



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
SUOR ORSOLA
BENINCASA

DIPARTIMENTO DI
SCIENZE FORMATIVE, PSICOLOGICHE E DELLA
COMUNICAZIONE

CORSO DI LAUREA
IN
SCIENZE DELLA FORMAZIONE PRIMARIA

TESI DI LAUREA
IN
ELEMENTI DI FISICA
*“VISUALIZZARE E RAPPRESENTARE
INTERAZIONI A DISTANZA E CAMPI.
ESPERIENZE NELLA SCUOLA PRIMARIA”*

Relatori

Ch.mo Prof. Emilio Balzano

Ch.ma Prof.ssa Roberta Viscardi

Candidata

Castracani Roberta

Matricola 208006955

Anno Accademico 2025/2026

A tutti i bambini incontrati in questo meraviglioso cammino,

enigmi luminosi,

liberi esploratori del mondo,

fonte di vita e

orizzonte di ogni mia scelta.

Dedico a voi, e a tutti gli occhi che incontrerò,

ogni mio domani.

INDICE

INTRODUZIONE	5
 CAPITOLO I	7
1.1 IL VALORE DELL'EDUCAZIONE SCIENTIFICA	7
1.2 HOW PEOPLE LEARN	15
1.3 IL CURRICOLO VERTICALE	18
1.4 LA CONOSCENZA INCARNATA: L'EMBODIED COGNITION	21
1.5 ABITARE IL CONFINE: L'INSEGNAMENTO COME PRATICA SITUATA.....	28
1.6 L'ESPERIENZA MUSEDU.....	30
1.7 LA DIDATTICA LABORATORIALE PER UN APPRENDIMENTO SIGNIFICATIVO	33
1.8 TUTTI UGUALI TUTTI DIVERSI: L'IMPORTANZA DELLA COOPERAZIONE.....	38
1.9 IL MODELLO RICERCA – AZIONE.....	41
 CAPITOLO II	45
2.1 LA FORZA COME INTERAZIONE.....	46
2.2 FORZA ISTANTANEA A DISTANZA: LA GRAVITAZIONE DI NEWTON.....	54
2.3 IL CAMPO, FARADAY, MAXWELL: LA VELOCITÀ DELLA LUCE COSTANTE NON INFINITA	65
2.4 ESPERIMENTI VIRTUALI SU CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI. LA LOGICA COMPUTAZIONALE	75
2.5 IL CONTRIBUTO TEOLOGICO: L'ANGELOLOGIA.....	79
2.6 UNA VISIONE UNIFICATA: IL CAPOLAVORO DI EINSTEIN, LE ONDE GRAVITAZIONALI	87
 CAPITOLO III	94
PROGETTAZIONE E ORGANIZZAZIONE DEL PERCORSO DIDATTICO.....	94
3.1 PREMESSA	94
3.2 DURANTE LA PROGETTAZIONE	95
3.3 IL CONTESTO.....	96
3.4 PRECONOSCENZE	98
3.5 DALLE INDICAZIONI NAZIONALI	99

3.6 ATTIVITÀ	101
3.7 METODOLOGIE	103
3.8 MATERIALI	107
 CAPITOLO IV	 108
LA SPERIMENTAZIONE	108
4.1 PRIMO INCONTRO: ALLA SCOPERTA DELLE INTERAZIONI A DISTANZA	108
4.2 SECONDO INCONTRO: IL MAGNETISMO	116
4.3 TERZO INCONTRO: L'ELETTRICITÀ	124
4.4 QUARTO INCONTRO: L'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA	133
4.5 QUINTO INCONTRO: MODELLIZZAZIONE E AUTOVALUTAZIONE	137
4.6 METARIFLESSIONE PERSONALE E LIMITI RISCONTRATI	146
4.7 FORMAZIONE DEI DOCENTI	150
 CONCLUSIONI	 152
 BIBLIOGRAFIA	 155
 SITOGRAFIA	 156

INTRODUZIONE

L'essenza del presente lavoro di Tesi risiede in un'aspirazione di natura epistemologica e personale: la necessità di trasmutare l'aula da luogo di transito nozionistico a spazio di autentico accadimento esistenziale. L'indagine parte da un interrogativo che mi sono posta: come poter strutturare delle pratiche didattiche che posano essere realmente significative per i bambini e che garantiscano apprendimenti permanenti. La mia analisi si focalizza, dunque, sulla necessità di strutturare una didattica capace di abitare il corpo e la memoria del discente in modo duraturo, trasformando l'astrazione scientifica in una dimensione profonda del vissuto. Educare alla scienza, in questa prospettiva, significa permettere ai bambini di incarnare la realtà, rendendo l'apprendimento un evento che si percepisce sulla pelle e si sedimenta nell'esperienza sensibile. Il percorso si ancora con rigore ai pilastri della ricerca cognitiva contemporanea, attingendo ai contributi di *How People Learn* per decodificare e architettare che i soggetti presiedono all'atto dell'apprendere e al rispetto dello sviluppo cognitivo. Il fulcro del progetto risiede nella scelta di produrre un itinerario di trasposizione didattica, per la scuola primaria, del concetto fisico di interazione a distanza: per giungere a una sintesi che sia al contempo scientificamente densa e pedagogicamente accessibile, la ricerca scava nelle radici storiche analizzando l'evoluzione del concetto di campo e spingendosi fino a indagare le suggestioni dell'angelologia, che viene qui riletta con il primo, affascinante tentativo antropologico di razionalizzare l'invisibile di spiegare come entità distanti possano influenzarsi senza contatto, offrendo una profondità narrativa inedita alla moderna fisica delle interazioni. In piena coerenza con il *Framework K-12*, questa progettualità si concretizza, da un punto di vista metodologico, in un itinerario laboratoriale, ingegneristico e tecnologico in cui la cooperazione tra pari agisce come collante sociale e cognitivo. Al centro di questo impianto si pone il recupero del "senso comune": l'intuizione primaria del bambino, che spesso sovrappone i concetti di forza ed energia, ad esempio, viene qui eletta a materiale da costruzione privilegiato. È proprio attraverso il riconoscimento della validità del vissuto pregresso e dei diversi sfondi socioculturali di provenienza presenti nella classe di attuazione, che la teoria trova il suo punto di ancoraggio, trasformandosi in un sapere significativo e co-costruito, che rende i

soggetti esperti delle proprie interpretazioni del mondo, legando l'esperienza alla conoscenza. L'eredità dell'Inquiry deweyana trova qui il suo compimento attraverso la mia mediazione, volta ad orientare l'indagine verso la formalizzazione del modello scientifico, valorizzando l'esperienza come grembo della conoscenza. Tuttavia, il valore ultimo di questo lavoro risiede nella volontà di offrire ai bambini del Rione Sanità una possibilità alternativa e luminosa di abitare lo spazio scolastico. Attraverso l'incontro con oggetti talvolta ignoti e dal fascino quasi magico, come bussole, magneti, proiettori, diapason e circuiti elettrici, fino ai sofisticati simulatori virtuali, ho cercato di far sì che la didattica potesse farsi varco verso nuovi orizzonti di interesse.

Le pagine che seguono documentano questo lavoro di attivazione intellettuale svolto con i bambini, in cui la sperimentazione clinica e il diario di bordo sono diventati testimonianza di una curiosità scientifica, manipolativa e collaborativa messa in funzione. L'obiettivo non è stato solo spiegare come le forze a distanza agiscano sulla materia, ma anche di far percepire come esse pervadano la realtà che ci circonda e, in senso lato, le nostre stesse esistenze. Invitando alla lettura dei capitoli successivi, questo lavoro si propone come uno stimolo a riscoprire la bellezza di una didattica lenta e profonda, dove l'incontro con l'ignoto diventa il motore di una cittadinanza attiva e consapevole, capace di trasformare il desiderio di scoprire e l'educazione scientifica in un autentico strumento di riscatto e libertà.

CAPITOLO I

1.1 Il valore dell'educazione scientifica

L'inquadramento del valore umano e culturale dell'educazione scientifica che sottende tale lavoro di Tesi si colloca in un'analisi di ricerca volta ad indagare non solo come la scienza sia progredita nel corso del tempo, ma anche come la comunità educativa abbia appreso lezioni importanti da anni di implementazione dell'istruzione, al fine di creare nuovi scenari per l'educazione scientifica. Tra le molteplici proposte metodologiche sviluppate nel corso degli anni, ritengo molto convincente sostenere quanto avanzato dalla Carnegie Corporation di New York, che, insieme all'Istituto per gli Studi Avanzati, ha istituito una commissione che ha pubblicato un rapporto intitolato *The Opportunity Equation*, chiedendo lo sviluppo di un insieme comune di standard scientifici in ambito didattico, a partire da un'opportunità che esiste in questo momento: un gran numero di Stati sta adottando standard comuni in matematica e lingua inglese/arti linguistiche e sono quindi pronti a considerare l'adozione di standard comuni anche per l'educazione scientifica. La Carnegie Corporation, dunque, ha assunto un ruolo guida per garantire che lo sviluppo di standard scientifici comuni proceda e sia della massima qualità, finanziando un processo in due fasi: primo, lo sviluppo di questo quadro di standard scientifici da parte del Consiglio Nazionale delle Ricerche (NRC) e, secondo, lo sviluppo di una nuova generazione di standard scientifici basati su un Framework di riferimento. Tale quadro di riferimento si fonda saldamente su studi precedenti che hanno cercato di identificare e descrivere le idee principali per l'educazione scientifica K-12 (K= Kindergarten-12= 12 anni), offrendo una proposta metodologica che rappresenta il primo passo di un processo volto a creare nuovi standard per l'educazione scientifica dalla scuola dell'infanzia alla secondaria di secondo grado. L'impulso propulsivo per questo framework progettuale è nato dal riconoscimento del fatto che, sebbene i documenti nazionali esistenti sui contenuti scientifici per i gradi K-12 (sviluppati tra l'inizio e la metà degli anni '90) siano stati un passo importante nel rafforzamento dell'educazione scientifica, vi è molto spazio per migliorare. A partire da ciò, il Framework è stato progettato per costituire degli standard che

si concentrino su un numero limitato di idee fondamentali per consentire una comprensione più profonda e per valorizzare l'importanza dell'integrazione della conoscenza dei contenuti teorici (modelli) con le pratiche scientifiche (indagine empirica, argomentazione, valutazione delle ipotesi), in una dimensione di trasversalità, al fine di costruire la competenza e favorire l'apprezzamento degli studenti per la scienza nel corso di più anni di scuola. La visione del comitato è che gli studenti dovrebbero sviluppare la conoscenza dei contenuti attraverso il coinvolgimento attivo nelle pratiche, pertanto, di particolare nota è il posto di rilievo dato alle idee e alle pratiche dell'ingegneria. In effetti, questo approccio riflette il modo in cui la scienza e l'ingegneria vengono realmente praticate nel mondo reale. Dalle parole degli autori: *“Crediamo che l'educazione dei bambini di questa nazione sia una preoccupazione nazionale vitale. La comprensione e l'interesse per la scienza e l'ingegneria che i cittadini mettono in campo nel loro processo decisionale personale e civico sono fondamentali per buone decisioni sul futuro della nazione.”*

Di fatto, è diffusa la consapevolezza del fatto che la scienza, l'ingegneria e la tecnologia permeano quasi ogni aspetto della vita moderna e detengono anche la chiave per affrontare molte delle sfide attuali e future più pressanti dell'umanità; eppure, troppi pochi lavoratori negli Stati Uniti hanno solide basi in questi campi, e molte persone mancano persino di una conoscenza fondamentale di essi. Questa tendenza nazionale ha creato una richiesta diffusa per il nuovo approccio all'educazione scientifica negli Stati Uniti, divenuto impianto metodologico orientante le riforme in tutto il mondo (Italia compresa, con i Nuovi Scenari delle Indicazioni Nazionali). Ad oggi, la stragrande maggioranza degli stati americani ha adottato gli standard del *Framework K-12*, creando i Next Generation Science Standards (NGSS): essi sono divenuti prassi consolidata e sono stati applicati su scala massiva; il Framework non è più solo un auspicio, a è la base dei programmi scolastici correnti. Le evidenze scientifiche derivanti alla sua applicazione confermano, inoltre, che la valutazione, se spostata dai contenuti alle pratiche, permette una misurazione più equa e profonda delle reali competenze scientifiche degli alunni, riducendo il divario educativo nei contesti

marginali. I riscontri a supporto della validità della proposta di cambiare le modalità in cui si opera la valutazione, derivano da:

- Lezioni apprese da 10 anni di standard precedenti, in cui si propone una rettifica degli errori degli anni '90, dove la valutazione era troppo focalizzata su "fatti discreti" (nozioni isolate).
- Integrazione, nella valutazione, delle tre dimensioni implicate nell'apprendimento: le *Pratiche*, i *Concetti Trasversali* e le *Idee Fondamentali*. Non si valuta più se il bambino "sa la definizione", ma se "sa usare la pratica" per spiegare un fenomeno. Nella pratica, non si valutano più le conoscenze (es. "Cos'è una forza?"), ma la capacità di usare queste nella pratica.

Possiamo dunque notare come l'applicazione del Framework abbia introdotto un cambiamento radicale nella valutazione degli alunni, e ciò è confermato da quanto riportano le evidenze dopo oltre dieci anni di applicazione:

- I bambini costruiscono modelli o argomentano partendo dai dati. Esistono ormai database enormi di prove di valutazione (come quelle del portale *NextGenScience*) che dimostrano l'efficacia di questo approccio.
- Miglioramento dell'equità: una delle evidenze più forti riguarda l'inclusione. Poiché il Framework valorizza le "esperienze pregresse" e l'uso del corpo (Embodiment), gli studenti che tradizionalmente faticavano con la scienza "teorica" (spesso provenienti da contesti marginali o minoranze) hanno mostrato un incremento significativo dell'interesse e delle prestazioni.
- Sviluppo del pensiero critico: le ricerche condotte nelle scuole che applicano rigorosamente il Framework, mostrano che gli alunni non solo ricordano i concetti più a lungo, ma sono molto più abili nel risolvere problemi nuovi, dimostrando abilità nell'applicazione di conoscenze, competenze, strategie acquisite in un contesto, in uno diverso o nuovo (*transfer cognitivo*).

