere astronomo al suo tempo è "come essere un artista che deve riunire in qualche modo per fare i suoi quadri, le mani, i piedi, la testa, e le altre membra, ricavandole da modelli diversi, disegnati magistralmente: il risultato è un mostro piuttosto che un uomo"; 2. Pauli dice, in una sua lettera, che "la fisica si trova ancora una volta in una terribile confusione. È troppo difficile per me, preferirei essere stato un attore comico e non aver mai sentito parlare di fisica" e poi "Il tipo di meccanica di Heisenberg mi ha ridato speranza e gioia nella vita"
- Emerge un nuovo candidato per il paradigma con la conseguente battaglia per la sua accettazione.

Come emerge un nuovo paradigma?: Ci sono diversi modi in cui ciò potrebbe avvenire: "Potrebbe emergere, almeno in embrione, prima che una crisi sia sufficientemente sviluppata o sia stata esplicitamente riconosciuta". E' il caso di **Lavoisier** o di **Thomas Young**, i cui studi "apparvero in uno stadio molto precoce della crisi che stava maturando nel campo dell'ottica". In tal caso un insuccesso secondario del paradigma e l'iniziale sfocamento delle regole furono sufficienti ad indurre qualche scienziato a guardare il suo campo con occhi nuovi.

In altri casi, tra la prima presa di coscienza del fallimento e l'emergere di un nuovo paradigma trascorre un **considerevole periodo di tempo**. In questo caso:

- Si "isola con maggiore precisione l'anomalia per darle una struttura";
- Si "applicano più rigidamente le regole della scienza normale per vedere con esattezza fino a che punto possono continuare a funzionare nell'area in cui si manifestano le difficoltà";

- Si ingrandisce il "guasto" per renderlo più rilevante.

In definitiva la struttura del nuovo paradigma pu essere "anticipata dalla struttura che la ricerca straordinaria ha dato all'anomalia" oppure "emergere tutt'a un tratto nel buio più completo, nella mente di uno scienziato profondamente immerso nella crisi".

Qual è il ruolo dello scienziato in questo periodo?: Lo scienziato in questo momento assumerà l'aspetto di colui che cerca a caso, tentando diversi esperimenti per vedere semplicemente che cosa accade, andando alla ricerca di un effetto la cui natura egli non pu minimamente indovinare.

Inoltre egli tenterà costantemente di produrre teorie speculative sulla base delle sperimentazioni.

Che rapporto c'è fra ricerca straordinaria e filosofia?: Molto spesso questa ricerca straordinaria è accompagnata da un altro genere di ricerca: l'analisi filosofica. Generalmente scienza e filosofia creativa sono tenute a debita distanza, a causa della non necessaria esplicitazione dei fondamenti delle regole della scienza normale. D'altra parte in casi di scienza straordinaria, potrebbe essere utile: "non è un caso che l'emergere della fisica newtoniana nel diciassettesimo secolo e della relatività e della meccanica quantistica nel ventesimo secolo siano stati preceduti e accompagnati da analisi filosofiche fondamentali della tradizione di ricerca contemporanea".

Cosa produce la ricerca straordinaria?: Di solito la ricerca straordinaria produce una proliferazione di nuove scoperte che contribuiscono all'eventuale formazione di un nuovo paradigma.

1.4.3 Natura delle rivoluzioni e concezione del mondo

Perché si parla di rivoluzioni scientifiche?: Il termine "rivoluzione" è usato in analogia alle rivoluzioni politiche, in cui le istituzioni non costituiscono risposta ai problemi di una situazione che esse stesse hanno in parte contribuito a creare.

Inoltre, l'obiettivo delle rivoluzioni politiche è quello di **mutare le istituzioni in forme proibite da quelle stesse**. Per avere successo debbono **abbandonare un insieme di istituzioni** a favore di altre e intanto la società cessa di essere governata da istituzioni. L'analogia è ancora più forte se si considerino questi aspetti:

- all'inizio la crisi indebolisce il ruolo delle istituzioni politiche;
- gli individui si allontanano sempre più dalla vita politica ufficiale e si comportano in maniera più indipendente;
- parecchi di questi si riuniscono intorno a qualche proposta concreta per la ricostruzione della società in una nuova struttura istituzionale

La società risulta dunque divisa in due fazioni avverse: chi difende la vecchia struttura e chi difende la nuova, ma ormai **la lotta politica non ha più senso**: si ricorre, dunque, a tecniche di *persuasione di massa* (cfr. fascismi) che spesso includono la forza: insomma le rivoluzioni sono extrapolitiche o extraistituzionali. Il tentativo di argomentare a favore di un paradigma mostra una strana circolarità perché si è mostrato che i procedimenti propri di valutazione e decisione della scienza normale, e dunque anche tali argomentazioni, dipendono proprio dal paradigma.

Perché le rivoluzioni scientifiche devono essere necessarie?: Gli sviluppi scientifici non avvengono secondo un processo cumulativo. Le scoperte, le anomalie profonde, sono intrinsecamente legate al fatto che gli strumenti usati e le previsioni circa la natura si rivelano sbagliati. Infatti ci sono tre tipi di fenomeni attorno a cui creare una nuova teoria:

- Fenomeni già sufficientemente spiegati dai paradigmi esistenti. D'altra parte raramente accade ciò;
- Fenomeni che presentano punti non articolati dalla teoria: è a questi che lo scienziato dirige la propria attenzione;

- L'ostinato rifiuto opposto da alcuni problemi ad ogni tentativo fatto per assimilarli ai paradigmi esistenti: di solito solo questi conducono a una nuova teoria, poiché gli altri sono incasellati nel paradigma

Ciò porterebbe a concludere che le rivoluzioni sono *necessarie*, e quindi accettare una nuova teoria implica riconoscere che quella prima era sbagliata.

Obiezioni alla necessarietà delle rivoluzioni: D'altra parte esistono importanti obiezioni a questo punto di vista: è possibile, come nel caso della dinamica newtoniana, che una teoria precedente venga usata con pieno successo da parte di alcune persone, nel nostro caso di ingegneri e in alcune applicazioni anche da fisici: a velocità relativamente basse, insieme ad altre restrizioni, la teoria newtoniana *appare* derivabile da quella einsteiniana. D'altra parte aggiungendo leggere varianti, in questo modo, si può **salvare ogni teoria** che sia stata applicata con successo a un certo gruppo di fenomeni. L'errore compiuto è quello di **limitare la loro sfera di applicazione a fenomeni e a livelli di precisione** con cui avevano a che fare le prove sperimentali disponibili al tempo in cui la teoria precedente era stata messa a punto.

Vi è un'altro cancro logico se tentassimo di derivare la meccanica newtoniana da quella einsteiniana. Se supponessimo che la meccanica einsteiniana fosse determinata da uno corpo di proposizioni E_1, E_2, \dots, E_n e per derivare quella newtoniana bastasse aggiungere alcune limitazioni, così da ottenere N_1, N_2, \dots, N_m , si compirebbe un errore di valutazione perché quella derivata non sarebbe la meccanica newtoniana dal momento che i concetti con cui si ha a che fare (massa, tempo, velocità) sono profondamente mutati. Ed è qui il nucleo della necessità delle rivoluzioni scientifiche, ovvero una *trasformazione concettuale*. Per derivare la dinamica newtoniana da quella einsteiniana, dunque, bisogna operare una radicale trasformazione che, però, ha senso solo *a posteriori*.

Un esempio più marcato che indica una radicale trasformazione concettuale è il passaggio dalla dinamica aristotelica a quella newtoniana: Dire che una pietra cade verso il centro della terra diviene una tautologia, laddove prima era una affermazione coerente con lo *pseudo-paradigma* adottato. Tutto comincia ad essere studiato in termini di *corpuscoli* e *materia primitiva*. Il concetto di **urto** che ne deriva viene affrontato da Descartes, Huygens, Wren e Wallis. D'altra parte, il fatto che non si riuscisse a fare ricerca senza i *Principia* e che non si riuscisse a dare una spiegazione della gravità, portò la stessa ad essere classificata come *forza innata* e dunque si ebbe una genuina regressione, seppur con grandi mutamenti, a quella che era la "tendenza a credere" scolastica.

Si può dire, insomma, che una **trasformazione concettuale** possa *cambiare* il mondo in cui ci si trova a vivere.

In che senso i paradigmi sono "parte integrante della natura" e come le rivoluzioni possono essere interpretate quali mutamenti della concezione del mondo?: Dopo una rivoluzione scientifica, gli scienziati reagiscono ad un mondo differente: per comprendere *in nuce* questo fenomeno si consideri l'educazione scientifica di uno studente: inizialmente a digiuno delle convenzioni, egli entra in un mondo determinato dall'*ambiente* e dalla particolare tradizione di *scienza normale* del suo settore.

In conclusione, anche in riferimento a ricerche gestaltiche (esperimento delle lenti invertenti, esperimento delle carte, percezione di dimensione, colore, luce...), si è mostrato che *ciò che uno vede* dipende da **ciò a cui guarda** e da **ciò che la sua precedente esperienza visiva gli ha insegnato a vedere**. L'analogia, però, presente dei punti deboli:

- l'individuo sottoposto ad un esperimento gestaltico sa che la sua percezione ha subito un'oscillazione nella misura in cui può controllare quest'oscillazione, seppur limitatamente e anche poiché un *deus ex machina*, ovvero lo scienziato che sta conducendo l'esperimento, lo rassicura.
- l'individuo sa che nulla è cambiato nell'ambiente circostante;

L'indagine scientifica, invece, è diversa. Non esiste nessuna autorità superiore rispetto alla quale mostrare che la visione dello scienziato ha subito uno spostamento, altrimenti essa stessa diverrebbe fonte dei suoi dati. Inoltre non è possibile *controllare* quest'oscillazione: il periodo in cui la luce si mostrava come onda-particella era stato un momento di crisi. Per avere un'idea di come il mondo cambi si possono considerare alcuni esempi:

- *Astronomia e mutamento della concezione del mondo:* Un esempio illuminante è la scoperta di Uranio: Herschel lo osservò nel 1781, quando era ritenuto una stella. Non riuscendo a spiegare la sua traiettoria

e la sua forma lo classificò come cometa e poi suggerì che fosse un pianeta: a quel punto, visto diversamente un corpo celeste osservato per quasi un secolo, il paradigma mutò: l'universo iniziò a contenere meno stelle e più pianeti! Infatti scoperte successive, dopo il 1801 portano a scoprire numerosi altri pianetini o asteroidi. Le stesse modificazioni avvennero con Copernico: non è un caso che macchie solari, comete e stelle vengono osservate e di queste vengono studiati i movimenti, poiché prima il *paradigma* imponeva un cosmo immutabile. Si può dire, quindi, che dopo Copernico gli astronomi **vissero in un mondo differente**.