Tuttavia, le evidenze mostrano anche una sfida: la valutazione è la parte più complessa da modificare, perché implica un vero e proprio cambiamento di

visione dei risultati dell'apprendimento. Infatti, è noto che molte scuole usano ancora test "vecchi" (basati per es. su scelta multipla nozionistica) che non riescono a misurare bene le competenze del Framework. Per questo, l'NRC ha pubblicato un altro volume specifico, *"Developing Assessments for the Next Generation Science Standards"*, dedicato proprio a come creare test che siano coerenti con questa visione. A dire il vero, il testo dell'articolo scientifico di riferimento, ammette che, affinché il Framework abbia successo, tutto il sistema deve cambiare in modo coerente: curricoli, insegnamento e valutazione. Se la valutazione rimane quella "vecchia" (basata solo sulla memorizzazione), l'insegnamento resta settoriale e i curricoli disciplinari, il Framework fallisce. Pertanto, il documento stesso è una risposta alle criticità rilevate nelle valutazioni nazionali precedenti, che mostravano studenti capaci di ripetere definizioni, ma incapaci di applicare la scienza alla realtà. È chiaro, dunque, che il Framework e i successivi standard non porteranno a miglioramenti evidenti a meno che le altre componenti del sistema (curriculum, istruzione, sviluppo professionale e valutazione) non cambino per allinearsi alla visione di esso: realizzazione di un'educazione scientifica e ingegneristica in cui gli studenti, nel corso della loro esperienza scolastica, sviluppino progressivamente la capacità di impegnarsi in indagini e analisi scientifiche e di comprendere come la conoscenza scientifica viene generata e revisionata. In sostanza, l'obiettivo generale del quadro per l'educazione scientifica K-12 è garantire che, entro la fine del 12° grado scolastico, tutti gli studenti:

1. Abbiano un certo apprezzamento per la bellezza e la meraviglia della scienza;
2. Possiedano una conoscenza sufficiente della scienza e dell'ingegneria per impegnarsi in discussioni pubbliche su questioni correlate;
3. Siano consumatori attenti di informazioni scientifiche e tecnologiche legate alla loro vita quotidiana;
4. Siano in grado di continuare a imparare la scienza al di fuori della scuola;

5. Abbiamo le competenze per intraprendere le carriere di loro scelta, incluse (ma non limitate a) carriere in scienza, ingegneria e tecnologia.

Ma vediamo nello specifico l'impianto strutturale di questo Framework K-12...

Il quadro si basa su un corpo ricco e crescente di ricerche sull'insegnamento e l'apprendimento della scienza, nonché su quasi due decenni di sforzi per definire le conoscenze e le abilità fondamentali: è da questo lavoro che il comitato conclude che l'educazione scientifica e ingegneristica K-12 dovrebbe concentrarsi su un numero limitato di idee disciplinari fondamentali e concetti trasversali. Il comitato continua, affermando che queste idee dovrebbero essere insegnate nel corso di diversi anni, in modo che gli studenti abbiano il tempo di esplorarle in modo approfondito e di acquisire una comprensione che si sviluppi nel tempo. Dalla letteratura scientifica: *"Building progressively more sophisticated explanations of natural phenomena is central throughout grades K-5, as opposed to focusing only on description in the early grades and leaving explanation to the later grades¹."*

Risulta chiaro che questo approccio contrasta con la pratica comune di "coprire" molti argomenti in modo superficiale, che spesso porta a una memorizzazione mnemonica presto dimenticata, come ancora oggi diffuso nella comune pratica didattica. Ma, a tal proposito, il quadro di riferimento ci offre una possibile costruzione dell'educazione scientifica attorno a tre dimensioni principali che dovrebbero essere integrate nell'insegnamento a tutti i livelli:

1 Pratiche scientifiche, ingegneristiche e digitali: dimensione che riguarda la descrizione dei comportamenti da parte degli scienziati, che si impegnano ad indagare e costruire modelli e teorie sul mondo naturale; e l'applicazione delle pratiche da parte degli ingegneri, che progettano e costruiscono modelli e sistemi. Attengono a questa dimensione le competenze in: 1. Porre domande (per

¹ A FRAMEWORK FOR K-12 SCIENCE EDUCATION- Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas- NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES (2012) -pag.26

la scienza) e definire problemi (per l'ingegneria); 2. Sviluppare e utilizzare modelli; 3. Pianificare e condurre indagini; 4. Analizzare e interpretare i dati; 5. Utilizzare la matematica e il pensiero computazionale; 6. Costruire spiegazioni (per la scienza) e progettare soluzioni (per l'ingegneria); 7. Argomentare a partire da prove; 8. Ottenere, valutare e comunicare informazioni.

2 Concetti trasversali: dimensione relativa all'acquisizione dei concetti che hanno un'applicazione comune in tutti i campi della scienza (come "Causa ed Effetto" o "Sistemi e Modelli dei Sistemi"). Essi forniscono agli studenti un modo per collegare le conoscenze tra i vari ambiti disciplinari e consistono nella conoscenza di: 1. Modelli; 2. Causa ed effetto: meccanismo e spiegazione; 3. Scala, proporzione e quantità; 4. Sistemi e modelli di sistema; 5. Energia e materia: flussi, cicli e conservazione; 6. Struttura e funzione; 7. Stabilità e cambiamento.

3 Idee centrali disciplinari fondamentali: dimensione che si riferisce alla concentrazione sui concetti più importanti in quattro domini: scienze fisiche, scienze della vita, scienze della terra e dello spazio, e ingegneria/tecnologia. In particolare: Scienze fisiche; PS1: Materia e sue interazioni; PS2: Moto e stabilità: forze e interazioni; PS3: Energia; PS4: Onde e loro applicazioni nelle tecnologie per il trasferimento di informazioni;

Vita Scienze; LS1: Dalle molecole agli organismi: strutture e processi; LS2: Ecosistemi: interazioni, energia e dinamica; LS3: Eredità: trasmissione e variazione dei caratteri; LS4: Evoluzione biologica: unità e diversità;

Scienze della Terra e dello Spazio; ESS1: Il posto della Terra nell'universo; ESS2: I sistemi terrestri; ESS3: La Terra e l'attività umana; Ingegneria, Tecnologia e Applicazioni della Scienza; ETS1: Progettazione ingegneristica; ETS2: Collegamenti tra ingegneria, tecnologia, scienza e società).

Secondo il suddetto quadro metodologico, dunque, l'integrazione di queste tre dimensioni guiderà lo sviluppo di nuovi standard, curricula e istruzioni per la valutazione, spostando l'attenzione dal *"cosa sanno gli studenti"* a *"come gli*

studenti usano ciò che sanno", per spiegare fenomeni e risolvere problemi. Pertanto, in questa prospettiva, l'apprendimento della scienza è visto come un processo di sviluppo che avviene su più anni: gli studenti non arrivano in classe come "tabulae rasae", ma portano con sé intuizioni e conoscenze pregresse sul mondo fisico che guidano l'agire e la conoscenza (perché il bambino si appella alla sua esperienza per cercare di spiegare ciò che osserva) che sono fondamentali basi sulle quali costruire un apprendimento significativo, il quale si struttura proprio a partire dalla spiegazione di un vissuto corporeo e sensoriale. Pertanto, appare chiara l'importanza dell'esperienza e del processo di indagine orientata durante l'apprendimento, e, perché gli studenti sviluppino un'attrazione sostenuta verso la scienza, tali esperienze di apprendimento in aula devono connettersi con i loro interessi e le loro esperienze personali: qui, domande fondamentali come ad esempio *"da dove veniamo?"* o *"perché un oggetto va verso il basso quando viene lasciato cadere?"*, fungono da ganci cruciali per coinvolgere e motivare gli alunni. Ne risulta che, inquadrare i curricula attorno a queste domande e accogliere le pratiche pregresse di ciascuno, aiuta a comunicare la funzionalità della materia; come suggerito da John Ogborn, il curriculum di scienze dovrebbe essere strutturato attorno a narrazioni capaci di spiegare come la scienza interpreta la realtà, ovvero come offre una deduzione ai modelli immaginati nella mente dei bambini e del perché essi si comportino necessariamente in un determinato modo. È fondamentale riconoscere che alla base del pensiero di ciascuno di noi ci sono delle ovvietà, delle intuizioni, definite "senso comune", molto concrete e appropriate al contesto. Questo "senso comune" si costruisce spesso attraverso entità o eventi immaginati che potrebbero sembrare astratti, ma in realtà sono schematizzazioni che vengono usate per pensare in maniera efficiente e veloce: tale pensiero è semantico, non sintattico, usa metafore e metonimie per formare sempre nuovi modi di immaginare cose che non avrebbero potuto essere viste prima. Accade molto spesso, infatti, che il senso comune guidi l'azione perché il suo scopo è generalmente diretto verso obiettivi pragmatici ed immediati, al fine di agire efficacemente nel contesto; e, benché esso sia intrinsecamente creativo ed immaginario, esso è basato su un ragionamento dato da un insieme di dimensioni

di base che caratterizzano le cose per come potrebbero essere, a partire da una base di ovvietà. In questa cornice, Ogborn sostiene che sarebbe meglio costruire il curriculum di scienze attorno a “storie di come la scienza deve raccontare le cose come stanno”: questo porterebbe gli studenti a conoscere attraverso quello che possono fare, cosa può essere fatto con i fatti e cosa sono. L'apprendimento, in tal senso, è visto essenzialmente come dare agli studenti esperienze dalle quali possono vedere direttamente "come le cose sono". La scienza crea un tipo speciale di collegamento tra cosa possiamo immaginare e ciò che riteniamo reale; emerge dal prendere in modo serio e sistematico il pensiero semplice e ovvio, partendo dall'assunto che, sebbene possiamo pensare quello che ci piace, non possiamo fare quello che ci piace. Il compito dell'educazione scientifica, dunque, è di comunicare sia la sorprendente gamma immaginativa di ciò che la scienza trae dalla realtà, sia la forza e la sicurezza della conoscenza che ha acquisito dal lento e duro lavoro di confrontarsi sistematicamente l'una con l'altra. Le scienze che abbiamo sono proprio ciò che, contingentemente e storicamente, ci capita di avere, pertanto, il motivo principale per conoscerle, che dovrebbe determinare il modo in cui vengono insegnate e apprese, è consentire alle persone di formarsi giudizi sul loro valore. Tuttavia, affinché questa visione dell'educazione scientifica non rimanga un'astrazione pedagogica, è necessario considerare, oltre l'oggetto del sapere e “cosa l'insegnante fa”, anche cosa succede nella mente del soggetto che apprende: non è sufficiente, infatti, stabilire "cosa" sia importante insegnare se non si pone un'attenzione altrettanto rigorosa e scientifica sul "come" si apprende. Questa consapevolezza sposta il mio lavoro d'indagine verso le radici della cognizione umana, laddove la conoscenza dei meccanismi dell'apprendimento diventa l'elemento cardine per costruire una didattica realmente efficace. La letteratura ci offre importanti contributi per comprendere come il bambino organizza le informazioni, come ristrutturata le proprie preconoscenze e come interagisce con i concetti astratti. Ed è proprio partendo dalle evidenze fornite dalle scienze dell'apprendimento che è possibile delineare un quadro in cui la pratica scientifica e lo sviluppo cognitivo si intrecciano indissolubilmente, trasformando l'aula in un ecosistema favorevole alla crescita del pensiero critico.

1.2 How people Learn

Il volume fondamentale pubblicato dal National Research Council, nella sua prima versione del 2000 (poi aggiornata nel 2018 e nel 2020) dal titolo “*How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School: Expanded Edition*”, rappresenta un importante rapporto scientifico che sintetizza anni di ricerca sulla psicologia cognitiva, neuroscienze e scienze dell’educazione, che ha offerto un importante contributo nella nostra comprensione di come le persone imparano, dando ai professionisti del settore l’opportunità di migliorare le pratiche di insegnamento e di apprendimento. Il volume nasce, infatti, con un obiettivo non solo teorico, ma pratico: capire come le scoperte della scienza cognitiva possano trasformare ciò che accade nelle classi, e in tale contesto, mi consente di dare valore oltre che all’ insegnamento (teaching), anche all’apprendimento (learning). Gli studi scientifici condotti negli anni hanno consentito di approfondire la nostra conoscenza sull’ apprendimento, passando da un’attenzione alla sola osservazione del comportamento (stimolo-risposta comportamentista), alla necessità di mappare i processi mentali interni che hanno luogo nelle persone quando esse percepiscono, ricordano e apprendono. Da ciò, ne è derivata la consapevolezza che il rote learning (imparare a memoria) sia l’esatto opposto dell’apprendimento con comprensione, che rende il soggetto esperto, in quanto permette il *transfer cognitivo*, cioè la capacità di applicare ciò che si è imparato in contesti nuovi e di organizzare la conoscenza in strutture concettuali che permettono al soggetto di recuperare l’informazione giusta al momento giusto, rendendola, così, funzionale.

Ma, tali studi, ad oggi ci hanno consentito anche di avvalorare sempre di più il rapporto tra maturazione biologica ed esperienza. Sebbene sia un dato scientifico il fatto che l’essere umano nasca biologicamente predisposto, in termini proprio cerebrali, ad orientarsi verso l’ambiente e ad imparare cercando schemi, regolarità e nessi causali; è necessario considerare che, soprattutto in particolari finestre temporali in cui il cervello è più plastico e ricettivo, le esperienze modificano fisicamente la struttura del cervello. Attraverso processi come la sinaptogenesi (creazione di connessioni nervose) e il *pruning* (potatura sinaptica), l’ambiente e le attività che il bambino svolge decidono quali percorsi

neurali diventeranno “autostrade dell'informazione” e quali, invece, verranno dismessi. Ne deriva la necessaria considerazione del fatto che l'apprendimento sia mediato dagli strumenti della cultura (linguaggio, simboli, tecnologie) e dal contesto, richiamando un impegno valoriale ed etico, oltre che di responsabilità, di noi docenti, nella progettazione di adeguati ambienti di apprendimento. Il contributo teorico approfondito offre quattro parametri valutativi, utili per valutare l'efficacia dell'ambiente scolastico:

1. *Learner-centered* (centrato su chi apprende): l'insegnante deve prestare attenzione alle conoscenze, abilità e credenze che gli studenti portano in classe, perché le preconsce contano. È a partire dalle teorie intuitive, ma molto forti, che i bambini hanno su come funziona il mondo, che essi possono essere significativamente coinvolti nel processo di apprendimento; altrimenti impareranno solo nuove informazioni per l'esame, tornando ai loro vecchi modelli subito dopo.
2. *Knowledge-centered* (centrato sulla conoscenza): ci si concentra su "cosa" viene insegnato, perché viene insegnato e cosa significa la padronanza della materia. La competenza richiede organizzazione: per diventare competenti in un'area di indagine, gli studenti, devono avere una solida base di conoscenze fattuali, ma devono anche capire i fatti all'interno di un quadro concettuale e organizzare la conoscenza in modo che faciliti il recupero e l'applicazione.
3. *Assessment-centered* (centrato sulla valutazione): si privilegia la valutazione formativa (feedback continuo per orientare gli studenti), rispetto a quella sommativa (voto finale); così la valutazione diviene uno strumento vero e proprio di apprendimento. In questo contesto, di rilievo è anche il ruolo della metacognizione: “pensare al proprio pensiero”, chiedersi se sia chiaro e monitorare la propria comprensione, è l'esercizio necessario a cui un'insegnante deve preparare i propri studenti, per favorire un apprendimento di successo.
4. *Community-centered* (centrato sulla comunità): si riconosce che l'apprendimento è un atto sociale e influenzato dalle norme della classe e

della società; non un atto isolato, ma una pratica che si sostanzia in una comunità di apprendimento, fatta di ricerca e di scambio di idee.