- *Mutamenti di visione del mondo nella storia dell'elettricità*: Un esempio determinante riguarda, ad esempio, la repulsione elettrostatica. Inizialmente, fino a quando Hauksbee non ne ingrandì notevolmente gli effetti, la repulsione era un rimbalzo meccanico o gravitazionale. Inoltre la bottiglia di Leyda, dopo Franklin, divenne un condensatore per cui non interessava più né la forma della bottiglia né il vetro.
- *Chimica dei gas*: Un altro esempio importante è quello dell'ossigeno: Lavoisier vide ossigeno là dove Priestley aveva visto aria deflogistizzata e ciò indusse una serie di modificazioni a catena nel paradigma e nel modo di vedere il mondo.
- *Galileo e il pendolo*: Galileo vedendo un corpo vincolato ad una catena vede un "pendolo" che potenzialmente ripetesse lo stesso movimento più e più volte all'infinito, laddove Aristotele e i successivi scienziati videro un corpo che con difficoltà raggiungeva uno stato di quiete. In questa maniera diede un grandissimo contributo alla dinamica e formulò argomentazioni complete e solide a sostegno della reciproca dipendenza fra peso e velocità di caduta. Ciò fu dovuto essenzialmente alla sua **grande genialità individuale** ma anche ad un **mutamento leggero di paradigma nel Medioevo**, ovvero la *teoria dell'impetus*, formulata da Buridano e Oresme. secondo questa teoria il movimento continuo di un corpo pesante deriva da una forza interna impressagli dall'agente nel momento in cui lo lancia. Dunque si può affermare che Galileo veda pendoli e non solo pitere oscillanti anche grazie a questo mutamento di paradigma che **muta la sua concezione del mondo**.

C'è chi parla, però, di semplice interpretazione: non cambia il mondo ma la maniera di interpretarlo. D'altra parte, non si può parlare semplicemente di interpretazione perché in primo luogo i dati non sono stabilmente inequivocabilmente, e quindi l'"interpretazione" non ha da dirigersi verso un preciso gruppo di elementi: i dati raccolti sono essi stessi differenti. Lo scienziato non è interprete, o meglio lo è nella misura limitata in cui interpreta ciò che vede del mondo che è via via diverso in base al paradigma: Aristotele interpreta dati relativi a pietre cadenti e Galileo dati relativi a pendoli. Insomma, l'attività di *interpretazione* è interna alla scienza normale e di certo non può modificare paradigmi.

In questa maniera Aristotele, nel suo mondo, misura e *interpreta* il peso della pietra, la distanza a cui è sollevata e il tempo che impiega per arrivare alla posizione di riposo. Galileo, nel suo mondo rischiarato dalla teoria dell'impeto e forse anche da una concezione neoplatonica che spostava l'attenzione su forme circolari, si dedicò a misurare peso, raggio, spostamento angolare e periodo di oscillazione.

Lo stesso processo avviene per i gravi in caduta libera: Aristotele vede un mutamento di stato piuttosto che un processo nella caduta di un grave. È interessato al tempo totale di caduta e allo spazio percorso: dunque al concetto di velocità media. Le registrazioni di Galileo lo portano anzitutto a considerare privilegiato il punto di partenza del moto (laddove per Aristotele fondamentale è il punto di arrivo) e il concetto di velocità viene integrato anche con quello di velocità istantanea.

In questo senso è abbastanza chiaro capire come non si può parlare più di empirismo in senso stretto e la raccolta dei dati di uno scienziato non dipende strattamente dall'"esperienza immediata".

Si può parlare di esperienza sensibile immutabile e neutra?: A questo punto bisogna chiedersi se sia possibile analizzare il mondo attraverso un linguaggio descrittivo neutrale, per poter salvare l'inequivocabilità dei dati. La risposta che emerge dalle precedenti considerazioni è parzialmente negativa ma l'epistemologia occidentale è stata dominata da un secco sì.

È sempre più chiaro come il "dato dell'esperienza" non sia più facilmente riscontrabile ma viene rilevato piuttosto con difficoltà: ciò, specie ultimamente, è dovuto a una complessità degli esperimenti che richiede, in base al paradigma, differenti manipolazioni concrete di laboratorio. Per dirla in termini più semplici: ciò che si fa per studiare un pendolo non è ciò che si farebbe per studiare una "caduta vincolata" come ha fatto Aristotele.

Per quanto riguarda un linguaggio puramente descrittivo, d'altra parte, che potrebbe risolvere il problema della visione del mondo, sembra che una simile eventualità sia ancora più messa in discussione dalle teorie della percezione della mente.

Uno degli ultimi sensi in cui si può dire che il mondo in cui ci si trova a vivere dopo una rivoluzione scientifica è mutato risiede proprio nel fatto che **gli stessi dati sensibili registrati** a volte *mutano*.

Mutamento di paradigma e Dalton: Nel XVIII secolo lo studio della chimica era stato guidato dal paradigma dell'affinità elettiva che aveva portato a grandi risultati. Connaturata al paradigma era la differenza fra mescolanza fisica, in cui le particelle mescolate potevano essere distinte meccanicamente o a occhio nudo, e reazione chimica in cui di solito interveniva la formazione di prodotti come calore o effervescenza. Ciò creava un'ambiguità, laddove le soluzioni vennero considerati dei composti chimici e non poteva essere diversamente poiché avrebbero cercato sempre prove a fare del fatto che **le soluzioni sono composti chimici**: in questo senso la teoria influenza gli esperimenti.

D'altra parte in questa maniera non si sarebbe mai giunti alla *legge delle proporzioni fisse* per le reazioni chimiche, che veniva contraddetto proprio dalle soluzioni che erano considerati composti. Per questo motivo si accese una diatriba fra **Proust**, che supportava l'idea che ogni reazione chimica avvenisse secondo proporzioni definite e costanti e **Bertholet** che si opponeva: egli vedeva un composto dove Proust vedeva una mescolanza: gli scienziati parlavano linguaggi troppo diversi. **Dalton** analizzando il problema con un paradigma diverso maturò una teoria in cui *ipso facto* reazioni che avvenivano senza rapporti fissi e costanti non erano procedimenti puramente chimici. Una volta che le sue ricerche furono riconosciute la legge divenne una tautologia.

In virtù di ciò i dati vennero reinterpretati: non si scrisse più che *CO* contiene il 56% di ossigeno o *CO₂* contiene il 72% di ossigeno, ma che nel primo una unità di peso di carbonio si combina con 1.3 unità di ossigeno e nel secondo caso con 2.6 unità: si metteva in evidenza, così, la legge. Ciò portò alla comprensione della legge di **Richter** sugli equivalenti chimici e stimolò le ricerche di **Gay Lussac** sui volumi di gas in combinazione fra loro.

D'altra parte problemi sperimentali sussistevano: rapporti non interi si presentavano e il lavoro di laboratorio portò ad affinare i dati *tentando di fare in modo che rispecchiassero la teoria*. In ultima analisi si può dire che, un secolo dopo Proust, anche le composizioni chimiche degli elementi più noti avevano subito un cambiamento rispetto al passato.

In che senso una rivoluzione è invisibile?: Gli scienziati e i profani ricavano l'immagine che si fanno dell'attività scientifica da una fonte autoritaria che cela l'esistenza delle rivoluzioni scientifiche. Si tratta di manuali scientifici, opere di divulgazione e opere filosofiche modellate su essi che si rivolgono ad un corpo di problemi dati e teorie già articolato: tutte e tre permettono di conoscere i fondamenti della scienza normale comunicando il vocabolario e la sintassi usata, permettendo di comprendere i risultati più accessibili al grande pubblico e chiarendo la struttura logica del corpo delle conoscenze.

Cosa fa un manuale?: In prima analisi un manuale distrugge il senso storico di una disciplina offrendo un sostituto. È tipico l'accento alla storia, ma spesso si trasforma in notizie frammentarie e per di più comandate: la storia viene falsata e vengono selezionate e distorte solo le ricerche che possono servire alla soluzione dei problemi del paradigma corrente. In questa maniera l'idea errata è che la ricerca si sia svolta **sempre intorno agli stessi problemi**. Questa svalutazione del fatto storico è dovuta al fatto che una maggiore attenzione a questi dettagli viene interpretata come un'attenzione a **errori o idiosincrasie** del passato. In questa maniera la storia si presenta ovviamente ed erroneamente come **processo lineare e cumulativo**. In questo errore cadono anche gli scienziati: Newton scrisse che Galileo aveva mostrato che una forza agente costante produce un movimento proporzionale al quadrato del tempo ma in realtà Galileo non aveva detto niente di simile: per ottenere questa formulazione fu necessaria una riformulazione di problemi e concetti in chiave newtoniana. È indubbio che pedagogicamente questa tecnica sia ineccepibile ma non è questo il modo con cui si sviluppa la scienza. Infatti la scienza non si sviluppa come una scoperta di fatti in modo disorganico uno ad uno ma piuttosto le teorie si sviluppano, assieme ai fatti dei quali forniscono una spiegazione, da una riformulazione della teoria precedente.