L'integrazione di questi quattro parametri porta inevitabilmente con sé anche la ridefinizione del ruolo professionale del docente, chiamato chiaramente a una responsabilità che va ben oltre la trasposizione didattica dei contenuti. Assumere le lenti della letteratura scientifica e del contributo offerto da *How People Learn* significa, per l'insegnante, accettare la sfida di operare come un mediatore consapevole tra la struttura biologica del cervello dei soggetti in formazione e la complessità del sapere: da ciò deriva l'imprescindibile necessità di attenzionare e rispettare lo sviluppo cognitivo dei soggetti, sintonizzando l'azione didattica con ciò che avviene effettivamente nella mente dell'alunno durante l'atto dell'apprendere. Il rispetto dello sviluppo cognitivo può essere inteso come la capacità di intercettare le "finestre di opportunità" in cui la plasticità cerebrale è massima. Il docente-ricercatore deve saper mappare il passaggio cruciale che avviene nella mente dello studente: la transizione da una conoscenza frammentata a una strutturazione "esperta" del sapere. Come evidenziato dal rapporto del National Research Council, è necessario che l'insegnante monitori costantemente se l'alunno sta semplicemente accumulando dati o se sta invece costruendo quel quadro concettuale necessario al *transfer cognitivo*. In questa prospettiva, l'attenzione ai processi mentali interni diventa l'orientamento per una didattica inclusiva e di qualità. Il docente ha il compito di "rendere visibile il pensiero", stimolando quelle funzioni esecutive e metacognitive che permettono al bambino di governare il proprio apprendimento: soltanto attraverso questa profonda sensibilità verso i meccanismi di funzionamento della mente (verso la memoria di lavoro, l'attenzione selettiva e la regolazione emotiva) l'insegnamento può trasformarsi da semplice erogazione di informazioni, in un'autentica pratica di cura cognitiva. In ultima analisi, rispettare lo sviluppo dell'allievo significa riconoscere che ogni mente è un ecosistema unico, e che il ruolo dell'insegnante è quello di progettare quelle impalcature (*scaffolding*) necessarie affinché ogni soggettività possa fiorire, trasformando la predisposizione biologica all'imparare in una competenza di vita permanente e consapevole.

1.3 Il curriculum verticale

Nella prospettiva di un itinerario educativo scientifico, e in questo contesto, di una didattica della fisica che intenda realmente incidere sulla formazione del pensiero critico, emerge la necessità di ripensare ad una ristrutturazione del curriculum verticale di scienze, nell'ottica di un insegnamento che possa abbracciare il Framework concettuale esposto e condiviso al paragrafo 1.1, nonché valorizzare la concezione di corpo e mente uniti nell'esperienza di apprendimento. È necessario riformulare curricula scolastici verticali che leghino intimamente la pratica (ai fini della modellizzazione) i patterns trasversali (Gestalt e valore nel nesso causa-effetto tra i fenomeni) e le core ideas teoriche alla base della disciplina scientifica. Ma, purtroppo questo in Italia appare ancora come un orizzonte ideale. Qui, l'evoluzione normativa guidata dalle *Indicazioni Nazionali* ha sancito il primato della competenza sulla mera trasmissione della conoscenza: benché essere competenti non significhi semplicemente "sapere", ma saper mobilitare le proprie risorse conoscitive per affrontare situazioni nuove e complesse, spesso emerge il rischio di sopravvalutare il "saper fare", in un'ottica formativa a livello professionale, ponendo in secondo piano la conoscenza, il "sapere", elemento fondamentale per rendere i soggetti realmente esperti. Infatti, nell'ambito del *Framework K-12*, il termine "pratiche" è stato scelto al posto di "abilità" (skills) o "indagine" (Inquiry) proprio per sottolineare che l'impegno scientifico richiede non solo abilità cognitive, ma anche conoscenze specifiche per ogni pratica, sottolineando che la scienza non è solo un metodo, ma un insieme di attività sociali e cognitive; rendendo così chiaro che: il "fare" scienza non è separabile dal "sapere" scienza. In effetti, credo che l'organizzazione di un curriculum verticale efficace dovrebbe superare definitivamente questa storica separazione e orientarsi verso l'abbandono della frammentazione enciclopedica dei contenuti, intrinseca nella struttura dei programmi tipici della scuola italiana. Ciò al fine di abbracciare quella che il *National Research Council* definisce un'integrazione tra "idee disciplinari fondamentali" e "pratiche scientifiche". Un curriculum verticale in scienze, dunque, che non dovrebbe essere una lista di argomenti che si ripetono ciclicamente da portare a termine (il cosiddetto "modello a spirale" spesso inteso

come banale ripetizione), ma che sia un vero e proprio itinerario di progressiva sofisticazione dei modelli mentali. Valorizzare l'interconnessione tra il "sapere" e il "saper fare" significa necessariamente trasformare l'aula in un laboratorio permanente dove la teoria non precede l'esperienza, ma la permea e le dà consistenza. Nel contesto italiano, questo si traduce nel progettare percorsi che, fin dalla scuola primaria, non temano di affrontare concetti complessi (come quello di "campo" o di "interazione" che ho analizzato nel Capitolo II) purché declinati attraverso pratiche concrete: il porre domande, il costruire modelli fisici o digitali, l'argomentare basandosi sulle prove. Il valore della competenza risiede proprio in questo confine tra l'intuizione e la formalizzazione, ed è in funzione di essa che il curriculum verticale deve essere organizzato per accompagnare lo studente in un percorso decennale di alfabetizzazione scientifica in cui il "saper fare" (sperimentare, misurare, manipolare) è lo strumento necessario, ma non l'unico, per comprendere profondamente i fenomeni. A tal proposito, il *Framework K-12* identifica otto pratiche essenziali per l'apprendimento della scienza e dell'ingegneria, che ritengo molto valide da inserire nella strutturazione del curriculum verticale:

1. *Porre domande (per la scienza) e definire problemi (per l'ingegneria).*
2. *Sviluppare e utilizzare modelli.*
3. *Pianificare e condurre indagini.*
4. *Analizzare e interpretare dati.*
5. *Utilizzare il pensiero matematico e computazionale.*
6. *Costruire spiegazioni (per la scienza) e progettare soluzioni (per l'ingegneria).*
7. *Impegnarsi in argomentazioni basate sulle prove.*
8. *Ottenere, valutare e comunicare informazioni.*

Analizziamole nello specifico:

Pratica 1 - Porre domande e definire problemi. La scienza inizia con una domanda sul fenomeno (es: "Perché un oggetto può muoversi senza che nessuno lo tocchi?"), l'ingegneria inizia con un problema da risolvere (es: "Come

possiamo orientarci sulla Terra?"). Negli studenti, questa pratica deve evolversi dal porre domande semplici basate sulla curiosità, alla formulazione di domande che possono essere verificate empiricamente.

Pratica 2 - Sviluppare e utilizzare modelli. I modelli sono strumenti essenziali per pensare, visualizzare e prevedere fenomeni. Possono essere diagrammi, repliche fisiche, rappresentazioni matematiche o simulazioni al computer. Gli studenti dovrebbero imparare a costruire modelli per spiegare ciò che osservano.

Pratica 3 - Pianificare e condurre indagini. Gli studenti devono avere opportunità di progettare indagini che verifichino le loro spiegazioni o i loro modelli. Questo include decidere quali dati raccogliere, quali variabili controllare e quali strumenti utilizzare.

Pratica 4 - Analizzare e interpretare dati. Una volta raccolti i dati, essi devono essere presentati in una forma che riveli schemi e relazioni. Gli scienziati usano tabelle, grafici e analisi statistiche per identificare i significati dei dati. Gli studenti devono imparare a distinguere tra l'errore di misurazione e i risultati reali.

Pratica 5 - Utilizzare il pensiero matematico e computazionale. La matematica e il pensiero computazionale sono strumenti fondamentali per rappresentare le variabili e le loro relazioni. Nella scuola primaria, questo non significa solo "fare calcoli", ma:

- Utilizzare il pensiero statistico per analizzare i dati.
- Riconoscere schemi (pattern) e quantità.
- Utilizzare strumenti digitali per misurare e registrare fenomeni.
- Capire che i modelli matematici sono simulazioni della realtà che ci permettono di fare previsioni.

Pratica 6 - Costruire spiegazioni (per la scienza) e progettare soluzioni (per l'ingegneria). L'obiettivo della scienza è la costruzione di teorie che possano fornire spiegazioni esplicative del mondo. Una "spiegazione scientifica" è un resoconto logico che correla i dati osservati con la conoscenza scientifica

consolidata. Per i bambini, questa pratica significa imparare a dire "perché" un fenomeno accade, basandosi sulle prove raccolte e non solo sull'intuizione, per passare, dunque, dal "racconto" soggettivo alla "spiegazione" oggettiva e verificabile.

Pratica 7 - Impegnarsi in argomentazioni basate sulle prove. In scienza, il ragionamento e l'argomentazione sono essenziali per identificare i punti di forza e di debolezza di una linea di ragionamento. Gli studenti devono imparare a difendere le proprie spiegazioni utilizzando i dati e devono saper ascoltare e valutare criticamente le spiegazioni degli altri compagni, trasformando, così la classe in una vera "comunità di ricerca".

Pratica 8 - Ottenere, valutare e comunicare informazioni. Essere alfabetizzati scientificamente richiede la capacità di leggere, interpretare e produrre testi scientifici. Gli scienziati devono poter comunicare chiaramente le loro idee affinché altri possano replicare i loro esperimenti; ciò, per gli studenti, significa imparare a documentare il proprio lavoro (quaderni di laboratorio, tabelle, presentazioni) e a saper distinguere tra fonti attendibili e no.

1.4 La conoscenza incarnata: l'Embodied Cognition

Se le evidenze di *How People Learn* ci hanno permesso di comprendere che l'essere umano nasca con un cervello biologicamente predisposto all'apprendimento, e che questo apprendimento, mediato dal corpo, sia orientato dall'ambiente, dalla cultura e dal contesto, è innegabile considerare intimamente uniti nell'esperienza umana il corpo, la percezione e l'azione. Ciò riporta necessariamente l'attenzione, da parte dei professionisti dell'educazione, nella progettazione di adeguanti setting di apprendimento che valorizzino questa intima connessione, predisponendo luoghi di attuazione del superamento di quel dualismo cartesiano che per secoli ha separato l'attività intellettuale dal sostrato sensomotorio. In tale visione, la mente non è un dispositivo isolato che elabora simboli astratti, ma un sistema profondamente radicato nelle modalità della nostra interazione corporea con il mondo. Ne deriva che, per un bambino della

scuola primaria, apprendere la fisica non significa decodificare un linguaggio formale, ma tradurre in pensiero consapevole un'esperienza che è stata prima di tutto vissuta, toccata ed agita. Questa attenzione per il corpo e l'azione, già presente all'inizio del '900, è stata a lungo contrastata dalla psicologia cognitiva classica, la cui predominanza degli scienziati riteneva l'azione (e il corpo) secondaria alla conoscenza. Con il trascorrere dei decenni, poi, il motivo per cui la cognizione dipende dal corpo, è diventato sempre più chiaro: noi percepiamo per agire e ciò che percepiamo dipende da come intendiamo agire. Le prime teorie riconducibili al modello della cognizione incorporata riguardano l'apparato ecologico della percezione di James Gibson, il quale attribuisce primaria importanza ai sistemi percettivi per la loro capacità di cogliere direttamente gli oggetti in funzione delle possibilità motorie a essi associate. Il concetto psicologico sul quale si basa il pragmatismo gibsoniano si chiama "*affordance*" (Gibson, 1979), ovvero l'aspetto fisico di un oggetto che permette, a chi lo utilizza, di dedurre le funzionalità o i meccanismi di funzionamento. Le *affordances* che un soggetto è in grado di percepire in un determinato oggetto dipendono dalle esperienze precedenti, dalle sue esigenze attuali e dalla sua consapevolezza di che cosa il dato oggetto può rendere disponibile. Secondo questo principio, l'individuo non percepisce una copia di ciò che il mondo esterno gli rimanda, ma capta una serie di informazioni di alto ordine, utili alla sua azione. È in questa direzione che si colloca la concezione di fine '900 di Embodied Cognition², la quale evidenzia che la conoscenza richiede la partecipazione di cervello, corpo ed ambiente, rafforzando l'idea che il pensiero non sia "divorziato" dal corpo; ma, come pensiamo, dipende dal tipo di corpo che abbiamo. Negli ultimi vent'anni tale visione è stata esplorata da differenti autori. Edgar Morin, ad esempio, asserisce che: "*Tutto indica una relazione*

²La nascita dell'Embodied Cognitive Science, o scienza cognitiva incorporata, risale alla fine degli anni '80, nel momento in cui si diffonde il concetto per il quale la mente non è più indipendente dal corpo, ma inscritta in esso. Oggi l'approccio Embodiment è in ascesa e il termine che lo definisce, spesso viene tradotto con "incarnato" o "incorporato". Si preferisce, tuttavia, usare l'aggettivo incorporato, per evitare le risonanze religiose della prima soluzione e quelle riduzionistiche della seconda. In questo modo l'accezione "incorporato" vuole evidenziare il corpo come dimensione da cui la mente emerge.

reciproca, un mutuo effetto, una causalità circolare”, da cui l’Embodied Cognition, che definisce la mente non come un insieme di circuiti cerebrali, ma come un fenomeno distribuito, che risiede non solo nella testa, dal momento che la corporeità (Embodiment) è la condizione necessaria per lo sviluppo dei processi cognitivi. Certamente si tratta di una concezione sorprendente. Pensare che noi non siamo il nostro cervello, è un po’ come sentirsi dire che il cervello non è quella cosa dentro di noi che ci rende coscienti, poiché in realtà questo non esisterebbe se non localizzato nel corpo, alla stregua di un qualsiasi altro pezzo di esso. Tuttavia, soltanto negli ultimi anni è emersa la prospettiva nuova dell’Embodied che sottolinea proprio che gli organismi siano dotati di un corpo oltre che di un cervello, che la mente non è qualcosa di separato, ma che i processi cognitivi si fondano sui processi sensorio-motori. Alcune peculiari applicazioni operative di tale approccio, mostrano innanzitutto il rapporto tra movimento fisico e potenziamento dell’apprendimento e della memoria; accanto all’importanza di conoscere lo sviluppo del cervello in età evolutiva per comprendere il comportamento di bambini ed adolescenti; la particolarità dell’influenza dell’ambiente sociale e il clima culturale sull’apprendimento; nonché la capacità del cervello di generare nuovi neuroni fino alla tarda età e la sua modificabilità (concetto di plasticità). Partendo, dunque, dal riconoscimento del corpo come mediatore scientifico del processo di apprendimento a livello neurobiologico e neuro fenomenologico, un fertile ambito di studio si focalizza sulle evidenze scientifiche che l’EC, con i suoi atti incarnati, può offrire al mondo della didattica importanti conoscenze su come costruire metodologie che rispondano efficacemente ai bisogni educativi, anche speciali, degli studenti. In questa direzione, l’obiettivo della trattazione di tale tema è rivolto ad offrire una mia personale validazione del modello “EC Based” per valorizzare la corporeità come ambiente di apprendimento e contestualizzazione (setting); principi orientanti la mia progettualità. Tutto ciò partendo dal presupposto che le basi concettuali dell’Embodied Cognition offrono inedite opportunità di valorizzazione delle differenze dei processi di apprendimento, rivelandosi estremamente funzionali a realizzare metodologie didattiche innovative ed inclusive. Di fatto, è possibile analizzare diverse forme di EC che hanno

rappresentato, o rappresentano tutt'ora, la base sulla quale sarà possibile giustificare teoricamente future ricerche con maggior attendibilità. Potremmo distinguere tre forme dell'EC: un primo modello è quello fenomenologico, dove prevale la valorizzazione della percezione; questa predilezione per il 'primato della percezione' è riscontrabile anche nei fenomenologi contemporanei, i quali sostengono apertamente che: *“relativamente alla cognizione e all'azione in generale, la percezione è basilare e ha la precedenza³”*.

Un secondo modello è quello pragmatico, dove prevale, invece, l'attenzione sull'azione motoria. Per i sostenitori, i concetti non sono semplici rappresentazioni di oggetti, ma qualcosa di più simile alle istruzioni utili per interagire con quegli oggetti e, quindi, finalizzati all'azione.

C'è, infine, una terza “forma” di EC che concerne il comportamentismo logico, valorizzando il primato del “know-how” fondato sull'esperienza, rispetto alle regole e procedure operative di stampo rappresentazionale. Nel 2014 in Italia è stato pubblicato un testo dal titolo *“Scuola in movimento. La Didattica tra Scienza e Coscienza⁴”*, in cui risulta chiaro che l'EC rappresenta, ad oggi, uno degli approcci scientifici che sta contaminando maggiormente l'emergente campo di ricerca delle Neuroscienze Educative. E ciò non nasce solo da un convincente impianto concettuale, ma da un elevato grado di attendibilità scientifica conferitogli da un nuovo filone di ricerca, che analizza la relazione tra il mondo della Didattica, della Pedagogia Speciale e il concetto di Cognizione Incarnata. I ricercatori che lavorano nella prospettiva della cognizione incarnata offrono una gamma di indicazioni specifiche sulle caratteristiche dell'EC a partire dal fatto che l'azione stessa (su cui si basa la cognizione) plasma la percezione, il sé e la lingua. Molti compiti cognitivi, infatti, vengono eseguiti usufruendo delle risorse sensoriali e motorie, anche quando i compiti stessi sono ben lontani dallo spazio e dal tempo. Gli esempi includono l'uso di immagini mentali, la simulazione di azioni durante la comprensione linguistica, la

³ Gallagher e Zahavi, 2009, p. 23

⁴ Gomez Paloma, F. (2014). *“Scuola in movimento. La didattica tra scienza e coscienza”*

costruzione di modelli mentali durante il ragionamento e la comprensione della lettura. Si consideri, per esempio, come spazialmente la scansione di un'immagine mentale di ospiti seduti intorno al tavolo per una cena elaborata possa facilitare la pianificazione e l'organizzazione, anche se le persone coinvolte sono sparse in tutto il mondo e l'evento stesso è cronologicamente ancora distante mesi. A livello internazionale molte delle ricerche condotte sulle Neuroscienze Educative hanno dimostrato che esiste una circolarità tra stimoli ambientali ed adattamento del cervello (sinaptogenesi), ma è necessario che questa circolarità venga innanzitutto metabolizzata da coloro che operano nel mondo della formazione (docenti, formatori, educatori, ecc.). La Neuroscienza Cognitiva che si interessa dei problemi di ricerca sollecitati dall'istruzione passa sotto il nome di neurodidattica. In questo ambito disciplinare, contributi fondamentali riguardano diversi aspetti: quello relativo alla didattica speciale, focalizzato nella ricerca di un itinerario facile e sicuro che garantisca a tutti l'accesso alla cultura umana. Qui, l'EC potrebbe contribuire, ad esempio, a far fronte ai disturbi dello sviluppo, come quelli relativi alla condotta, oppure i DSA (es. dislessia e disortografia), ma di certo importante è il suo apporto alla didattica generale e disciplinare. Per quanto riguarda lo studio dell'apprendimento e i suoi fattori, fondamentale è l'attenzione (le tecniche per attivarla e gestirla); il tutto tenendo anche conto dei fattori emotivi e di stress che possono incidere sulla memorizzazione. Un altro settore d'intervento potrebbe riguardare l'ambiente di apprendimento, come, ad esempio, l'organizzazione del setting. L'illuminazione, che incide enormemente sulla capacità di concentrazione e dunque di apprendimento; oppure, il rumore. Potrebbe essere utile adottare delle strategie, come pannelli di isolamento acustico, che permettono di concentrare l'attenzione in aula ed evitare i rumori disturbanti che provengono dalla strada. Un altro aspetto importante concerne il rapporto tra apprendimento, emozione e corpo, dal momento che: *“le emozioni rappresentano un timone emotivo per guidare il nostro giudizio e le nostre azioni... il presupposto originario, per il quale il nostro cervello si è evoluto”*⁵.

⁵ Immordino-Yang & Damasio, 2007, p. 4

Bisogna tenere presente che le emozioni rappresentano il mezzo principale attraverso il quale il cervello elabora il valore da attribuire alle informazioni che derivano dai canali sensoriali. Nel momento in cui l'informazione d'entrata è rilevante, allora si attiva uno specifico circuito emozionale, che può portare all'esecuzione di risposte automatiche (come scappare via da un pericolo), o la pianificazione della risposta, in virtù dell'esperienza pregressa o di decisioni elaborate in contesti contingenti. Nell'epoca dei Bisogni Educativi Speciali⁶ e delle classi complesse, sicuramente è necessario ripensare la didattica secondo queste prospettive di riflessione. Non è infatti sostenibile, almeno attualmente, pensare una didattica moltiplicata e frantumata per numero n di allievi, ma non è più sostenibile neanche una didattica univoca e uniformante che non tenga conto dell'unicità di ogni singolo allievo, a partire dalla sua conoscenza profonda e autentica da parte dei docenti. Purtroppo, invece, l'attenzione nella scuola è rivolta sempre più spesso a problematiche di tipo logico-razionale che non tengono conto le componenti cognitive-corporee-emotive-relazionali (competenze cross modali), che sono tuttavia indispensabili per favorire l'apprendimento degli allievi. Numerosi studi condotti in attività di ricerche, hanno portato ad una considerazione molto forte: le attività del corpo, così come la cultura, plasmano, costruiscono apprendimenti e tutto ciò avviene attraverso le emozioni. Aspetti, questi, di grande rilevanza per me in quanto futura professionista della formazione di studenti qualificati, informati e formati eticamente, ovvero futuri cittadini del mondo. Le evidenze scientifiche, ad oggi, ci parlano sempre più del valore della centralità del corpo e delle esperienze corporee per lo sviluppo e per l'apprendimento. In particolare, alcune ricerche condotte sugli animali evidenziano che l'attività motoria comporta un aumento ed una proliferazione di cellule nell'ippocampo e maggiori prestazioni della memoria a livello di connessione delle sinapsi⁷. Estendendo queste ricerche agli umani, è stato sottolineato che, coerentemente con le previsioni della ricerca, i soggetti che conducevano maggiore attività fisica, presentano una migliore

⁶ BES – D.M. del 27 dicembre 2012

⁷ Chaddock et al., 2010

struttura e funzione dell'ippocampo implicata negli apprendimenti. Questo ci permette di capire che non esiste alcuna esperienza cognitiva priva dell'implicazione del corpo e delle emozioni, le quali hanno, infatti, un'enorme ripercussione sul modo in cui si apprende e si consolidano le conoscenze.

Questo approfondimento sull'EC trova una delle sue radici più nobili e solide nell'epistemologia genetica di Jean Piaget⁸: il grande studioso svizzero aveva già dimostrato, tra gli anni 20 e gli anni 30 del '900, come l'intelligenza logico-matematica traesse origine dalle azioni che il soggetto compie sugli oggetti. Per Piaget, l'esperienza fisica (ovvero l'estrazione di proprietà dagli oggetti stessi, come il peso o la forma e l'esperienza logico-matematica, che deriva invece dal coordinamento delle azioni compiute sugli oggetti) è il motore che permette la costruzione delle strutture mentali. In questo senso, prima che il bambino possa giungere alla formalizzazione del concetto di "interazione a distanza", egli deve aver sperimentato la logica dei rapporti spaziali e delle forze attraverso il proprio corpo. L'astrazione non è dunque una fuga dalla realtà fisica, ma il culmine di un processo di interiorizzazione di schemi d'azione inizialmente concreti. A sostegno di questa tesi, la letteratura scientifica contemporanea offre contributi di estremo interesse che arricchiscono il panorama aperto da Piaget. Studi come quelli di Wilson (2002) in *"Six views of embodied cognition"* o le ricerche di Barsalou (2008) sulla *"Grounded Cognition"*, suggeriscono che la conoscenza sia "situata" e che persino i processi cognitivi di alto livello, come il ragionamento scientifico, riattiveranno sempre, a livello neurale, quegli stessi sistemi sensoriali e motori coinvolti nell'esperienza originale. Quando un alunno riflette su un campo magnetico o su una "forza invisibile", nel nostro caso, è come se la sua mente non operasse nel vuoto, ma simulasse internamente le sensazioni di attrazione, resistenza o equilibrio che il suo corpo ha appreso dall'esperienza nel mondo fisico. La conseguenza di tali considerazioni è che ogni programma di ricerca che non considera il corpo è, di per sé, incompiuto;

⁸ Piaget, J. (1970). *L'epistemologia genetica*.

pertanto, la mia proposta progettuale si configura, in questa prospettiva, come l'invito ad abitare quella zona di confine tra il gesto e il concetto. Non si tratta semplicemente di "fare laboratorio" in modo meccanico, ma di permettere agli alunni di sviluppare una sensibilità propriocettiva verso i fenomeni naturali, da cui deriva il mio interesse per l'integrazione cinestetica nella progettualità. È così che l'apprendimento incarnato diviene il fondamento di un curriculum verticale progettato per essere un percorso di progressiva sofisticazione di modelli mentali: solo una conoscenza che passa per i sensi e per l'azione può trasformarsi in quel sapere significativo e permanente che questo lavoro di Tesi si propone di raggiungere.

1.5 Abitare il confine: l'insegnamento come pratica situata

Se, come si è finora argomentato, la cognizione è un fenomeno incarnato e distribuito, essa non può essere scissa dal luogo fisico e sociale in cui si manifesta. Abbandonata, dunque, l'idea di un apprendimento decontestualizzato, emerge con vigore il concetto di "pratica situata": l'atto di conoscere non avviene nel vuoto, ma è intessuto nelle pieghe di un contesto socioculturale che ne determina forme, possibilità e significati. Pertanto, abitare i contesti marginali, come quello del Rione Sanità a Napoli, significa dunque porsi sulla linea di confine tra la vulnerabilità sociale e la potenzialità trasformativa dell'educazione, riconoscendo quanto l'ambiente scolastico sia un attore che modella, letteralmente, le architetture cerebrali e i vissuti emotivi degli alunni. Le evidenze scientifiche discusse in *"How People Learn"* assumono, in questa cornice, una valenza politica ed etica concreta: se è vero che le esperienze modellano fisicamente il cervello attraverso la sinaptogenesi, è conseguenza diretta la responsabilità assoluta del docente nel progettare ambienti di apprendimento di qualità. In un contesto "difficile" come quello in cui ho scelto di operare, la scuola deve configurarsi come un "ecosistema di resistenza" capace di offrire quegli stimoli compensativi che la marginalità spesso nega. Progettare esperienze contestualizzate significa, dunque, non ignorare la realtà del quartiere, ma assumerla come punto di partenza per una co-costruzione della conoscenza che sia realmente democratica. In questo senso, il *setting* non è solo

l'aula, ma la qualità della relazione che in essa si stabilisce, una relazione che deve saper accogliere l'eterogeneità non come ostacolo, ma come risorsa euristica. Nella complessità di una classe che riflette le sfide della contemporaneità (popolata da alunni stranieri, studenti con disturbi specifici dell'apprendimento e bisogni educativi speciali, tra cui un bambino con disturbo dello spettro autistico e un bambino sordomuto) l'insegnamento come pratica situata richiede una sensibilità che vada oltre la tecnica. Qui, la dimensione emotiva dell'*Embodied Cognition* si rivela cruciale. Come evidenziato in precedenza, le emozioni sono il "timone" dell'apprendimento perché mediano il valore che il cervello attribuisce alle informazioni sensoriali. In una classe così diversificata, dunque, il coinvolgimento corporeo e cinestetico diventa il linguaggio universale capace di abbattere le barriere della comunicazione verbale e dei diversi background socioculturali. L'esperienza didattica nel mio contesto di attuazione, ha dimostrato che la co-costruzione della conoscenza avviene solo se l'ambiente di apprendimento è percepito come uno spazio sicuro di esplorazione, dove l'errore è parte del processo e l'emozione positiva funge da collante sociale. Insegnare nel confine significa, allora, mediare tra la complessità delle storie personali e il rigore dei modelli. Se il cervello è plastico, è proprio attraverso l'azione condivisa, il lavoro cooperativo e l'uso di metafore radicate nel vissuto dei bambini, che ho cercato di ricollegare l'aspettativa di successo formativo in contesti dove spesso prevale il senso di esclusione. Dunque, l'insegnamento situato in contesti marginali può trasformare l'educazione scientifica in un'azione di cura e di cittadinanza: non si tratta solo di trasmettere il concetto di interazione a distanza, ma di vivere quell'interazione umana che permette a ogni bambino, indipendentemente dalla sua condizione di partenza, di sentirsi parte di una comunità di ricerca. In questo scenario, la classe si trasforma in una vera e propria "comunità di pratica", in cui nonostante la presenza di forti spinte alla frammentazione sociale, l'apprendimento situato diventa il collante che permette a soggetti con retroterra e abilità profondamente divergenti di partecipare a un'impresa comune. Come suggerito dalle Neuroscienze Educative, la plasticità cerebrale non risponde solo a stimoli cognitivi, ma è fortemente influenzata dal senso di appartenenza e dalla

sicurezza emotiva. Progettare un ambiente di apprendimento "competente", in questo contesto, significa allora contrastare attivamente il cosiddetto "analfabetismo emotivo", offrendo ai bambini la possibilità di dare un nome non solo ai fenomeni fisici, ma anche ai propri vissuti durante l'esplorazione. Il laboratorio di fisica diventa così una metafora della società desiderabile: un luogo dove la tecnologia e l'ingegneria sono strumenti di emancipazione e dove la comprensione dell'invisibile (le forze, i campi) educa alla pazienza dell'osservazione e al rispetto della complessità.