Boyle e la definizione di elemento: Un esempio tipico è la definizione di elemento che viene tradizionalmente attribuita a Robert Boyle. Questa definizione ha due significati: innanzitutto rende il neofita conscio

del fatto che la chimica esige definizioni base e poi insegna che uno dei tradizionali compiti dello scienziato è quello di dare definizioni di questo genere, ma certo non deve essere considerata come una vera definizione di elemento data da Boyle: piuttosto il concetto di elemento si può dire già presente in Aristotele ed è in diretta dipendenza con la manipolazione e la teoria chimica contingente.

1.4.4 Soluzione delle rivoluzioni

È importante, infine, capire come avviene il processo di *verifica* che porta un paradigma ad essere preferito rispetto ad un altro. Pochi filosofi della scienza sono ancora dell'idea che esista un *criterio assoluto* per la verifica di teorie scientifiche: molti si chiedono, piuttosto, se essa sia *probabile* alla luce dell'evidenza che esiste.

Si parla, più frequentemente dunque, di **teoria probabilistica della verifica** che comporta un confronto fra la teoria in esame e tutte le altre teorie immaginabili che si adattano alla stessa collezione dei dati, e un'immaginare "sottomissione" della teoria a tutte le possibili prove. D'altra parte, non esistendo un linguaggio descrittivo neutrale, è difficile *immaginare* tutte le esperienze possibili, poiché esse sono *naturalmente* limitate dal paradigma. Allora la **verifica diventa selezione naturale**.

Popper e Khun a confronto: Il ruolo che Khun assegna alle "esperienze anomale" è molto simile a quello che Popper assegna alla falsificazione, con una sostanziale differenza: le esperienze anomale non sono falsificanti nel senso popperiano, ovvero non portano all'abbandono della teoria: infatti "se qualsiasi insuccesso nello stabilire l'accordo fra dati e teoria dovesse essere una ragione sufficiente per abbandonare una teoria, tutte le teorie dovrebbero venire abbandonate" dal momento che molti rompicapo della scienza normale sono definiti da quest'*incompletezza*.

La falsificazione, dunque, non è prodotta o accompagnata dalla comparsa di un'anomalia ma potrebbe essere, a questo punto a buona ragione, definita un processo di verifica. La teoria proposta ha quindi due stadi: **esperienza anomala** e **falsificazione**.

Esiste una procedura decisionale?: Non ha senso, dunque, parlare di *confronto fra paradigmi* per alcune motivazioni già profondamente analizzate:

- I sostenitori di paradigmi diversi sono in contrasto sui problemi che una teoria dovrebbe risolvere;
- Entro paradigmi diversi, vecchi termini, concetti ed esperimenti entrano in nuove relazioni fra loro (la "terra" per Copernico era mobile, per i predecessori no a causa di un problema proprio di definizione...);
- I sostenitori di paradigmi diversi praticano i loro affari in mondi differenti

Il cambiamento dunque deve avvenire tutto in una volta e molto spesso, però, gli scienziati della "vecchia generazione" non si lasciano convincere a farlo. Infatti il trasferimento della fiducia da un paradigma ad un altro non può essere imposto con la forza: un'opposizione ferrea da parte di coloro la cui carriera produttiva è stata legata alla vecchia tradizione di scienza normale non è indice di *ascientificità* o grettezza mentale degli scienziati, ma un'indicazione della natura stessa della scienza normale. Per questa motivazione spesso alcuni paradigmi vetusti tramontano con la morte dell'ultimo scienziato della generazione in cui essi consentivano ancora di compiere una ricerca secondo il metodo della *scienza normale*.

Per quali motivi avviene la conversione?: Alle volte i motivi per cui viene abbandonato un paradigma in favore di un altro sono completamente fuori dall'ambito scientifico. Si può trattare di idiosincrasie autobiografiche o personali, di nazionalità o di reputazione dell'innovatore

- Uno dei dati che può favorire la conversione è indubbiamente anche la possibilità di risolvere problemi che avevano portato alla crisi il vecchio paradigma: Copernico risolse il problema della **lunghezza dell'anno solare** e compilò tabelle astronomiche di gran lunga superiori rispetto a quelle elaborate con la teoria tolemaica.
- Di solito però questo non basta: molto spesso una *conversione* massiccia si ha in seguito a prove a favore che debbono essere ricavate da altri settori del campo: Copernico mostrò che coerentemente con la sua teoria Venere avrebbe dovuto presentare fasi e quando sessant'anni dopo fu mostrato essere così, molti si convertirono al copernicanesimo.

- Un altro motivo risiede spesso nella maggiore eleganza o semplicità della teoria. Persino oggi, ad esempio, la teoria generale di Einstein attrae gli scienziati principalmente per ragioni estetiche

È vero che, all'inizio, può essere adombrato uno *slancio fideistico* nello scegliere il paradigma ma tale situazione iniziale è indispensabile, prima di tutto poiché deve conquistare alcuni sostenitori in modo da sviluppare argomentazioni convincenti tali da attirare altri specialisti: si tratta, insomma, di un **progressivo spostamento della distribuzione della fiducia degli specialisti**.

1.5 Progresso

L'idea di progresso è connaturata alla scienza?: È molto spesso vero che il termine "scienza" è riservato ai campi che progrediscono in maniera evidente: ciò appare chiaro nel momento in cui si moltiplicano i dibattiti circa il fatto se l'una o l'altra delle *scienze sociali* contemporanee sia realmente una scienza.

Un esempio molto persuasivo riguarda il distacco fra arte e scienza: Per molti secoli, fino in particolar modo al Rinascimento, la pittura era considerata la disciplina cumulativa per eccellenza e, proprio per questo, si può spiegare l'affinità fra arte e scienza, che erano due domini molto vicini, e che ben si compendiano in personaggi come Leonardo. Quando l'arte ha rinunciato alla sua caratteristica **cumulazione** allora si è iniziato a sentire il distacco. Forse perché non bene si concilia con l'idea di scienza in continuo *progresso*?

Perché un'impresa come la scienza normale deve progredire?: Indubbiamente il progresso si rivela intimamente congiunto all'idea di **unità** del gruppo che svolge scienza normale sulla base di paradigmi. C'è chi afferma, ad esempio, che in filosofia non esista progresso: ciò non vuol dire che effettivamente non esistano scuole il cui pensiero progredisce e migliora di volta in volta, ma che non esiste un *paradigma* unico accettato, per cui esistono sempre scuole in competizione fra loro che migliorano ma mettono in discussione i fondamenti stessi delle altre.

Insomma, nei momenti di scienza normale, il progresso sembra sicuro e non si potrebbe interpretare diversamente il lavoro del gruppo. Un altro elemento essenziale, d'altra parte, è l'**isolamento senza eguali**: non esistono altre corporazioni professionali in cui l'opera dell'individuo sia così esclusivamente rivolta agli altri membri della stessa professione dai quali esclusivamente verrà valutata. Conseguenze fondamentali di questo isolamento sono:

- l'utilizzo di un insieme coerente di criteri, adottato dal gruppo, da cui solo lo scienziato deve essere valutato;
- La possibilità, per uno scienziato, di passare facilmente da un problema a un altro, scegliendo quello per cui ha più speranze di trovare una soluzione, poiché non esiste un problema che *urgentemente* ha soluzione

Una causa di questo isolamento è l'educazione estremamente iniziatica svolta ad opera dei manuali, fino addirittura al terzo o quarto anno universitario o nel post-dottorato, laddove per integrare i manuali alcuni professori permettono l'adozione di articoli moderni o monografie di ricerca che cominciano *là dove i risultati disponibili finiscono*.

Perché nelle rivoluzioni ci deve essere progresso?: Le rivoluzioni scientifiche si concludono con la vittoria di uno di vari paradigmi. Ammettere che ciò non sia progresso portà a voler dire che i sostenitori del paradigma *vincente* non avevano ragione e i loro oppositori sì e ciò è assurdo: si può affermare perlomeno che per essi e nell'ottica futura della scienza che guarderà al passato, quell'esperienza è stata un *progresso*.

La scienza tende alla verità?: Il processo di scienza descritto fino ad ora è un processo *a partire da* stadi primitivi: un processo i cui stadi successivi sono caratterizzato da una comprensione più raffinata della natura, ma non un processo di evoluzione *verso* qualcosa: non è utile immaginare che esista qualche completa spiegazione della natura.

L'idea è molto simile a quella di Darwin, che rappresenta il corpus più importante del suo pensiero filosofico e scientifico: le note teorie evoluzionistiche pre-darwiniane affermavano che l'evoluzione avesse uno scopo finale, ovvero che esistesse una forza direttrice che portasse l'uomo, o qualsiasi altra entità naturale ad avvicinarsi all'idea di "uomo" o "entità naturale" perfetta che fosse presente *prima* della creazione, per

alcuni nella mente di *Dio*. Lo sviluppo delle idee, quindi, agisce come una selezione naturale e, certo, nulla ci permette di dire che tenda a una qualche tipo di perfezione.

Quali sono le caratteristiche di una comunità scientifica?:

- Lo scienziato deve essere interessato a risolvere problemi concernenti il comportamento della natura;
- le soluzioni non devono essere personali ma debbono venir accettate da molti;
- La comunità deve essere nettamente definita dalla stessa specializzazione scientifica;
- Non bisogna far appello a capi di stato o alla maggioranza del pubblico in questioni scientifiche

Capitolo 2

Uno sguardo al passato

L'obiettivo di questo capitolo è triplice: mettere in evidenza un aspetto che l'epistemologo Khun evidenzia all'interno del suo trattato, ovvero indagare le motivazioni per cui si può parlare di matematica come campo *paradigmatico* già nell'antichità; comprendere come la matematica si configuri agli albori del pensiero e se sia opportuno o meno parlare di ricerca in quest'ambito; studiare l'evoluzione del pensiero scientifico, in maniera molto sommaria, a partire dalle civiltà pre-elleniche a quella latina, evidenziandone tratti in comune e diversità.

2.1 Matematica e ricerca nell'antichità: Egitto e Mesopotamia

Della matematica egiziana c'è rimasto ben poco, a causa del materiale con cui venivano all'epoca redatti i documenti: si tratta di papiri, certamente meno resistenti delle tavole babilonesi su cui venivano incisi i *cunei* che sono arrivate a noi intatte in gran quantità. I papiri che ci sono rimasti, uno fra i più importanti è il *Papiro di Rhind*, esemplare redatto nel Regno Medio (2000-1800 a.C.), ci permettono di ricostruire quello che era lo status di una disciplina come la matematica, che, in questo periodo, di certo non viene a configurarsi come **ricerca**.



L'analisi dei problemi del **Papiro** mette in evidenza un *modus operandi* molto ingenuo, che si rispecchia in alcune scelte:

- **Estraneità alla notazione posizionale:** Gli egizi adottarono come sistema di numerazione la base 10 ma erano sprovvisti di un sistema posizionale. Nel momento in cui noi scriviamo i numeri, come ad esempio 23, siamo ben coscienti del fatto che ogni numero, a seconda della propria posizione, assume un determinato valore: il 2 di 23 vale 20 e il 3 rappresenta le unità. Gli egizi, invece, avevano un simbolo per ogni potenza del 10 e la loro scrittura diveniva farraginosa nella ripetizione dei simboli. Ad esempio il simbolo del 10 era \cap e quello dell'1 era $|$. Allora 23 diviene

$\cap\cap|||$

- **Cattivo padroneggiamento delle frazioni:** Gli egizi lavorarono anche con numeri razionali, ma non riuscirono mai a concepire le frazioni come le concepiamo noi, o i numeri con la virgola, non avendo

un sistema posizionale. Per gli egizi non avrebbe senso scrivere $\frac{2}{5}$, che vorrebbe dire prendere un intero dividerlo in 5 parti e considerarne due: piuttosto essi preferivano adoperare le **frazioni unitarie** della forma $\frac{1}{n}$ e tutto il loro lavoro si risolveva nel trasformare qualsiasi frazione in somma di frazioni unitarie (come dimostra un papiro che presenta tali scomposizioni di $\frac{2}{n}$ con n che va da 5 a 101).

- **Scarso sviluppo dell'aritmica:** Gli egizi non avevano un modo per moltiplicare numeri, o dividerli. Perciò utilizzavano un farraginoso metodo, detto della *duplicazione*. Pertanto moltiplicare $23 \cdot 15$ diveniva uno stressante esercizio: Si raddoppiava 23 ($46 = 23 \cdot 2$), poi ancora ($92 = 23 \cdot 4$) e ancora ($184 = 23 \cdot 8$). Infine si scriveva il prodotto come somma di duplicazioni:

$$23 \cdot 15 = 23 \cdot (8 + 4 + 2 + 1) = 23 \cdot 8 + 23 \cdot 4 + 23 \cdot 2 + 23 \cdot 1 = 184 + 92 + 46 + 23 = 368$$

Questa semplicità di metodo si concilia con il concetto di **ricerca** che si può astrarre dalla lettura dei papiri matematici: i problemi sono di carattere quasi esclusivamente tecnico, riguardando spesso distribuzioni di pani o di birre e risolvendosi, algebricamente, al massimo a semplici equazioni di primo grado. L'evidente assenza di una ricerca più astratta, che inizierà a caratterizzare la matematica babilonese e poi quella greca, in particolare alessandrina, è dovuta, dunque, al carattere eminentemente pratico degli egizi. E ciò è evidente se consideriamo che, nonostante la bassezza del ragionamento, abbiano lasciato ai posteri grandiose opere di edilizia quali sono le piramidi: non è un caso che **la geometria sia più sviluppata** e arrivi ad indagare, per la prima volta nella storia, figure curvilinee dando una prima approssimazione di π come $3 + \frac{1}{6}$.

I molti difetti di metodo della matematica egizia vengono in gran parte appianati, però, dai babilonesi, che sviluppano un'idea di matematica di più ampio respiro e meno legata alla contingenza.

Si può parlare, per i babilonesi in *nuce* e per i greci più apertamente, della formazione di un vero e proprio *paradigma* matematico: essi sviluppano metodi più astratti e generali rispetto a quelli egizi che, come tali, possono essere usati per risolvere una gran quantità di problemi. Non ci è pervenuto nessun documento che attesti effettivamente la canonizzazione di questi metodi (un equivalente di un nostro manuale, s'intende) ma la maestria nel risolvere certi problemi algebrici di elevata difficoltà evidenze depone a favore di quest'ipotesi. I babilonesi, dunque, avevano sviluppato metodi più efficienti:

- **Sistema posizionale:** È identico al nostro modo di scrivere i numeri, con una leggera differenza: noi scriviamo in base 10 e i babilonesi adottavano la base 60. Ciò vuol dire che se un babilonese vedesse scritto 22 lo interpreterebbe come $2 \cdot 60^1 + 2 \cdot 60^0 = 2 \cdot 60 + 2 = 122$. D'altra parte, bisogna fare attenzione ad un importante elemento: nella matematica babilonese non esiste il concetto di zero, anche se successivamente venne introdotto un simbolo che aveva la sua stessa funzione, ma limitatamente alle posizioni *intercifrali*. Ciò vuol dire che il 22 potrebbe essere interpretato come 220 o 2200 e così via. Di solito il contesto eliminava quest'ambiguità, ma ciò rimane un grande punto debole.
- **Buon uso delle frazioni:** Usano un sistema posizionale i babilonesi possono giungere più facilmente al concetto di *numero con la virgola*: infatti 2,34 per noi vorrebbe dire $2 + \frac{3}{10} + \frac{4}{100}$. Così per i babilonesi scrivere 2;45,7 voleva dire $2 + \frac{45}{60} + \frac{7}{60^2}$. In questa maniera poterono maneggiare più facilmente le moltiplicazioni, le divisione che vennero sviluppate con le frazioni così come con i numeri interi.
- **Buona aritmica:** I babilonesi svilupparono interessantissimi metodi per approssimare le radici. In una tavoletta è presente l'approssimazione $\sqrt{a^2 + b} = a + \frac{b}{2a}$ che è utilizzata anche oggi. Inoltre essi compilarono numerose tabelle, come quella dei quadrati (x^2), dei cubi (x^3), dei logaritmi, della somma di quadrati e cubi ($x^2 + x^3$) e le utilizzavano per risolvere le equazioni, interpolando laddove i risultati non fossero presenti nelle tabelle. Maturarono un metodo per risolvere semplici equazioni di secondo grado, sistemi di equazioni in due incognite e, addirittura, le equazioni di terzo grado, evidenziando una notevolissima capacità nel concetto di *trasformazione algebrica*. Un esempio per tutti: Per risolvere l'equazione $ax^3 + bx^2 = c$ essi moltiplicavano per $\frac{a^2}{b^3}$ ottenendo

$$\left(\frac{ax}{b}\right)^3 + \left(\frac{ax}{b}\right)^2 = \frac{ca^2}{b^3}$$

Poi sostituendo $\frac{ax}{b} = y$ riscrivevano

$$y^3 + y^2 = \frac{ca^2}{b^3}$$

e usando le tavole della somma di cubi e quadrati risolvevano l'equazione e poi tornavano indietro alla x .

Certamente, su queste basi, la **ricerca** poteva essere più fittamente sviluppata: alcune tavolette (come la *Plimpton 322* in figura) mostrano che i babilonesi si interessavano anche a problemi di natura non pratica. In questo caso sembra quasi che la tavoletta rappresenti una lista di valori di $\sec^2(\alpha)$ con α fra 45 gradi e 31 gradi. Inoltre altre tavolette indagano alcuni problemi come trovare la somma dei primi quadrati o delle serie geometriche. Inoltre, per quanto riguarda la geometria, si sviluppa il concetto di similitudine, è conosciuto il teorema di Pitagora, diversamente dagli egizi e alcuni problemi di geometria sembrano semplici giochi che non hanno nulla a vedere con le esigenze pratiche.



Nonostante questo salto di qualità rimangono alcuni problemi comuni che inizieranno ad essere affrontati con maggior cognizione più tardi. Alcuni di questi:

- Non esiste, in nessun caso, una prova che egizi o babilonesi avessero astratto da quei problemi **regole generali**, anche se per i babilonesi è estremamente probabile.
- Non esiste un'indagine approfondita del **problema dell'infinito**: i babilonesi evitano i numeri decimali infiniti, periodici o aperiodici, così come sembra che la cognizione di infinito sia assente negli egizi. Ciò è intimamente legato al **problema dell'approssimazione**: non è dato sapere con certezza se i babilonesi, o gli egizi, credessero che i loro risultati fossero assolutamente giusti o che fossero solo delle approssimazioni. È il caso del π : non sappiamo se la stima egizia $(3 + \frac{1}{8})$ fosse veramente una stima o gli egizi pensassero che quello era effettivamente il valore di π .
- Non esistono discorsi su metodi o principi.

D'altra parte, anche se culture pre-elleniche vengono accusate di essere utilitaristiche, alcuni problemi che mostrano evidenti formulazioni assurde dal punto di vista concreto, molti contenuti nelle tavolette babilonesi, mostrano il piacere e l'interesse non solo per questioni tecniche ma anche per piacevoli *giochi matematici*

2.2 Scienza e tecnica in Grecia

La ricerca scientifica non viene **mai concepita in maniera autonoma nell'antichità greca** ma solo ed esclusivamente come un aspetto dell'indagine filosofica: non esiste pertanto un termine che codifichi il concetto di scienziato, ma è noto che i grandi filosofi e pensatori del passato si dedicassero alla risoluzione di problemi che potrebbero essere definiti scientifici.