1.6 L'esperienza Musedu

L'idea di una scuola come "comunità di pratica" trova, nella mia esperienza professionale, la sua realizzazione fenomenologica nel progetto *MusEdu – "Arte e Scienza tra Scuola e Museo"*, un'iniziativa di alto valore pedagogico e sociale ideata e finanziata dalla Fondazione De Agostini, alla quale ho preso parte. Nel periodo compreso tra novembre 2025 e marzo 2026, operare come esperta in questo contesto mi ha permesso di abitare quel confine citato in precedenza, trasformando la teoria dell'apprendimento situato, in un'azione di emancipazione e giustizia sociale in diversi quartieri della mia città. MusEdu si configura come la risposta operativa della Fondazione a una crisi educativa che i dati ISTAT definiscono strutturale: con tassi di dispersione scolastica che in Campania sfiorano punte critiche del 17-19%, il progetto interviene nel solco della "pedagogia del fare", offrendo alle giovani generazioni di contesti socioculturali difficili, strumenti per evadere da percorsi di marginalità spesso già tracciati. In questi contesti, la povertà economica diventa spesso "povertà di aspirazioni": i bambini che crescono in famiglie con bassi livelli di istruzione hanno una probabilità doppia di abbandonare la scuola, alimentando un circolo vizioso di esclusione che blocca l'ascensore sociale. Il progetto vuole inserirsi esattamente in questa "frattura sociale", agendo come un ponte tra le istituzioni culturali e la scuola primaria, e la scelta di Napoli come sede del progetto, coinvolgendo 7 scuole primarie in aree a forte rischio di esclusione (44 classi, di cui 22 terze e 22 quarte, circa 682 alunni e 200 insegnanti) non è casuale. Di

fatti, il Progetto MusEdu si è sostanziato nella proposta di un itinerario didattico di straordinaria intensità, che ha visto protagoniste alcune classi quarte di 4 scuole: “Confalonieri”, “I.C. Alpi Levi”, “R. Sanzio Ammaturo”, “I.C. Angiulli”. L'impianto metodologico dei laboratori MusEdu riflette profondamente i presupposti dell'Embodied Cognition: l'apprendimento non è frammentato in discipline isolate, ma è inteso come un'organizzazione interconnessa del sapere umano, dove la percezione è l'atto congiunto che costruisce il quadro complessivo della realtà. In classi caratterizzate da una profonda eterogeneità, dove spesso le barriere comunicative potrebbero apparire insormontabili, il laboratorio è divenuto il luogo della circolarità tra stimoli ambientali e adattamento cerebrale. La Fondazione De Agostini, attraverso questo presidio, ha voluto operare importanti passi nella missione rivolta a scardinare l'analfabetismo emotivo e cognitivo, offrendo un ambiente di apprendimento dove il cervello di ciascun alunno ha potuto confrontare le impressioni sensoriali dirette con le esperienze pregresse della vita quotidiana, strutturando così apprendimenti permanenti di qualità. In questi contesti di confine, caratterizzati dalla complessa ma stimolante eterogeneità, l'azione educativa si è articolata attraverso due esperienze laboratoriali dall'alto contenuto scientifico, progettate per trasformare l'intuizione sensoriale in modellizzazione fisica consapevole. Il primo ciclo di laboratori si è focalizzato sul fenomeno del rotolamento dei barattoli. In questa attività, gli alunni non sono stati meri esecutori, ma veri e propri investigatori della dinamica: attraverso la manipolazione di cilindri con diverse distribuzioni di massa di granaglie (fagioli secchi, riso), i bambini hanno potuto esperire come "l'invisibile" (la distribuzione del peso all'interno di un corpo) influenzi il visibile (la velocità e la modalità di discesa lungo un piano inclinato) e quanto la “forza invisibile” di gravità determinasse diversi comportamenti dei cilindri durante la discesa su piano inclinato. Per un bambino straniero o per un alunno con DSA, ad esempio, l'evidenza immediata del rotolamento ha offerto un supporto cognitivo insostituibile, permettendo di comprendere concetti di inerzia e attrito senza la mediazione forzata di un testo scritto, ma attraverso la "grammatica dell'azione". Il secondo ciclo di laboratori ha riguardato l'oscillazione dei pendoli, una sfida

cognitiva che ha impegnato gli studenti nella ricerca di regolarità e ritmo. Osservando il moto oscillatorio e variando la lunghezza del filo di un pendolo (costituito da un bullone appeso ad uno spago, fissato ad un supporto di legno costruito dai bambini) le classi hanno potuto sperimentare leggi fisiche riguardanti il periodo dei pendoli e successivamente la sincronizzazione alla frequenza del metronomo. Particolarmente emozionante è stato osservare come un alunno sordomuto, ad esempio, percepisse il ritmo dell'oscillazione attraverso la vista e la vibrazione, o come l'alunno autistico trovasse nella ripetitività prevedibile del pendolo un ancoraggio sicuro per la propria attenzione, arrivando a formulare ipotesi sulle variabili in gioco con una precisione sorprendente. Un aspetto fondamentale emerso dalle esperienze laboratoriali riguarda l'organizzazione interconnessa del sapere umano: i bambini sono stati guidati a comprendere che i sensi non operano isolatamente, ma che la percezione è il risultato di un confronto continuo che il cervello opera tra le impressioni sensoriali attuali e le esperienze immagazzinate nella memoria sulla base di esperienze pregresse. Questa prima fase di sperimentazione in classe ha trovato il suo naturale e grandioso compimento nella visita presso il Museo cittadino di Città della Scienza, alle quali le scuole hanno partecipato al termine delle attività laboratoriali. Grazie alla gratuità garantita da MusEdu, le classi hanno potuto accedere a questo presidio cittadino d'eccellenza, abbattendo quelle barriere economiche che spesso impediscono ai bambini delle periferie l'accesso ai luoghi della cultura alta e offrendo quella tappa di compimento dell'auspicata trasversalità educativa: qui, le conoscenze teoriche abbozzate in aula attraverso la pratica si sono saldate a fenomeni "extra-scolastici", favorendo sempre di più la generalizzazione delle conoscenze, nell'ottica di rendere realmente abili gli studenti. Vedere i bambini muoversi tra le installazioni scientifiche del museo con la consapevolezza di chi ha già "maneggiato" le leggi della fisica, ha confermato la validità dell'intero impianto: il Museo è diventato lo spazio della conferma, dove l'apprendimento incarnato ha manifestato tutta la sua potenza. La necessità di una costante trasversalità tra il "pensare" e il "fare" si è manifestata nel modo in cui gli alunni hanno interrogato i grandi exhibit museali, dimostrando che, quando la scuola esce da sé stessa e si connette al territorio, la

scienza cessa di essere una materia scolastica per diventare uno strumento di lettura del mondo e un diritto di cittadinanza pienamente esercitato. E ciò significa stimolare una strutturazione positiva dei processi cognitivi dei soggetti, operando proprio sull'ambiente, affinché esso venga valorizzato e potenziato non come semplice luogo, ma in quanto elemento attivo che determina forme, possibilità e significati dell'apprendimento. Il successo e il forte valore formativo di questo percorso a cui ho preso parte, sostenuto dalla visione filantropica della Fondazione, risiedono nell'aver trasformato il laboratorio scientifico e tecnologico in una narrazione unitaria, dove le sfide non erano semplici attività, ma tappe di una progressiva sofisticazione dei modelli mentali. MusEdu ha dimostrato che abitare il margine con la qualità dell'istruzione significa innanzitutto credere nel riscatto sociale: la meraviglia provata dai bambini davanti al nesso tra causa ed effetto delle esperienze vissute ha rappresentato quel "timone emotivo" che guidava la classe verso una nuova consapevolezza e verso la co-costruzione della conoscenza. Posso, dunque, riconoscere che, l'esperienza con la Fondazione De Agostini conferma che la ricerca scientifica e la cura educativa sono due facce della stessa medaglia, capaci di rendere abitabile qualsiasi spazio di frontiera, come un arcobaleno di infiniti orizzonti di possibilità trasformative. Infatti, proprio da questa esperienza, ho avuto il piacere di incontrare la classe che ho scelto come luogo da abitare per attuare il mio percorso di sperimentazione progettato per questo lavoro di Tesi: la classe 4^aA dell'Istituto "IC Angiulli".

1.7 La didattica laboratoriale per un apprendimento significativo

In continuità con la precedente concezione proposta che intende lo spazio fisico come un "terzo educatore", capace di orientare le interazioni e sostenere i processi di indagine, ho deciso di progettare il mio itinerario didattico proprio a partire da una riconfigurazione spaziale. L'aula, organizzata in postazioni sperimentali dinamiche e flessibili, è diventata un laboratorio diffuso dove ogni zona è stata dedicata a una fase specifica del metodo scientifico, dalla manipolazione alla negoziazione dei modelli: un'organizzazione che non solo

facilita l'apprendimento, ma promuove anche il benessere relazionale, rendendo l'esperienza funzionale ad un apprendimento incarnato. Il termine laboratorio deriva dal latino medioevale *laboratorium*, a sua volta legato al verbo *laborare*, e ciò ci fa subito capire che si allude a un luogo dove si svolgono attività di lavoro: per le epoche passate di tipo prevalentemente artigianale. In età moderna (dal Seicento in poi), con lo sviluppo delle scienze empiriche, il laboratorio si configura come ambiente, luogo attrezzato per condurre ricerca secondo i metodi e con i mezzi propri di ogni settore disciplinare. Al di là delle differenze circa gli «oggetti» di studio, nella concezione moderna i laboratori scientifici si configurano sempre come ambienti di ricerca. Con il termine ricerca s'intende un'attività tesa a indagare sistematicamente, secondo un'appropriata metodologia scientifica, gli «oggetti» o «contenuti» di cui si occupa una determinata disciplina, per allargarne le conoscenze e le strategie concettuali. La ricerca laboratoriale è, dunque, intrinsecamente contrassegnata dalla messa in atto di procedure e metodologie di tipo attivo: mobilità, cioè, l'intelligenza a non ripetere ciò che già si conosce ma a indagare e, auspicabilmente, trovare soluzioni nuove ai problemi investigati. La storia dell'educazione conosce in tutto il suo corso l'applicazione di metodologie attivistiche nel processo d'insegnamento-apprendimento. Da Socrate (metodo maieutico) ad Agostino e Tommaso (i De Magistro), da Comenio a Pestalozzi e al movimento della «scuola attiva» (Ottocento/Novecento). Ma il vero sviluppo di queste idee si ha però, come è noto, con John Dewey, che nel 1896 fonda a Chicago la Scuola Laboratorio nella quale attuare il metodo attivo da lui elaborato che fa dell'esperienza la base di ogni sviluppo di pensiero: l'educazione è per Dewey una continua ricostruzione di esperienza. Lo studente si appropria di una conoscenza tramite un processo che, partendo da un'attività, attraverso prove ed errori, osservazioni, esperimenti, controllo di ipotesi formulate, lo conduce a rielaborare intellettualmente quanto da lui esperito, a formulare nuove idee e a verificarle. L'esperienza dell'alunno, peraltro, è l'insieme degli atteggiamenti, delle rappresentazioni, delle reazioni, delle azioni e dei comportamenti che intessono il suo vivere quotidiano e, globalmente, è il vissuto di cui egli è non solo consapevole, ma portatore attivo. In questo contesto, compito

dell'insegnante è cercare, individuare gli interessi dell'alunno, interessi che non vanno né repressi né lusingati, ma coltivati, in quanto offrono il riferimento, l'argomento e la materia sui quali operare con efficacia sul piano educativo. Da quanto detto si ricava una conclusione: una scuola condotta in senso laboratoriale intende superare modelli formativi basati su uno schema puramente trasmissivo e ripetitivo del sapere, per favorire invece nell'allievo l'attitudine alla ricerca personale, la valorizzazione dell'esperienza, la dimensione del «fare», la capacità di mettere in comune il lavoro individuale. Il laboratorio, dunque, è insieme ufficio, officina, fucina e atelier, dove il soggetto apprende in un fare attivo: osserva, congettura, progetta, predispone, prova, adegua, produce, argomenta e a suo modo crea. Il fare corrisponde a bisogni, a curiosità, a domande e a interrogativi e l'azione è finalizzata a una conoscenza, a un apprendimento/prodotto. Qui l'apprendimento si esplica in un'attività di azione che si fa ricerca, un rimodellamento costante del proprio sentire, intervenire ed essere, cioè dei personali teoremi in atto. Proceduralmente richiama il «metodo naturale», cioè l'agire per «tentativi ed errori», dove l'errore diventa segno e indicatore decisivo nella scelta e nel procedere operativo: selettivo, riorganizzativo e cognitivo. Nella scuola, fare laboratorio comporta «funzionare in gruppo» anche quando si opera singolarmente: questo implica il confrontarsi su ipotesi, modelli esplicativi, percorsi e strategie. Richiede la negoziazione di significati, il saper ascoltare e convincere attraverso l'argomentazione e la messa in pratica, puntando il più possibile alla validazione. Tale metodo esige la ricerca/costruzione insieme di una connessione fra linguaggio, struttura e significato e comporta il concorrere nella costruzione del prodotto operativo/materiale e formale/simbolico in base a ruoli diversi e a competenze specifiche, pertanto; implica la condivisione di esperienze e porta alla maturazione di conoscenze e capacità ma richiede norme comuni e responsabilità concorrenti, funzionando come «mente collettiva». Operare secondo una metodologia laboratoriale, in definitiva, significa condividere la consegna e l'obiettivo, comprendere l'opportunità della messa in comune di competenze diverse, negoziare insieme le regole, ripartire consegne e responsabilità individualizzate, collaborare per un obiettivo e prodotti comuni.