Lo **studio della fisica**, come nel caso di Epicuro, diviene quasi esclusivamente funzionale a liberare l'anima dalle passioni per raggiungere la perfezione morale, e la ricerca tecnologica viene rifiutata. Pasoli, un critico, ricollega questo rifiuto ad una mancanza di **mobilità sociale** nell'antichità: pertanto il compito del filosofo non può essere degradato a quello dell'artigiano. La tecnologia, infatti, non riesce a superare uno stato "artigianale-schiavistico" e non arriva mai ad imporsi culturalmente come tematica propria: i due momenti di scienza e tecnica, nella grecia arcaica, sono confusi. Per Platone **epistème** è un sistema di conoscenze e calcoli, "costrutti teorici e osservazioni rilevanti", laddove la *technè* è ogni attività pratica finalizzata a uno

scopo: per Platone solo "l'uomo esperto nella *technè*, facendo di questa sua virtù un episteme, può liberarsi dai vincoli naturali".

Con la morte di Alessandro Magno, però, si avverte un progressivo distacco fra scienze esatte e filosofia: l'ultima rivolge l'attenzione alla **natura** e al **comportamento** mentre il maggior numero di problemi, la settorializzazione della ricerca, il moltiplicarsi di luoghi di cultura come i Musei o la Biblioteca di Alessandria porta nuova linfa vitale allo studio delle scienze esatte. Nasce e si sviluppa la ricerca tecnologica e è sempre più marcata la correlazione scienza-tecnologia, da cui entrambe giovano e che è adombrata, come concetto, all'interno del saggio di Khun.

C'è chi ha parlato, a questo proposito, di *Rivoluzione dimenticata* anticipando la rivoluzione scientifica di due millenni: ciò sembra difficile se ci accostiamo alla lettura degli avvenimenti con gli strumenti forniti dal **Capitolo 1**: in questo periodo non mancano grandi scienziati e menti brillanti (Euclide, Archimede, Apollonio, Aristarco, Eratostene, Ipparco, Menelao...) ma certamente ciò che si fa non è scienza perché è raccolta di dati e ricerca personale slegata da qualsivoglia tipo di paradigma, con una comunicazione ancora regolata dal libro, con un mancanza di quell'isolamento che Khun attribuisce alle comunità scientifiche che in questo periodo sono piuttosto *pseudo-scientifiche* risentendo di idee teologiche e filosofiche.

2.3 Erudizione latina: Seneca, Plinio il Vecchio

D'altra parte se in minima parte i Greci, pur avendo assorbito conoscenze egizie e babilonesi le rielaborano entro certi limiti concependo la ricerca al di là delle sue immediate applicazioni pratiche, i romani hanno conoscenze perlopiù di riporto e selezionate quasi esclusivamente in base alla possibilità di applicazione pratica.

Il tipico "scienziato" romano è Marco Agrippa che misura l'estensione delle province dell'impero romano calcolando le distanze su tutte le pietre miliari delle strade imperiali, laddove il tipico "scienziato" greco è Eratostene che misura la circonferenza della terra in base ad un puro ragionamento.

A Roma, pertanto, hanno particolare successo i manuali e non è un caso che spesso da opere più grandi e di più ampio respiro, specie nel IV-V secolo a.C., venissero tratti compendi, manuali e commenti di estrema funzionalità: il "Medicina Plinii" dalla "Naturalis Historia" e il "Breviarium ab Urbe Condita" dall'omonima opera di Livio. La scuola proponeva modelli prestabiliti, e la stessa formazione seguiva tappe che impendivano al "civis romanus" di avere tempo per la speculazione: un esempio per tutti sia le "Institutiones Oratoriae" di Quintiliano, scritte per il potere, per "servire temporibus" allo scopo di indicare l'iter da seguire per la formazione di un cittadino modello che fosse il burocrate.

D'altra parte l'esigenza di redigere trattati scientifici c'è e non può mancare: Seneca scrive le *Naturales Quaestiones* e Plinio la *Naturalis Historia*. D'altra parte è azzardato parlare di ricerca scientifica in entrambi i casi.

Per quanto riguarda Seneca, l'opera non persegue finalità scientifiche evidenti ma quasi esclusivamente morali: nell'ottica del suo stoicismo, ad esempio, sono frequenti gli ammonimenti a non lasciarsi impaurire dalla vita. Nel passo seguente, ad esempio, parla di catastrofi naturali ma il suo obiettivo non è quello di indagarne le origini ma di mostrare che il saggio deve essere imperturbabile perché la morte si nasconde dietro le catastrofi come in semplici atti quotidiani.

"Si vultis nihil timere, cogitate omnia esse metuenda; circumspicite quam leuibus causis discutiamur: non cibis nobis, non umor, non uigilia, non somnus sine mensura quadam salubria sunt; iam intellegitis nugatoria esse nos et imbecilla corpuscula, fluida, non magna molitione perdenda. Sine dubio id unum periculi nobis est quod tremunt terrae, quod subito dissipantur ac superposita deducunt! Magni se aestimat qui fulmina et motus terrarum hiatusque formidat. Vult ille imbecillitatis sibi suae conscius timere pituitam? Ita uidelicet nati sumus, tam felicia sortiti membra, in hanc magnitudinem creuimus! Et ob hoc, nisi mundi partibus motis, nisi caelum intonuerit, nisi terra subsederit, perire non possumus! Unguiculi nos et ne totius quidem dolor sed aliqua ab latere eius scissura conficit! Et ego timeam terras trementes, quem crassior salina suffocat? Ego extimescam emotum sedibus suis mare, et ne aestus maiore quam solet cursu plus aquarum trahens superueniat, cum quosdam strangulauerit potio male lapsa per fauces? Quam stultum est mare horrere, cum scias stillicidio perire te posse! Nullum maius solacium est mortis quam ipsa mortalitas, nullum autem omnium istorum quae extrinsecus terrent quam quod innumerabilia pericula in ipso sinu sunt. Quid enim dementius quam ad tonitrua succidere et sub terram correpere fulminum metu? Quid stultius quam timere nutationem terrae aut subitos montium lapsus et irruptiones maris extra litus

eiecti, cum mors ubique praesto sit et undique occurrat nihilque sit tam exiguum quod non in perniciem generis humani satis valeat? Adeo non debent nos ista confundere, tamquam plus in se mali habeant quam vulgaris mors, ut contra, cum sit necessarium e vita exire et aliquando emittere animam, maiore perire ratione iuuet. Necesse est mori ubicumque, quandoque: stet licet ista humus et se teneat suis finibus nec ulla iactetur iniuria, supra me quandoque erit. ¿Quid? interest, ego illam mihi an ipsa se mihi imponat? Diducitur et ingenti potentia nescio cuius mali rumpitur et me in immensam altitudinem abducit; quid porro? Mors leuior in plano est? Quid habeo quod querar, si rerum natura me non uult iacere ignobili leto, si mihi inicit sui partem? Egregie Uagellius meus in illo inclito carmine: - Si cadendum est-, inquit, - e caelo cecidisse uelim-. Idem licet dicere: si cadendum est, cadam orbe concusso, non quia fas est optare publicam cladem, sed quia ingens mortis solacium est terram quoque uidere mortalem. " (Nat. Quaes. VI, 2)

Ecco come anche la fisica può diventare filosofia morale.

Per quanto riguarda Plinio il Vecchio, possiamo sicuramente dire che l'opera di ricerca scientifica è più vasta, anche se poco originale: egli consulta più di duemila opere greche di più di cinquecento autori. Il filtro è sempre quello della prospettiva sotica: oltre all'enciclopedismo tipico di chi prova profondo rispetto verso l'universo, atteggiamento tipicamente stoico, tutta l'opera è impregnata dal moralismo: frequenti le accuse all'avarizia anche in ambiti che dovrebbero essere squisitamente tecnici: egli non distingue **valutazione scientifica** da **valutazione morale**. Proprio queste esigenze hanno come effetto una **scarsa attenzione alla manualità**: il destinatario dell'opera altro non è che l'uomo colto il cui obiettivo era quello di aumentare le sue conoscenze astratte.

L'opera è di una modernità sconcertante se si pensa al riferimento puntuale degli autori cui fa riferimento, o alla insaziabile sete di curiosità. D'altra parte la visione del mondo è ancora terribilmente legata all'antichità: antropocentrismo e idea di aver esaurito le conoscenze scientifiche sono due gravi tarli dell'opera.

Capitolo 3

Una summa della scienza enciclopedica medioevale: la "Divina Commedia" e la cosmologia dantesca

L'obiettivo di questo capitolo è triplice: analizzare gli aspetti dell'epistemologia di Dante, e dunque la sua concezione di ricerca, di scienza e di metodo di cui si fa portavoce per un'epoca storica; comprendere se alla luce dell'opera di Khun, si può parlare di scienza per quanto riguarda il periodo medioevale; analizzare alcuni passi della Divina Commedia in cui s'intende ravvisare la modernità delle conoscenze cosmologiche dantesche.

3.1 Epistemologia di Dante

È indubbia l'influenza che su Dante ha il "Filosofo", ovvero Aristotele. La sua epistemologia, in gran parte infatti, può ricondursi espressamente alle esperienze aristoteliche.