È necessariamente un luogo di relazioni positive, di costruzione di fiducia di base, un'occasione di autostima e conoscenza di sé. Si sostanzia nel confronto condiviso delle proprie modalità di funzionamento, di elaborazione, di comprensione delle rispettive attitudini e potenzialità e, dunque, rappresenta un'occasione di valutazione e autovalutazione, un modello di educazione fattuale alla socialità e alla solidarietà.

Ma l'attività laboratoriale valorizza anche le competenze docenti originali, consente di mettere produttivamente insieme soggetti discenti diversi per competenze, livelli ed età, favorisce l'apertura di attività d'interclasse sia orizzontali che verticali (non solo di recupero ma anche di eccellenza), richiede modalità e progettualità flessibili dell'intervento educativo, garantendo, attraverso la diversificazione di proposte e obiettivi, di offrire analoghe opportunità formative per tutti. Infatti, la mia scelta di un impianto metodologico attivo e laboratoriale scaturisce dalla profonda condivisione delle potenzialità epistemologiche espresse dal *Framework K-12 Science Education*: coerentemente con tale visione, sono convinta che l'apprendimento scientifico non possa prescindere da una dimensione manipolativa e tattile che rimetta al centro il corpo del discente. È proprio attraverso l'uso delle mani che si innesca il primo e più autentico contatto con la conoscenza, attivando un asse privilegiato che lega i recettori nervosi periferici alle strutture centrali del cervello. In questo processo, che potremmo definire asse mani-nervi-cervello, l'azione diretta sulla materia non precede semplicemente il pensiero, ma lo genera, fornendo quei dati sensoriali grezzi che la mente elaborerà poi in strutture concettuali astratte; così l'aula cessa di essere un luogo di ricezione passiva per trasformarsi in una comunità di ricerca dove il "fare" è il presupposto ontologico del "pensare". Ma, affinché la fisica diventi un linguaggio comprensibile e non un insieme di dogmi, è necessario innanzitutto far emergere le preconoscenze dei bambini. Come suggerito dalla letteratura scientifica, ignorare le teorie ingenuie o i modelli di senso comune con cui gli alunni interpretano il mondo, significa condannare l'insegnamento all'irrelevanza; il laboratorio deve, dunque, configurarsi come lo spazio in cui queste idee pregresse vengono esplicitate, messe alla prova e, se necessario, ristrutturare attraverso il dubbio e la verifica sperimentale. Infatti, l'auspicata efficacia di questo intervento si basa sulla costruzione di un ambiente di

apprendimento che rifletta l'equilibrio tra la centratura sull'alunno, la focalizzazione sulle "grandi idee" della conoscenza scientifica e un sistema di valutazione inteso come feedback costante e riflessione metacognitiva. In tale scenario, la gestione della classe non può che essere affidata al *Cooperative Learning* e al *Peer Tutoring*, intesi non solo come strumenti di aiuto reciproco, ma come vere e proprie forme di mediazione cognitiva. In una classe caratterizzata da una complessa multietnicità e dalla presenza di bisogni educativi speciali, la cooperazione tra pari agisce come quella "impalcatura" dinamica teorizzata da Vygotskij nella Zona di Sviluppo Prossimale. Qui, l'interazione sociale diventa traduzione: i bambini con una maggiore inclinazione scientifica aiutano i compagni a verbalizzare le intuizioni, mentre l'intero gruppo sviluppa una gestualità specifica e segni codificati per garantire la partecipazione del compagno sordomuto, elevando la lingua dei segni a linguaggio scientifico a tutti gli effetti. Questo clima di interdipendenza positiva alimenta il senso di autoefficacia, permettendo a ogni bambino di sentirsi responsabile del proprio successo e di quello della comunità di ricerca. Parallelamente, l'adozione dell'approccio *Inquiry-Based Science Education* (IBSE) sposta l'asse della lezione dal "sapere" al "ricercare", coinvolgendo gli alunni in una dinamica di indagine continua che ricalca il lavoro degli scienziati. Per supportare questo processo, ho introdotto inoltre una Didattica Metaforica e Narrativa affinché potesse fungere da ponte verso l'astrazione. Poiché concetti come "campo magnetico" o "energia elettrica" risultano intrinsecamente distanti dall'esperienza sensibile, l'uso di metafore incarnate permette ai bambini di proiettare concetti fisici su schemi motori già noti: trasformare, ad esempio, un circuito elettrico in una narrazione di "corridori" permette di "sentire" la resistenza prima ancora di definirla formalmente. La visione che emerge del laboratorio trascende la dimensione di semplice sussidio didattico per configurarsi come una vera e propria postura epistemologica ed etica, capace di trasformare l'attività educativa in un atto di cittadinanza consapevole. Il nucleo fondante di questa prospettiva risiede nel superamento definitivo della dicotomia tra momento teorico e momento pratico,

promuovendo un meticciamiento continuo in cui la ricerca non è mai un percorso lineare o puramente sistematico, ma un'avventura della mente che accoglie l'eterogeneità, le intuizioni improvvisi, i tempi morti e finanche lo scoraggiamento. Questa fusione è stata proposta nelle attività attraverso l'uso dei diari di bordo che hanno imposto il tempo della sintesi e della schematizzazione durante la pratica sperimentale. In questo spazio di "ricerca produttiva", il laboratorio si definisce come un insieme dinamico di condizioni didattiche e sociali che permettono all'allievo di mettere alla prova il proprio bagaglio di conoscenze, accumulate tra scuola ed extrascuola, per estrarne significati universali e condivisi. Qui, attraverso la prassi della ricerca-azione, l'alunno ha l'opportunità di risvegliare bisogni spesso compressi dal sistema scolastico tradizionale (come il movimento, l'esplorazione e la costruzione autonoma) imparando a fare cultura in una dimensione collettiva che valorizza il confronto costante con il gruppo dei pari. Dunque, il laboratorio diventa una metodologia indispensabile per creare ambienti di apprendimento integrati che rispondano alla complessità dell'esperienza umana, dove le singole discipline si intrecciano ologrammaticamente per mobilitare capacità e trasformarle in competenze personali. Abbracciare questa metodologia significa credere che la qualità dell'istruzione scientifica sia il più potente strumento di riscatto, capace non solo di condurre ad apprendimenti realmente significativi e permanenti, ma anche di trasformare il contesto socioculturale complesso della classe in un orizzonte di molteplici possibilità inedite.

1.8 Tutti uguali tutti diversi: l'importanza della cooperazione

Il principio dell'equità, nella pratica dell'educazione scientifica e non solo non può essere ridotto a una mera distribuzione uniforme di contenuti, ma deve tradursi nella creazione di opportunità reali affinché ogni studente, indipendentemente dal proprio punto di partenza, possa impegnarsi attivamente nelle pratiche della scienza. Come affermato nel *Framework for K-12 Science Education*, promuovere l'equità significa riconoscere che le diverse usanze, gli orientamenti e i background culturali che gli studenti portano con sé, non sono

ostacoli all'uniformità, bensì risorse cognitive ed esperienziali su cui costruire l'apprendimento. In un contesto come quello della classe in cui ho operato il mio itinerario didattico di sperimentazione, nel Rione Sanità, abitato da una profonda stratificazione socio-culturale, questa prospettiva ribalta strutturalmente il concetto di "mancanza": le conoscenze pregresse dei bambini stranieri, le modalità percettive di un alunno sordomuto o la meticolosa attenzione ai pattern di un bambino autistico diventano i tasselli fondamentali di un mosaico collettivo di scoperta, perché sono in grado di fornire quella sofisticazione dei dettagli necessaria a rafforzare la co-costruzione della conoscenza. L'obiettivo dell'equità educativa, nel Framework di riferimento, richiama intrinsecamente il nesso tra rigore e accessibilità. Non si tratta di semplificare i contenuti per le classi "difficili", ma di mantenere obiettivi rigorosi fornendo, al contempo, il supporto necessario (umano, materiale e ambientale) affinché tutti possano raggiungerli: tutti e ciascuno devono essere messi nelle condizioni ed avere gli strumenti per raggiungere il successo formativo (che non è uno standard fisso uguale per tutti gli studenti). In questo senso, l'equità si realizza quando il sistema scolastico garantisce l'accesso a "insegnanti di qualità e materiali didattici validi" che sappiano orchestrare queste differenze senza annullarle. Così, la cooperazione non è solo una scelta metodologica, ma diventa la necessità etica che sottende il mio agire e pensare professionale. Come evidenziato da Johnson & Johnson (1994) nella loro teorizzazione dell'apprendimento cooperativo, l'interdipendenza positiva trasforma il successo del singolo nel successo del gruppo. Nella mia esperienza di Tesi, questo si è manifestato nella capacità della classe di farsi "comunità ermeneutica", dove la diversità è diventata la condizione stessa della ricerca, partendo da una solida base: i bambini hanno sin da subito manifestato spiccate abilità collaborative e si presentano come un gruppo classe cooperante, di supporto, sinergico. La letteratura scientifica sottolinea proprio come l'apprendimento sia un atto intrinsecamente sociale: è la cooperazione che permette di attivare quel processo di "scaffolding" in cui i pari si sostengono a vicenda per accadere alla propria Zona di Sviluppo Prossimale. Per l'alunno sordomuto, ad esempio, la cooperazione ha significato non essere un ricevente passivo di cure, ma un

contributore attivo che, attraverso il gesto e l'azione, ha guidato i compagni verso una comprensione visiva della forza e del movimento. In conclusione, "tutti uguali" risiede nel diritto inalienabile di accedere alla conoscenza scientifica come strumento di libertà: ogni alunno, a prescindere dalle proprie specificità cognitive o sensoriali, è stato posto dinanzi ai medesimi contenuti scientifici e alle medesime sfide intellettuali. Se l'obiettivo è lo sviluppo di competenze scientifiche di alto profilo, il sistema — e l'insegnante in quanto suo mediatore — ha il dovere etico di fornire i supporti necessari affinché la complessità di un fenomeno, come l'elettricità, l'attrazione, la repulsione, sia abitabile da tutti. Tutti, dunque, sono "uguali" nel diritto di sentirsi scienziati, di formulare ipotesi e di vedere le proprie scoperte validate dal gruppo e dall'evidenza sperimentale. Il "tutti diversi" rappresenta la ricchezza biologica e culturale che sono importanti risorse nel microcontesto della classe. Ciascun bambino abita il laboratorio portando in dote un pluralismo di significati: le conoscenze pregresse non sono mai neutre, ma sono intrise di cultura, lingua e vissuti corporei. Allora, se l'apprendimento consiste nel legare nuove informazioni a strutture preesistenti, significa che la molteplicità delle basi di partenza presenti in classe garantisce una ricchezza di collegamenti che un gruppo omogeneo non potrebbe mai generare. La cooperazione diventa dunque il dispositivo che permette a queste diverse modalità di accesso di convergere verso un obiettivo comune. L'uguaglianza risiede nell'ambizione del traguardo; la differenza risiede nella singolarità del cammino. Quando i bambini collaborano attorno alle postazioni sperimentali, su dei magneti o su un circuito, non stanno solo imparando la fisica, ma stanno sperimentando un modello di società in cui la vulnerabilità dell'uno è sostenuta dalla forza dell'altro. Insegnare in un contesto di marginalità significa, dunque, presidiare questo equilibrio, garantendo che la diversità culturale e cognitiva non si trasformi in disuguaglianza, ma resti quel lievito indispensabile che permette a una "comunità di pratica" di diventare autenticamente umana e scientificamente rigorosa.

1.9 Il modello Ricerca – Azione

«Le pratiche dell'educazione forniscono dati, gli argomenti, che costituiscono i problemi dell'indagine; esse sono l'unica fonte di problemi fondamentali che devono essere studiati. Queste pratiche dell'educazione sono anche la prova definitiva del valore da attribuire al risultato di tutte le ricerche [...] Di fronte alla situazione indeterminata, all'enigma, la persona può ritrarsi, sentendosi inadeguata, volgersi a qualcosa di più facile e rassicurante, indulgere alla fantasticherie, può ripiegare su sé stessa, oppure può guardare in faccia la realtà. Solo in questo caso comincia a riflettere⁹». (Pourtois, 1986)

È noto, ormai da decenni, che il tipo di valutazione e autovalutazione in voga sia basato essenzialmente su liste di controllo, ma è di interesse di molti studiosi, capire la reale produttività di questi strumenti, che seppur in grado di mettere in luce situazioni problematiche, non offrono concreti piani di azione volti al miglioramento. Diventerebbe fin troppo facile per un preside e per gli insegnanti di una data scuola rispondere alle domande unicamente sulla base delle opinioni e delle idee che già hanno di sé stessi; non sono stimolati a rivedere le loro convinzioni come farebbero invece se venisse loro richiesto di impegnarsi in un processo di ricerca più approfondito, usando certe tecniche per raccogliere e analizzare le informazioni. Per fare in modo che le relazioni derivate dai dati valutativi abbiano una buona credibilità pubblica, esse devono dare una certa idea del processo attraverso il quale le informazioni sono state raccolte e analizzate. La "situazione-problema" deve essere diagnosticata e si deve pianificare e attuare un'azione di rimedio i cui effetti vanno controllati, se si vogliono ottenere dei miglioramenti. Questo processo globale di Analisi-Diagnosi-Pianificazione-Attuazione-Controllo degli effetti è chiamato Ricerca-Azione, e fornisce il collegamento necessario che è assente in molte delle proposte attuali di valutazione e autovalutazione. Agire in questo modo ripercorre esattamente, quello che secondo il metodo scientifico è stato chiesto

⁹ J. Dewey, *Le fonti di una scienza dell'educazione*, La Nuova Italia, Firenze, 1929 (1951)

ai bambini. Il ciclo di base delle attività comprende: "identificazione di un'idea generale", "ricognizione", "piano generale", "sviluppo della prima fase di azione", "attuazione della prima fase di azione", "valutazione", "revisione del piano generale" e così via.