- **Presupposti:** Secondo Aristotele *alla mente in quanto capacità di conoscere le cose necessarie compete la virtù o abito dianoetico della scienza*, e la scienza "dice lo Filosofo nel sesto dell'Etica essere perfetta ragione di certe cose".
- **Procedimento:** Il procedimento conoscitivo vede interessate tre diverse entità.
 - *Soggetto conoscente:* Secondo la definizione della scienza, nella sua *mente* è presente una particolare capacità. Ma non solo: Dante radica la possibilità di acquisire scienza nell'umano desiderio di conoscere ("tutti li uomini naturalmente desiderano di sapere")
 - *Procedimento razionale:* Si tratta del procedimento sillogistico che partendo da principi giunga a conclusioni. I principi, però, per essere tali devono essere ricavati dall'esperienza sensibile, veri e certi. Solo in questo caso si può parlare di dimostrazione.
In tal caso "come dice lo Filosofo nel primo de la Fisica "bisogna procedere da quello che conosciamo meglio a quello che conosciamo meno. Perciò, nel caso della metafisica ciò che ci è più noto sono gli effetti e quindi la dimostrazione è detta *quia*; nel caso della matematica e della fisica la dimostrazione muove dalle cause agli effetti, e quindi è *propter quid*.
Il sillogismo, d'altra parte, può generare anche opinione se parte da premesse probabili e ciò è ben ammesso: si aggiungono, però, altre argomentazioni come l'induzione, l'entimema e l'esempio.
 - *Oggetto conosciuto:* Esso è presupposto a mo' di principio mentre la dimostrazione verte su di esso.
- *Gerarchia di scienze:* "Si come dice Aristotile nel cominciamento de l'Anima, la scienza è alta di nobilitade per la nobilitade del suo subietto e per la sua certezza ". Perciò è possibile gerarchizzare le scienze: in basso le sette arti liberali; poi le tre filosofie (naturale, metafisica e morale) e infine la teologia che "è bianchissima e senza errore "e che diventa esclusivamente dottrina di Cristo, che può

essere caratterizzata negativamente come la rimozione della ragione dall'ambito della Teologia, come ha ben detto Foster.

- *Ricerca della verità*: Il procedimento di ricerca della verità dantesco è mutuato dalla scolastica: bisogna prima confutare le opinioni opposte e poi provare ciò che è vero. La disputa scolastica, d'altra parte, si articolava in 5 momenti: il problema posto sottoforma di "questione", introduzione di "argomenti" a favore di una risposta al problema, introduzione di "argomenti" a favore dell'altra risposta; definizione dottrinale; risposta agli argomenti opposti alla definizione dottrinale. Un esempio per tutti: nel de vulgari eloquentia si parte dall'analisi di tutti i volgari per dimostrare che non sono idonei ad assumere il ruolo di lingua nazionale (*pars destruens*) e poi comincia la ricerca in positivo (*pars costruens*).
- *Limiti*: Secondo Dante, attraverso la scienza, l'uomo "deve trarre a le divine cose quanto può"

Si può ben capire come l'idea di scienza, ricerca e metodo nel medioevo, di cui si sta assumendo Dante uno dei più importanti portatori, sia permeata dalla filosofia. Si tratta di una caratteristica tipica nel periodo *pre-paradigmatico* delle scienze, in cui la ricerca è indotta da "una metafisica di moda", "un'altra scienza" o "casi storici e personali". In questo periodo, si è detto, prevale la raccolta di fatti e quindi una sorta di enciclopedismo: Dante attinge a piene mani alle ricerche sui più diversi campi scientifici che introduce all'interno della sua opera, mostrandosi grande conoscitore della scienza contemporanea, nei suoi limiti, oltre che grandissimo letterato. Le conoscenze astronomiche, che entrano sottoforma di citazioni, sono preziose: ci danno informazioni sullo status dell'astronomia medievale, prima della rivoluzione di Copernico, che collima in gran parte con le osservazioni di Khun del **Capitolo 1**. Altre conoscenze scientifiche vi rientrano ma sembra tutto *sottomesso a uno scopo superiore, specialmente nel caso del Paradiso dove questi esempi vengono introdotti per trattare di questioni dottrinali*.

3.2 La geografia e l'astronomia di Dante con spiegazioni moderne

L'obiettivo è ora entrare nel merito di questi riferimenti astronomici, sviscerandone una dimostrazione moderna.

- *Sfericità della terra*:

*"imagina Sion
con questo monte in su la terra stare

sì, ch'amendue hanno un solo orizzn
e diversi emisperi;" (Purgatorio IV, 68-71)*

Il riferimento sembra abbastanza chiaramente rinviare a un'immagine sferica della terra: Sion, che altro non è che Gerusalemme, secondo l'*imago mundi* duecentesca, rappresentava il centro delle terre emerse che, secondo le *descriptiones orbis terrarum*, aveva una forma fondamentalmente circolare. Il concetto di **orizzonte** a cui qui si fa riferimento è diverso da quello moderno. Ci si riferisce, qui, all'immaginaria circonferenza massima della terra (sferica) che divide il globo in due "emisperi": al centro di uno è presente Gerusalemme e, come si può desumere dalla geografia dantesca, al centro dell'altro è presente il Purgatorio celeste.

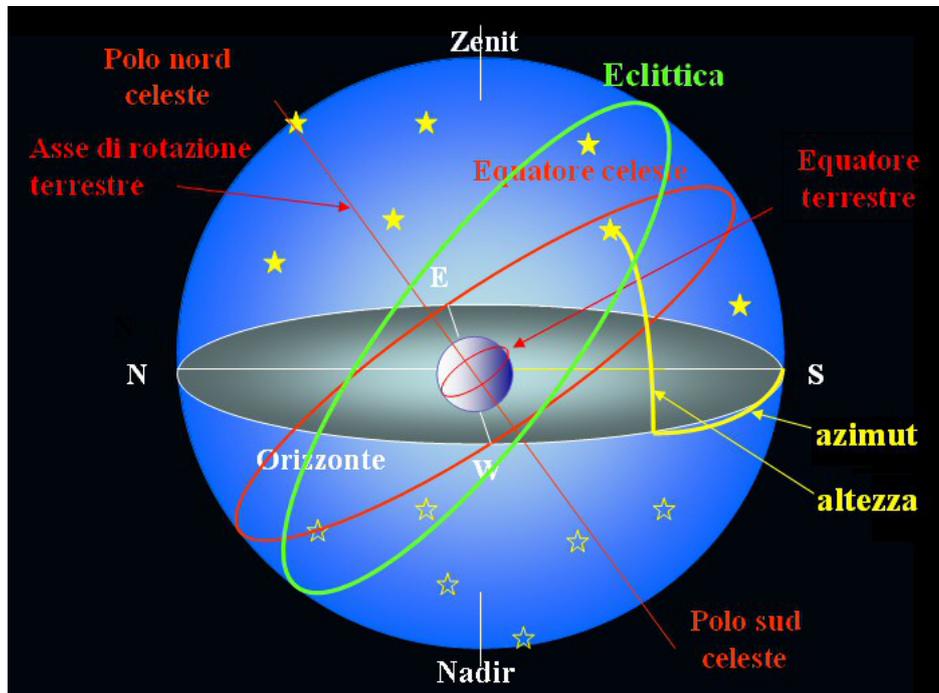
Il concetto moderno di **orizzonte** è diverso e rimanda alle definizioni astronomiche riguardanti la **Sfera Celeste**

La **Sfera Celeste** è l'immaginaria sfera al centro del quale è posto l'osservatore sulla terra e su cui si immaginano proiettate le stelle. L'intersezione del **Piano dell'orizzonte**, ovvero il piano perpendicolare all'osservatore passante per i suoi piedi, con tale sfera è detto **Orizzonte celeste** che divide la sfera in due emisferi: solo in uno di questi si possono osservare le stelle e viene detto **Volta Celeste**.

Il piano dell'equatore, inoltre, interseca la sfera in una circonferenza detta **Equatore Celeste** e l'**Asse del Mondo**, ovvero il prolungamento dell'asse terrestre, interseca la sfera nei poli **Nord e Sud Celeste**. La proiezione di questi punti sull'orizzonte celeste fornisce il **Nord e Sud Geografico**, così come l'intersezione dell'equatore celeste con l'orizzonte celeste fornisce **Est e Ovest Geografico**. Sulla Sfera Celeste si possono identificare due punti, Γ e Ω che corrispondono ai primi transiti del Sole

nella costellazione di Ariete e Bilancia e sono i punti equinoziali. La circonferenza per questi e per i poli celesti è detto **Coluro Equinoziale**

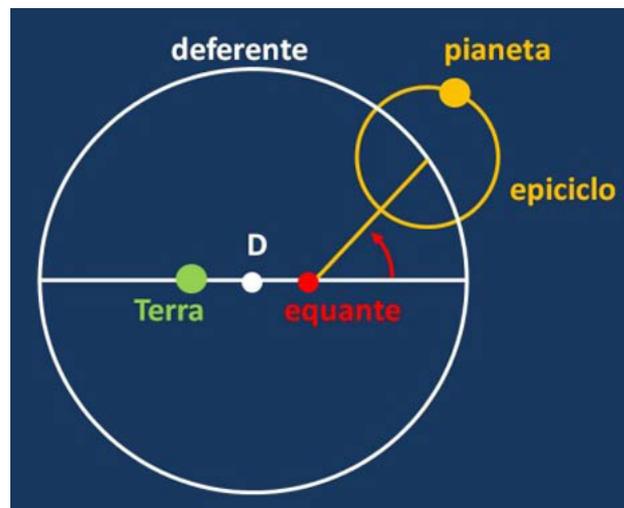
Il prolungamento della linea dell'osservatore incontra la sfera nello **Zenit** nella volta celeste e nel **Nadir** al di sotto.



- *Epicicli:*

*"Solea creder lo mondo in suo periclo
che la bella Ciprigna il folle amore
raggiasse, volta nel terzo epiciclo;" (Paradiso VIII, 1-3)*

Il riferimento è abbastanza evidentemente all'astronomia tolemaica che tendeva a ridurre le orbite dei pianeti a combinazioni di orbite circolari perfette: perciò, per spiegare le discrepanze con le osservazioni, si pensò che i pianeti percorressero circonferenze più piccole dette *epicicli* i cui centri percorrevano ellissi più grandi dette *deferenti* nel fuoco delle quali c'era la terra.