Possiamo definire la Ricerca-Azione come lo studio di una situazione sociale con lo scopo di migliorare la qualità dell'azione al suo interno: la R.-A. mira a introdurre una valutazione pratica in situazioni concrete; la validità delle "teorie" o ipotesi che essa genera dipende non tanto da verifiche "scientifiche" della verità, quanto dalla loro utilità nell'aiutare le persone ad agire in modo più intelligente e abile. Il modello di ricerca empirica della R.-A. tenta di suffragare una certa interpretazione delle situazioni attraverso una descrizione fattuale delle medesime: qui le "teorie" non sono convalidate indipendentemente e poi applicate alla pratica, ma sono convalidate attraverso la pratica. L'utilizzo di tale modello in ambito didattico, dunque la descrizione/interpretazione dei fenomeni, è finalizzato essenzialmente alla decisione di un intervento diretto al miglioramento o alla soluzione di una criticità e adotta una logica essenzialmente idiografica, contestuale; strumenti e tecniche prevalentemente qualitative.

In questo lavoro, l'adozione di tale modello di ricerca, coniuga la teoria dell'apprendimento e la pratica didattica in un processo ricorsivo di miglioramento, basandosi su una convinzione: affinché l'insegnamento scientifico nei contesti scolastici non si riduca a una sterile trasmissione di formule, ma diventi un'esperienza significativa, è indispensabile che il docente agisca come un ricercatore in campo. L'assunto secondo cui il docente debba agire come un ricercatore in campo sposta il baricentro dell'azione didattica dalla "trasmissione" alla "generazione" di conoscenza. Di fronte al pluralismo dei contesti scolastici, e in particolare di quello in cui ho operato, l'insegnante non può limitarsi ad applicare protocolli standardizzati, poiché la complessità delle variabili umane, sociali e cognitive in gioco richiede una costante attività di indagine e adattamento: qui, agire come ricercatore significa adottare uno sguardo clinico capace di osservare i processi di apprendimento nel loro farsi. Come evidenziato nelle tesi di Donald Schön sul "*professionista riflessivo*" (1983), il docente è chiamato a compiere una continua riflessione "*nel corso*

dell'azione e sull'azione”, trasformando ogni imprevisto o errore dei bambini in un dato scientifico da analizzare per ricalibrare la traiettoria educativa. L'integrazione del modello dei *Design Experiments* (Brown, 1992), inoltre, rafforza ulteriormente questa prospettiva. A differenza della ricerca sperimentale classica in laboratorio, i *design experiments* studiano l'apprendimento nel caos fecondo dei contesti reali, degli “ecosistemi complessi”, come quello in cui ho operato, assumendo che l'istruzione sia un sistema complesso influenzato da innumerevoli variabili interconnesse. Tale approccio permette di testare modelli didattici innovativi attraverso cicli iterativi di progettazione, attuazione, analisi e revisione: lo scopo non è solo verificare *se* un intervento “funziona”, ma comprendere *come* e *perché* determinati elementi del design didattico favoriscano lo sviluppo di competenze specifiche in contesti ecologici. Questa metodologia trasforma la programmazione scolastica in una progettualità flessibile e iterativa in cui si è resa necessaria la mia analisi dei dati raccolti (attraverso diari di bordo, osservazioni, produzioni icono-grafiche dei bambini), la riflessione e il confronto con i docenti di classe e il ritorno in campo, in ogni incontro, con un design didattico affinato e arricchito, al fine di elevare la qualità dell'apprendimento. In questa cornice, la progettazione del mio intervento didattico non è stata un atto estemporaneo, ma è stata orientata dai quattro pilastri fondamentali dell'ambiente di apprendimento delineati dalla ricerca cognitiva. Ho inteso costruire un ambiente che fosse, simultaneamente: centrato sull'alunno, valorizzandone le preconoscenze e specificità; centrato sulla conoscenza, per garantire il rigore epistemologico della fisica; centrato sulla valutazione, privilegiando il feedback che permette al bambino di monitorare il proprio progresso; e centrato sulla comunità, trasformando la classe in un luogo di negoziazione, condivisione e collaborazione. La ricerca di questo equilibrio è rivolta a garantire che il laboratorio non sia solo un luogo dove “si fa”, ma un luogo dove “si pensa sul fare”. L'acquisizione di una postura professionale riflessiva di questo calibro, credo sia di fondamentale importanza nell'ottica di una formazione continua della professionalità docente. Praticando iterativamente processi autovalutativi e metacognitivi, ponendosi domande sul proprio operato e mettendo in discussione le proprie certezze, l'insegnante riesce

ad essere quell'esempio etico e valoriale per i bambini, affinché essi possano capire di non essere mai già dati, ma delle persone in divenire, capaci di acquisire la forma che più gli si addice, non preconfezionati, ma capaci di poter diventare chiunque essi vogliono se solo diventano abili nel mettere in discussione il proprio modo di pensare e di agire consueto, uscendo dai propri schemi. Agire come ricercatore in campo ha una profonda valenza etica e politica. In contesti segnati dalla fragilità educativa, il professionista che fa ricerca dimostra di essere consapevole che la conoscenza sia un processo aperto e democratico a cui tutti possono partecipare: il docente-ricercatore accoglie, così, l'incertezza e il dubbio come motori della scoperta. In questo modo, la didattica della fisica si trasforma in una prassi riflessiva capace di generare non solo piccoli scienziati, ma cittadini consapevoli del valore dell'indagine e del rigore metodologico.

CAPITOLO II

Il secondo capitolo di questo lavoro intende tracciare l'itinerario teorico che ha condotto la Fisica Moderna a superare la concezione di "forza a distanza" per approdare al paradigma di "campo". Tale transizione non rappresenta una semplice evoluzione terminologica, ma una profonda ristrutturazione del modo in cui l'essere umano interpreta la realtà e le interazioni tra i costituenti del cosmo. In termini didattici questo nodo concettuale è cruciale: significa traghettare l'alunno da una fisica del "contatto visibile" a una fisica delle "relazioni invisibili", ma misurabili. È in questo che consiste raccontare storie scientifiche con successo: eccitare l'immaginazione in aspetti molto specifici, soprattutto con i bambini, che credono che immaginare il mondo sia molto diverso rispetto al modo in cui il senso comune lo immagina e rappresenta (con metafore, analogie). Quello che i bambini dovranno arrivare a capire è che la scienza cerca di prendere seriamente quelle immaginazioni su come stanno le cose collegandole all'intransigente verità. E questo fine viene perseguito proponendo un curriculum di scienze, per i bambini, che comprenda il know-how pratico, fatto di indagine, ricerca, cooperazione, esempi; e allo stesso tempo il know-how teorico, fatto di strumenti di pensiero scientifico, oggetti formali e regole. Dalle parole di Ogborn: *"Bisognerebbe costruire curriculum di scienze attorno a storie di come la scienza deve raccontare le cose come stanno"*¹⁰. Ed è in questo senso che intendo orientare la mia pratica, che si sostanzierà di una trattazione che partirà dall'analisi della Forza intesa come interazione, cercando di orientare l'intuito che guiderà i bambini a spiegare i fenomeni che vedranno sulla base della loro esperienza, fino a condurli a vivere il concetto fisico che apprenderanno. Ci addentreremo in quello che storicamente è stato definito il "tormento di Newton": il problema dell'azione a distanza. Sebbene la Legge di Gravitazione Universale permettesse di calcolare con precisione i moti celesti, essa lasciava irrisolto il mistero di come l'influenza gravitazionale potesse propagarsi istantaneamente attraverso il vuoto, senza alcun ritardo temporale. Il cuore del presente capitolo risiede nella rivoluzione operata da Faraday e

¹⁰ John Ogborn, "Scienze e senso comune"

Maxwell, i quali hanno "riempito" lo spazio vuoto newtoniano, trasformandolo in un'entità fisica dinamica. L'introduzione del concetto di campo elettromagnetico e la scoperta della velocità della luce segneranno il definitivo tramonto della meccanica classica pura: l'informazione fisica richiede tempo per viaggiare, e lo spazio stesso ne diventa il mediatore plastico. In questa prospettiva, verranno esplorate anche le potenzialità degli esperimenti virtuali, strumenti didattici d'elezione per rendere fenomenologicamente accessibili le linee di forza e le configurazioni spaziali dei campi, che risulterebbero altrimenti astratte. Il capitolo troverà la sua sintesi nella visione unificata di Einstein, nella quale il concetto di campo raggiungerà il suo apice espressivo: la gravità non è più una forza che attraversa lo spazio, ma è la geometria stessa dello spazio-tempo che si flette, propagandosi attraverso quelle onde gravitazionali che rappresentano l'ultimo, grandioso paragrafo di questa evoluzione concettuale. Di fatto, questo percorso teorico intende fornire le basi per una trasposizione didattica consapevole, capace di trasmettere l'idea di fondo secondo la quale il pensiero scientifico considera le ovvietà allo stesso modo del senso comune, dove le cose fanno quello che fanno per quello che sono, ma cercando di andare oltre le cose come sembrano al fine di spiegare i fenomeni e comprendere il comportamento delle entità.

2.1 La Forza come interazione

In continuità con la tendenza del modo di pensare umano di attribuire un nesso concausale, un perché, a tutto ciò che avviene, il concetto di forza rappresenta uno dei nodi più complessi nel passaggio dalla conoscenza comune alla conoscenza scientifica, poiché richiede di superare un'interpretazione della realtà basata spesso su evidenze percettive da cui le forze sono comunemente considerate come le cause che determinano un certo numero di fenomeni. Di fatti, non di rado, nel linguaggio comune la Forza viene concepita come un attributo intrinseco agli oggetti o alle persone, che *“hanno forza”* o che *“fanno forza”*, rendendo così il corpo umano il prototipo di una sorgente di forza, perché esercita continuamente forze per spingere, tirare, rompere, sollevare... insomma

per svolgere tutte le azioni della vita quotidiana. Questa visione antropomorfica tende, però, a ridurre la Forza ad una proprietà posseduta da chi agisce, separando nettamente un "agente" attivo da un "paziente" che subisce passivamente l'azione; visione profondamente radicata anche nel modo di pensare dei bambini, secondo i quali *“vince il più forte”*, *“sono pari i due che non si muovono”* o *“perde il meno forte”*: interpretazioni tipiche e molto diffuse, ma non del tutto corrette dal punto di vista della fisica. E questo avviene perché i nostri modelli interpretativi della realtà non considerano sufficientemente distinti i concetti di Forza ed Energia, rafforzandosi ancor di più nella constatazione del fatto che a livello percettivo queste due sono difficilmente distinguibili dato che comunemente si afferma: *“più energia corrisponde a più forza”*. La differenza è, però, ben definita sul piano formale: volendo assumere il nostro corpo come il prototipo di una sorgente di forza, bisognerebbe riflettere sul fatto che il corpo umano sia un sistema che per “fare forza” deve consumare energia, accumulata e rinnovata attraverso l'alimentazione. Risulta chiara, dunque, la necessità di integrare i comuni modelli interpretativi, introducendo l'idea che la forza non sia una proprietà della materia, bensì la misura di un'interazione tra sistemi: in questa prospettiva, la forza cessa di essere un'entità isolata per diventare il segnale di una relazione reciproca. Quando due corpi interagiscono, l'azione è sempre bi-direzionale, reciproca; non esiste una forza che agisca in un solo senso senza che vi sia una risposta uguale e contraria. Se vogliamo deformare un qualunque oggetto dobbiamo esercitare una forza, dunque trasferirgli energia, durante tutto il processo di deformazione; in quanto l'oggetto che stiamo deformando esercita contro di noi forze uguali e contrarie istante per istante: tra noi e questo sistema c'è un flusso di energia istante per istante. Ciò avviene perché la nostra azione deformante provoca una rottura nell'equilibrio dell'oggetto, garantito dall'equilibrio tra le forze interne dello stesso, causata appunto dalle azioni di forza esercitate dall'esterno, da cui derivano azioni di forza uguali e contrarie (reazioni) dal sistema sull'esterno. Ci sono, però, delle differenze riguardo diversi aspetti tra le variazioni di forma di sistemi diversi: l'intensità delle forze di reazione che si manifestano durante l'interazione dipende dall'entità delle deformazioni esterne a cui è sottoposto il

sistema e dall'oggetto considerato come sistema-sorgente di forze. Un'interazione che deforma tale sistema provoca, durante la deformazione, una reazione: il sistema che si sta deformando diviene così una sorgente di forze, che a sua volta agisce sui sistemi deformanti. Così lo stato indeformato di una molla, ad esempio, corrisponde alla sua forma, ma questa può essere allungata o compressa all'azione di una persona che la tiene tra le mani, ad esempio, e quindi essere deformata; ma chi sta tirando o comprimendo la molla sente che nelle mani si esercitano forze perché la molla è diventata a sua volta una sorgente di forze che reagisce su di lui. Inoltre, la molla che viene tesa o compressa tende rispettivamente a tirare o spingere le mani alle due estremità con la stessa intensità, in effetti: un sistema-sorgente esercita azioni di forza sull'esterno in almeno due zone di interazione, che sono uguali e contrarie a quelle ricevute dal sistema esterno. A ciò si aggiunge che, per deformare un sistema è necessario fornirgli energia: durante tutta la deformazione c'è un flusso di energia dal sistema deformante al sistema deformato che dipende dall'entità della deformazione totale (lo sforzo da impiegare, ovvero l'energia da spendere, dipende dal tipo di deformazione o spostamento che voglio ottenere). Ci sono, però, alcuni sistemi in cui è necessario continuare a spendere energia anche per mantenere la deformazione, altri in cui non lo è: in particolare, è necessario trasferire energia a una molla per deformarla, ma non per mantenerla deformata; al contrario è necessario un flusso di energia continua per mantenere, ad esempio, la deformazione (dallo stato di quiete) di un'automobile, affinché essa possa muoversi ad una determinata velocità. Per di più è possibile che, cessata l'interazione con il sistema deformante, un sistema deformato ritorni al suo stato indeformato iniziale, o meno: una molla deformata torna alla sua forma naturale se viene lasciata improvvisamente dalle mani che la stavano tirando o schiacciando; al contrario un pezzo di creta che viene modellato, conserva la sua forma dopo essere stato lasciato, senza tornare al suo stato indeformato, perché ha raggiunto una nuova configurazione di equilibrio. Per far sì che un sistema torni al suo stato indeformato a seguito dell'interazione con il sistema