- *Moti del Sole:*

*"Già era 'l sole al'orizzonte giunto
lo cui meridian cerchio coverchia
Ierusalèm col suo più alto punto;*

*e la notte, che opposita a lui cerchia,
uscita di Gange fuor con le Balance,
che le caggion di man quando soverchia;*

*sì che le bianche e le vermiglie guance,
là dov'ì era, de la bella Aurora
per troppa etate divenivan rance." (Purgatorio II, 1-9)*

Si tratta della descrizione di un tramonto nell'emisfero di Gerusalemme e di un'alba in quello in cui Dante si trova: il sole è giunto all'orizzonte (la circonferenza del suo moto, "lo meridian cerchio", passa per lo Zenit sopra Gerusalemme) e la notte sorge dalla parte opposta, dal Gange, che rappresenta l'estremo oriente.

Tali riferimenti, oltre ad impreziosire il testo, immettono la vicenda di Dante in una realtà cosmica e universale, così come il destino di Dante è inserito nella storia complessiva dell'umanità.

La divina Commedia è piena di questi riferimenti:

*"Forse semilia miglia di lontano
ci ferve l'ora sesta, e questo mondo
china gi l'ombra quasi al letto piano,*

*quando il mezzo del cielo, a noi profondo,
comincia a farsi tal, ch'alcuna stella
perde il parere infino a questo fondo;" (Paradiso XXX, 1-6)*

Dante è nel cielo e per indicare l'alba, scrive una lunga perifrasi. La circonferenza della terra, in seguito anche ai calcoli di Eratostene, era valutata 20400 miglia che il sole impiegava 24 ore a percorrere. Perciò seimila miglia corrispondono circa a 7 ore, ovvero la distanza temporale che intercorre fra mezzogiorno (ora sesta) e l'alba.

Un'altra alba famosa è quella che apre il Paradiso:

*"Surge ai mortali per diverse foci
la lucerna del mondo; ma da quella
che quattro cerchi giugne con tre croci," (Paradiso I, 37-39)*

Qui il riferimento è complicato: All'alba del 13 Aprile del 1300, giorno in cui Dante comincia l'esplorazione del Paradiso, la posizione del sole è molto vicina a quella dell'equinozio primaverile. In questo caso, infatti, i quattro cerchi che sono l'**Equatore Celeste**, l'**Eclittica** (cioè il piano dell'orbita apparente del sole), il **Coluro Equinoziale** e l'**Orizzonte Celeste** si incontrano in un punto detto punto Γ , formando tre croci.

Dal punto di vista allegorico, però, i quattro cerchi possono rappresentare le virtù cardinali (prudenza, giustizia, forza e temperanza) e le tre croci le tre virtù teologali (fede, speranza e carità).

Il viaggio di Dante comincia il 7 Aprile e termina il 14 Aprile del 1300 anche se questi ultimi riferimenti, ci spingono a collocare il viaggio in corrispondenza dell'equinozio primaverile che ai tempi di Dante coincideva con il 25 Marzo. Infatti egli stesso apre il suo poema con un altro riferimento al fatto che il suo viaggio coincide con l'inizio della primavera:

*"Temp'era dal principio del mattino,
e 'l sol montava 'n sù con quelle stelle*

ch'eran con lui quando l'amor divino

mosse di prima quelle cose belle;" (Inferno, I 37-40)

Infatti la creazione viene topicamente fatta coincidere con l'inizio della primavera.

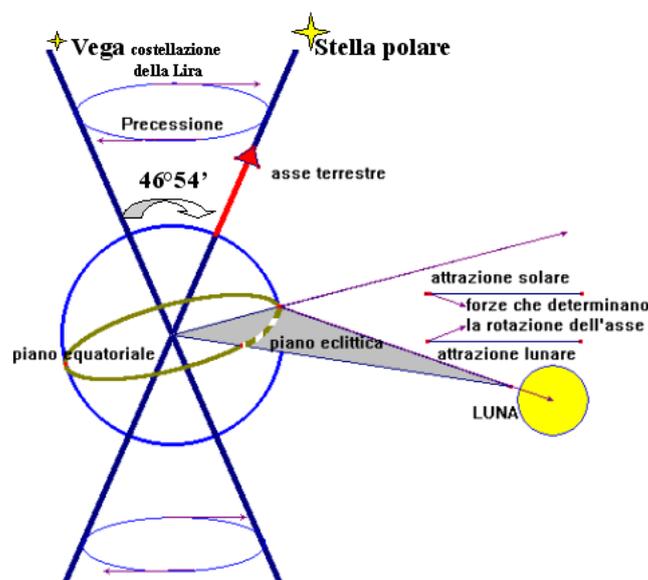
- *Precessione:*

*"I' mi volsi a man destra, e puosi mente
a l'altro polo, e vidi quattro stelle
non viste mai fuor ch'a la prima gente." (Purgatorio I, 21-24)*

Esistono varie interpretazioni di questo passo: la più accreditata porta a far coincidere le quattro stelle con le virtù cardinali. D'altra parte un'altra interpretazione riconosce in queste quattro stelle la cosiddetta **Croce del Sud**, che attualmente si vede solo nell'emisfero australe. D'altra parte per effetto della precessione luni-solare questa costellazione sarebbe potuta essere visibile anche nel nostro emisfero.

La **precessione luni-solare** è un moto dell'asse terrestre che compie un doppio cono, con delle leggere *nutazioni*, ovvero non perfettamente circolari, dovute alla forza di marea esercitata dal sole e dalla luna. Il periodo di questo movimento è di circa 26 000 anni.

In seguito alla mutazione dell'orientazione dell'asse terrestre, muta anche il piano dell'equatore celeste, a questa perpendicolare e dunque l'intersezione di questo con il piano dell'eclittica, cioè la **linea degli equinozi**. Perciò in corrispondenza della precessione luni-solare si ha anche una **precessione degli equinozi** che insieme alla regressione della linea degli apsidi porta il periodo a diminuire da 26 000 anni a 21 000 anni. Cambiando direzione, l'asse terrestre non punterebbe più verso la stella polare che ora, approssimativamente, corrisponde al polo nord celeste. In questa maniera potrebbero essere visibili costellazioni che ora sono visibili solo nell'emisfero australe, anche nell'emisfero boreale e questo potrebbe essere il caso.



In conclusione, da questi pochi esempi a cui si potrebbero aggiungere altri (riferimenti alle stelle circumpolari, a fenomeni ottici come gli arcobaleni, ai periodi siderali di pianeti come Venere e Marte, all'eziologia di alcuni fenomeni naturali come i fulmini) si intuisce l'enciclopedismo della cultura dantesca, che si accentua in gran parte nel **Paradiso**. Infatti Dante se utilizza questi riferimenti nel **Purgatorio** per scandire il tempo, e nell'**Inferno** più per circostanza, nel **Paradiso** lo fa per accentuare la condizione universale del viaggio e tale elemento concorre con gli altri alla sua sublimazione.

Il riferimento, da lui costantemente consultato, potrebbero essere l'Almagesto di Tolomeo, il che spiegherebbe la natura tolemaica della sua visione astronomica.

Capitolo 4

Storia dell'elettricità. Il paradigma delle equazioni di Maxwell

L'obiettivo di questo capitolo è comprendere come una scienza come l'elettricità abbia raggiunto progressivamente lo status di *paradigma* analizzandone la storia fino alla chiarificazione del paradigma di Maxwell che riuscì a mostrare come in realtà la luce sia un'onda.

4.1 Breve storia dell'elettricità

- *Antichità*: Alcuni fenomeni elettrici nell'antichità venivano analizzati come semplici curiosità, come cose praticamente inutili. I greci conoscevano l'esistenza di due tipi di elettricità: una ottenuta strofinando un pezzo di resina e una ottenuta strofinando un pezzo di vetro. Essi intuirono anche le proprietà della magnetite. *Platone* nel *Timeo* sembra essere a conoscenza del fenomeno dell'elettricità e del magnetismo, *Plinio* descrive nella *Naturalis Historia* le proprietà dell'ambra e sembra che anche *Seneca* si sta occupato di fenomeni elettrici, in particolare di fulmini.
- *William Gilbert*: Gilbert nel 1600 proseguì gli studi antichi e del tardo Medioevo (sono attestate opere intorno all'argomento come il "De subtilitate" di Cardano). Egli iniziò a dare una fisionomia all'elettricità la quale si genera per **attrito** ed evidenziò differenze e analogie fra magnetismo ed elettricità. *Benjamin Franklin*: Il 1700 vede l'ingegno di molti scienziati continuare a provarsi nell'indagine sull'elettricità. Ai tempi di Benjamin Franklin si pensava che l'elettricità fosse dovuta a **due tipi di fluidi misteriosi**, quante le cariche. Franklin mostrò che bastava anche uno solo di questi, coerentemente con il paradigma dell'epoca, e che un eccesso di questo fluido generasse elettricità positiva e un difetto elettricità negativa. A lui si deve anche la creazione del parafulmine e il celebre esperimento dell'aquilone nel temporale.
- *Joseph Priestley*: Egli notò che quando si elettrizza una tazza o una bottiglia, gli effetti dell'elettrizzazione non sono avvertiti all'interno, come con la forza peso. Egli ipotizzò, allora, che la forza elettrostatica variasse con una legge molto simile a quella dell'inverso del quadrato della distanza. **Coulomb** decise di misurare questa forza e i suoi risultati combaciarono con l'intuizione di Priestley.
- *Galvani, Volta*: Sfruttarono le proprietà elettriche per giungere a risultati diversi: Galvani teorizzò una forma di elettricità animale mostrano che se si tocca un nervo scoperto di un animale si produce una contrazione involontaria e Volta sfruttò le proprietà dei metalli per costruire la famosa pila.
- *Oersted, Ampère, Farady*: Questi tre scienziati unificarono elettricità e magnetismo: il primo noto che un filo percorso da corrente genera un campo magnetico e il terzo noto che variazioni di flusso magnetico generano campi elettrici. Ampère approfondì tali collegamenti arrivando a stabilire in che modo correnti elettriche producono effetti magnetici. Lo status della ricerca, dunque, era molto vicino ad una unificazione sotto il segno di un solo paradigma: **Maxwell** infatti, con le sue equazioni, e i problemi che ne derivano come Khun mette in evidenza, unifica elettricità e magnetismo. per superare il problema del trascinarsi dell'etere luminifero bisognerà però aspettare Einstein.

4.2 Equazioni di Maxwell

4.2.1 Rudimenti matematici: Operatore Nabla, gradiente, divergenza, rotore

In un sistema di coordinate tridimensionali generato da tre vettori \mathbf{i} , \mathbf{j} e \mathbf{k} si definisce **Operatore Nabla** il seguente:

$$\nabla = \frac{\delta}{\delta x} \mathbf{i} + \frac{\delta}{\delta y} \mathbf{j} + \frac{\delta}{\delta z} \mathbf{k}$$

Sia f una funzione scalare di 3 variabili, ovvero $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$. Si definisce **Gradiente** di una tale funzione il seguente:

$$\text{grad} f = \nabla f = \frac{\delta f}{\delta x} \mathbf{i} + \frac{\delta f}{\delta y} \mathbf{j} + \frac{\delta f}{\delta z} \mathbf{k}$$

Sia dato \mathbf{U} un campo vettoriale $\mathbf{U} = U_x \mathbf{i} + U_y \mathbf{j} + U_z \mathbf{k}$. Si definisce divergenza di \mathbf{U} il prodotto scalare fra ∇ e \mathbf{U} .

$$\text{div} \mathbf{U} = \nabla \cdot \mathbf{U} = \frac{\delta U_x}{\delta x} + \frac{\delta U_y}{\delta y} + \frac{\delta U_z}{\delta z}$$

tenendo presente che ovviamente $\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = 1$ e $\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{i} \cdot \mathbf{k} = 0$.

Si definisce rotore di \mathbf{U} il prodotto vettoriale fra ∇ e \mathbf{U} .

$$\text{rot} \mathbf{U} = \nabla \times \mathbf{U} = \left(\frac{\delta U_z}{\delta y} - \frac{\delta U_y}{\delta z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\delta U_x}{\delta z} - \frac{\delta U_z}{\delta x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\delta U_y}{\delta x} - \frac{\delta U_x}{\delta y} \right) \mathbf{k}$$

dal momento che $\mathbf{i} \times \mathbf{i} = 0$; $\mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}$; $\mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i}$ e $\mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j}$.

4.2.2 Equazioni di Maxwell in forma ingenua. Passaggio alla forma integrale e differenziale

- *Prima Equazione di Maxwell*: Data una superficie gaussiana chiusa che racchiude una certa carica q si ha che il flusso del campo elettrico attraverso la superficie è proporzionale alla carica, con fattore ϵ_0^{-1} , essendo ϵ_0 la costante dielettrica nel vuoto.

$$\Phi_{\mathbf{E}} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Il Flusso si definisce dividendo in aree infinitesime la gaussiana e computando area per area il prodotto scalare $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$. Dunque in forma integrale, introducendo il concetto di integrale di superficie, si potrebbe scrivere:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Questa formula possiede una enorme limitazione. Essa vale solo per Gaussiane ma non è, in questa forma, interpretabile come proprietà che vale nello spazio. Per passare alla forma differenziale, dunque, utilizzo i rudimenti matematici prima descritti.

Innanzitutto considero un parallelepipedo infinitesimo di dimensioni dx , dy e dz che contiene un punto $P(x, y, z)$ dello spazio. Considero le due facce opposte di lati dy e dz . Scegliendo una opportuna orientazione dell'asse x si ha che il vettore superficie posteriore A è $d\mathbf{A} = -\mathbf{i} dy dz$. Supponendo che il campo elettrico valga \mathbf{E} per questa faccia, si ha che $\Phi_{\mathbf{E}} = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = -dy dz \mathbf{E} \cdot \mathbf{i}$. D'altra parte sulla faccia anteriore B si ha $d\mathbf{B} = \mathbf{i} dy dz$ e il campo elettrico subisce una variazione infinitesima dovuta alla distanza dx delle due facce, dunque vale $\mathbf{S} = \mathbf{E} + \frac{\delta \mathbf{E}}{\delta x} dx$. Si ha che

$$\Phi_{\mathbf{S}} = \mathbf{S} \cdot d\mathbf{B} = +dy dz \mathbf{E} \cdot \mathbf{i} + dx dy dz \frac{\delta \mathbf{E}}{\delta x} \cdot \mathbf{i} = +dy dz \mathbf{E} \cdot \mathbf{i} + dx dy dz \frac{\delta E_x}{\delta x}$$

Infine sommando i due flussi computati

$$\Phi_{\mathbf{E}} + \Phi_{\mathbf{S}} = -dy dz \mathbf{E} \cdot \mathbf{i} + dy dz \mathbf{E} \cdot \mathbf{i} + dx dy dz \frac{\delta E_x}{\delta x} = dx dy dz \frac{\delta E_x}{\delta x}$$

Facendo lo stesso calcolo per le altre due coppie di facce opposte ottengo che il flusso totale vale

$$\frac{q}{\epsilon_0} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = dx dy dz \left(\frac{\delta E_x}{\delta x} + \frac{\delta E_y}{\delta y} + \frac{\delta E_z}{\delta z} \right) = dx dy dz \operatorname{div} \mathbf{E}$$

D'altra parte $dx dy dz$ è il volume del parallelepipedo ed è uguale alla carica sulla densità di carica ρ . Dunque

$$\frac{q}{\epsilon_0} = \frac{q}{\rho} \operatorname{div} \mathbf{E} \Rightarrow \epsilon_0 \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho$$

- *Seconda equazione di Maxwell:* Questa legge asserisce che data una gaussiana chiusa, il flusso del campo magnetico \mathbf{B} attraverso essa è nullo, che dipende dal fatto che non esistono monopoli magnetici.

$$\Phi_{\mathbf{B}} = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Con la notazione differenziale e con lo stesso procedimento di prima si ottiene che si può riscrivere

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

- *Terza legge di Maxwell:* Secondo la terza legge di Maxwell la circuitazione di un campo elettrico indotto da una variazione di flusso di campo magnetico \mathbf{B} è uguale alla forza elettromotrice indotta. Infatti secondo la legge di Farady-Lenz si ha

$$f = - \frac{\delta \Phi_{\mathbf{B}}}{\delta t}$$

D'altra parte, per definizione, la circuitazione di un campo elettrico è l'integrale lungo una linea del vettore campo elettrico. Dunque

$$C_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{\oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}}{q} = \frac{L}{q} = f = - \frac{\delta \Phi_{\mathbf{B}}}{\delta t}$$

Dunque

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{\delta \Phi_{\mathbf{B}}}{\delta t}$$

è la terza legge di Maxwell. In forma differenziale si può scrivere, prendendo un cammino elementare rettangolare di dimensioni dx e dy e applicando tale legge, si mostra che

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t}$$

- *Quarta legge di Maxwell:* Dato un qualsiasi cammino chiuso si ritenne inizialmente che la circuitazione del campo magnetico \mathbf{B} valutata sulla linea chiusa fosse proporzionale all'intensità di corrente concatenata alla linea, ovvero al numero di correnti che oltrepassavano la superficie racchiusa dalla linea.

$$C_{\mathbf{B}} = \mu_0 \cdot i$$

D'altra parte in seguito al paradosso di Ampère che mostrava un'incongruenza di questa legge, si dovette passare alla formulazione meno ingenua che tiene conto anche di un'entità fisica denominata corrente di spostamento. Perciò

$$C_{\mathbf{B}} = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \cdot \left(i + \epsilon_0 \frac{\delta \Phi_{\mathbf{E}}}{\delta t} \right)$$

È semplice passare alla forma locale che permette di riscrivere

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\delta \mathbf{E}}{\delta t} \right)$$

ove \mathbf{J} è il vettore che rappresenta la densità di corrente in un punto.

4.3 Derivazione dell'equazione di D'alembert: la luce è un'onda

Ricapitolando le quattro leggi sono

$$\begin{aligned}\epsilon_0 \operatorname{div} \mathbf{E} &= \rho \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{B} &= \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\delta \mathbf{E}}{\delta t} \right)\end{aligned}$$

Supponendo di essere nel vuoto si può riscrivere

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta \mathbf{E}}{\delta t}\end{aligned}$$

Ciò vuol dire che anche nel vuoto c'è propagazione di campo magnetico e campo elettrico.

Si ha l'identità vettoriale

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{C}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{C}) - \nabla^2 \mathbf{C}$$

facile da verificare svolgendo i calcoli. Prendendo $\mathbf{C} = \mathbf{E}$ si ha grazie alle leggi di Maxwell

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta^2 \mathbf{E}}{\delta t^2} = 0$$

Analogamente se $\mathbf{C} = \mathbf{B}$ si ha

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta^2 \mathbf{B}}{\delta t^2} = 0$$

Equazioni del genere sono della forma di D'alembert, il quale dimostrò che rappresentano delle onde

$$\left(\nabla^2 \mathbf{U} - \frac{1}{v^2} \frac{\delta^2 \mathbf{U}}{\delta t^2} = 0 \right)$$

La velocità di queste onde è la radice del reciproco di $\mu_0 \epsilon_0$. Trovate queste costanti il valore venne stimato a circa $3.0 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ che era il valore osservato della luce: si giunse alla conclusione, dunque, che la luce fosse un'onda elettromagnetica.