deformante, è necessario che l'energia immagazzinata durante la deformazione o venga trasferita ad altri sistemi (ambiente per es.), o venga conservata in altra forma nel sistema stesso. Ciò avviene perché l'insieme dei sistemi che interagiscono costituisce sempre una catena chiusa ed ognuno di essi si deforma a proprio modo nel corso dell'interazione: essi sono contemporaneamente deformati dal sistema antagonista e lo deformano; sono rispettivamente, l'uno per l'altro, sistemi-sorgente di forza e oggetti che subiscono azioni di forza. Importante, a questo punto, sottolineare che lo stato indeformato di un sistema è sempre determinato, come accennato in precedenza, dall'esistenza di forze interne al sistema, che agiscono sulle sue parti (fino al livello atomico) e che sono almeno di due tipi diversi; tendenti così, a generare comportamenti opposti al fine di controbilanciarsi esattamente, in assenza di azioni esterne. Quando queste forze interne vengono squilibrate dalle interazioni con altri sistemi, la risultante macroscopica si rileva in forze di reazione del sistema deformato nei confronti del sistema deformante: così quando una molla viene allungata, le forze attrattive interne microscopiche prendono il sopravvento sulle forze repulsive generando forze di richiamo della molla, che tendono a ripristinare il suo stato indeformato opponendosi alla sollecitazione esterna. Dunque, possiamo considerare che un qualsiasi oggetto, che subisce cambiamenti di forma o di dimensione a causa di una forza esterna esercitata da un qualunque sistema, che lo rendono capace di esercitare azioni di forza sul sistema antagonista, diventa a sua volta un sistema-sorgente di forze. Questo avviene con una molla deformata, un essere umano; ma ci sono deformazioni che seguono le regole individuate per la molla, si pensi ad un arco per scoccare una freccia, dette deformazioni elastiche, in cui *“più si carica, più si fa forza”*; e deformazioni che non seguono queste regole, le quali caratterizzano, invece, i corpi plastici. Un esempio di corpo plastico è la creta che viene modellata: qui le forze di reazione della creta dipendono solo dalla variazione istantanea di forma, cioè da come sta cambiando la forma nel momento stesso in cui si esercita la forza sulla creta, non dalla deformazione totale che si è raggiunta in quell'istante rispetto al momento di partenza. E questo accade perché per la creta, a differenza di quanto avviene nelle molle, è possibile raggiungere un equilibrio delle forze interne in ogni

forma: essa *“mentre si deforma, fa forza”*, ma non si carica dell’energia che le viene trasferita e che non possiamo in nessun modo recuperare. Qui si dice che c’è dissipazione dell’Energia (in questo caso E. meccanica, trasferita con la manipolazione), la quale viene trasformata in altre forme non riutilizzabili (energia termica ad esempio). Esistono, poi, oggetti che non cambiano forma quando sono sottoposti anche a grandi sollecitazioni: un tavolo, un muro, non si deformano, né si caricano apprezzabilmente di energia quando vengono sottoposti all’azione di forze esterne; seppur reagendo con forze uguali e contrarie alle sollecitazioni esterne. Essi vengono definiti corpi rigidi. Dunque, il comportamento di un generico sistema materiale deformato da forze esterne è generalmente dato dalla sovrapposizione di queste tre schematizzazioni ideali sopra illustrate (Elastico, Plastico, Rigido); così come le sue forze di reazione che insorgono nell’interazione possono essere simultaneamente in parte elastiche, plastiche e rigide. Lo studio delle forze come interazioni, come già accennato, può assumere anche come sistema-sorgente di forze il corpo umano che varia la sua forma: tutte le azioni che il nostro corpo riesce a compiere vengono effettuate grazie a cambiamenti di forma del corpo, schematizzabili come sovrapposizioni di contrazioni, dilatazioni... esse richiedono sempre la presenza di un “sistema antagonista” contro il quale poter esercitare una forza. La deformazione del corpo umano, che gli consente di esercitare una forza, comporta un consumo di energia: *“più forza fa, più energia consuma”*. Di fatti, è presente anche nel pensiero comune la differenza di funzionamento tra sistemi come le molle e i magneti, e sistemi come l’uomo, i motori, gli animali: nel primo caso parliamo di sistemi “passivi”, nel secondo parliamo di sistemi che funzionano solo grazie ad un continuo consumo di energia, detti “attivi”. Questi ultimi hanno in sé stessi modalità di controllo del consumo di energia e della forza esercitata e quindi decidono autonomamente, di fronte ad un sistema antagonista, il verso di trasferimento di energia. Tale modello deformazione-forza-scambio di energia è utilizzabile anche per spiegare le interazioni di tipo gravitazionale. Consideriamo la situazione in cui vogliamo allontanare un oggetto di una certa massa dalla superficie terrestre: dobbiamo fare forza contro il peso dell’oggetto e spendere un’energia legata sia all’intensità della forza che

facciamo (peso dell'oggetto), sia all'altezza a cui lo vogliamo trasportare. In questa situazione descritta, molto comune, possiamo considerare, per la forza peso:

come riferimento globale, il sistema formato dalla Terra e dall'oggetto che si considera;

come stato indeformato la situazione in cui l'oggetto è poggiato sulla superficie terrestre.

Il peso dell'oggetto (l'attrazione che la Terra esercita su di esso), diventa, da questo punto di vista, una forza interna al sistema Terra-oggetto, così come sono forze interne del sistema: la forza (uguale e contraria) con cui l'oggetto attrae la Terra e le forze di coesione interne dei due corpi, responsabili rispettivamente, della forma rigida della Terra e dell'oggetto. Quando l'oggetto è poggiato sulla superficie terrestre, tutte queste forze costituiscono un sistema in equilibrio. Deformare il sistema gravitazionale significa, dunque, allontanare fra loro la Terra e l'oggetto: sollevare qualcosa può essere visto come analogo a deformare un oggetto, in cui vi è sempre un sistema materiale che sorregge l'oggetto (si pensi ad una nave nel mare o ad un uccello nel cielo) che rappresenta il "sistema antagonista" e rende visibile il mantenersi della deformazione (mare, aria). Esso è a sua volta deformato dal sistema Terra-oggetto, il quale esplica forze sul sistema antagonista nei due punti di contatto con l'oggetto e con la Terra, e viceversa (alla parte della nave immersa in acqua corrisponde un egual volume di acqua che è stato sollevato, quindi allontanato dal fondo marino; così come avviene per l'aria spostata dall'uccello per il volo): le due forze che ognuno dei sistemi esercita sull'altro sono tra loro uguali e contrarie. L'insieme di ognuno degli oggetti sollevati e della Terra costituisce un sistema gravitazionale deformato. Tra l'altro anche qui i sistemi interagenti costituiscono una catena chiusa, anche se fra la Terra e l'oggetto non c'è contatto: qui la chiusura è garantita dall'esistenza di un campo di forze, in questo caso del campo di gravità. Inoltre, è da considerare che, per mantenere lo stato deformato, cioè l'oggetto sollevato da Terra, è necessario continuare a fare forza su di esso e sulla Terra,

ma non è necessario continuare a trasferire energia al sistema, come abbiamo visto per la molla. Ne deriva che se “smettiamo di fare forza”, per esempio abbandonando l’oggetto dopo averlo sollevato, esso cade e, in assenza di ostacoli, finisce di nuovo sulla superficie terrestre (mentre questo cade, anche la Terra si muove verso l’oggetto, ma poiché la sua massa è enormemente più grande, la sua velocità è enormemente più piccola rispetto a quella dell’oggetto in caduta: praticamente la Terra sta ferma ed è l’oggetto che vi si precipita sopra). In definitiva, possiamo dire che il sistema Terra-oggetto ritorna allo stato indeformato di partenza comportandosi analogamente ad una molla (e diversamente dalla creta), e ciò è riconducibile alla schematizzazione di un comportamento elastico. L’energia che ogni sistema-Terra possiede in virtù della sua configurazione spaziale è chiamata Energia Potenziale Gravitazionale del sistema: quando cambia la configurazione del sistema, nel momento in cui, applicando una forza o cedendo energia allontaniamo un oggetto qualsiasi dalla Terra, aumenta l’energia potenziale del sistema, a spese energetiche del sistema deformante.

Essendoci addentrati in tal misura nella trattazione della forza come la misura di un’interazione tra sistemi, risulta necessario soffermarsi su un altro aspetto importante: la necessità di considerare la direzione e il verso nei quali essa agisce, oltre che la sua intensità. Fa parte dell’idea comune sapere che per un ciclista avere il vento in direzione e verso concordi o discordi a quelli del suo movimento, faccia una bella differenza. Questa caratteristica peculiare delle forze, che sono grandezze fisiche descrivibili senza ambiguità specificandone oltre che la grandezza, anche la direzione e il verso, le rende grandezze vettoriali. Quando, ad esempio, vogliamo spostare un blocco sul pavimento, la forza che si deve esercitare è diversa a seconda della direzione nella quale si tira il blocco, perché è come se il cambiamento di direzione *“dividesse la forza in due parti”* (come dicono i bambini): una per far muovere il blocco, l’altra che lo schiaccia o solleva ancora di più sulla/dalla superficie d’appoggio, a seconda dei casi (per aumentare o diminuire lo schiacciamento dovuto all’interazione gravitazionale blocco-Terra). Possiamo dunque considerare un’unica forza avente una direzione definita, come quella forza equivalente alla sovrapposizione di altre

forze, aventi direzioni diverse (dette forze componenti) che agiscono su un sistema: la forza complessiva deve poter essere rappresentata con un segmento che viene ad essere la diagonale di un parallelogramma i cui lati sono i segmenti rappresentativi delle due forze componenti. Quando abbiamo l'azione di più forze contemporaneamente su un oggetto, parliamo di forza risultante come la somma vettoriale di tutte le forze componenti, che equivale all'azione di una sola forza. Ritornando all'esempio del blocco sul pavimento, esso si muoverà quando la forza risultante sarà tale da rompere l'equilibrio statico dato dall'equilibrio tra le forze; quando, quindi la direzione della forza esercitata non verrà più equilibrata in direzione e verso opposto da un'altra forza (Peso, se ci riferiamo al sistema gravitazionale; Statica, se ci riferiamo al sistema di attrito; Reazione Vincolare, se ci riferiamo al sistema pavimento).

Arrivati a questo punto, possiamo constatare come il concetto di "Forza", inizialmente basato su percezioni fisiologiche, divenga in fisica una costruzione mentale volta a descrivere in modo unificante un aspetto particolare di tutta una classe di fenomeni di interazioni tra sistemi materiali. "*Fare forza*" è un modo del tutto umano di schematizzare le relazioni tra fatti che sussistono ogni volta che due o più sistemi entrano in un'interazione che provoca una deformazione reciproca rispetto ad uno stato indeformato: fissati i sistemi interagenti, si ha una corrispondenza biunivoca fra le deformazioni reciproche di ogni coppia di essi. L'aspetto di queste interazioni di cui il concetto di forza dà ragione è la relazione che esiste, ad ogni istante, tra le deformazioni in atto dei vari sistemi interagenti; pertanto, si dice che la forza è una grandezza "differenziale". Sottolineare questo aspetto è necessario per porre un ulteriore accento sulla distinzione tra Forza ed Energia, spesso sottovalutata nel linguaggio comune. Mentre la forza ci permette di descrivere l'interazione nel "qui ed ora", focalizzandosi sugli effetti istantanei come la deformazione o la variazione dello stato di moto, l'energia ci offre una visione d'insieme sugli scambi e sulle trasformazioni che avvengono tra i sistemi coinvolti. Infatti, a differenza della forza, che è una grandezza che si riferisce ad un certo istante, l'energia, che viene trasferita durante un certo intervallo di tempo, è una grandezza "integrale": se consideriamo le deformazioni totali che i vari sistemi interagenti hanno subito dall'istante d'inizio dell'interazione,

all'istante in cui essa è terminata (o a qualunque istante intermedio), si ha che l'entità di queste deformazioni dipende dall'entità del trasferimento di energia fra i vari sistemi interagenti, avvenuto durante tutto il periodo di tempo considerato. Comprendere questa reciprocità significa scardinare l'illusione motoria del bambino e riconoscere che ogni evento fisico è il risultato di un incontro tra entità che si influenzano vicendevolmente. Questo mutamento di paradigma prepara il terreno per affrontare le sfide teoriche successive, in particolare per superare la difficoltà di accettare che l'interazione possa sussistere anche in assenza di un contatto macroscopico visibile, aprendo la strada alla complessa evoluzione che porterà dal modello newtoniano alla moderna concezione di campo.

2.2 Forza istantanea a distanza: la gravitazione di Newton

Dopo aver chiarito nel paragrafo precedente come la forza non venga intesa in termini fisici come una proprietà intrinseca della materia, bensì come la misura di un'interazione tra sistemi, è necessario ora indagare le modalità fenomenologiche attraverso le quali tale relazione si manifesta. Nella Fisica Classica la distinzione fondamentale risiede nella dicotomia tra interazioni che avvengono per contatto e interazioni a distanza. Questa classificazione rappresenta il primo passo verso la comprensione di come l'interazione si manifesti nello spazio e di come il concetto di "vuoto" sia stato progressivamente messo in discussione dalla scienza moderna. Le interazioni a contatto sono quelle che più facilmente si allineano con l'intuizione sensoriale, poiché richiedono una contiguità spaziale tra le superfici dei corpi coinvolti, ovvero necessitano di un mezzo per avvenire: a livello microscopico, in tutte le interazioni a contatto, è necessario un contatto tra gli atomi dei due corpi del sistema interagente. In questo ambito, la forza si manifesta macroscopicamente attraverso l'evidenza immediata dell'urto, della spinta o della trazione, dove l'effetto dinamico o deformante appare come una conseguenza diretta del toccarsi. Caratteristica di queste interazioni è la localizzazione spaziale: l'azione nasce e si esaurisce nel punto di tangenza, rendendo il legame di causa-effetto

visivamente ed empiricamente trasparente. Ci stiamo riferendo, quindi, al mondo delle forze d'attrito, delle reazioni vincolari e delle deformazioni elastiche, dove un sistema materiale sembra “rispondere immediatamente” alla sollecitazione di un altro sistema materiale con cui interagisce entrando in contatto e di cui ne risente l'azione deformante. Ma l'azione a contatto si caratterizza per la sua propagazione ad una velocità finita (che vedremo essere la velocità del suono) ovvero il tempo necessario a trasmettere la perturbazione atomica (provocata dalla compressione o dallo spostamento da contatto) dalla porzione di materia su cui la Forza è stata esercitata, fino a tutti gli altri strati dell'oggetto materiale, attraverso “spinte” molecolari, mediante le quali tutte le estremità di quel sistema risentano dell'interazione avvenuta (come se idealmente ci fosse un'elasticità che provoca un “ritardo”). A ciò si aggiunge la caratterizzazione dell'azione a contatto come quell'azione che non si manifesta necessariamente lungo la congiungente dei centri dei due corpi coinvolti: in queste interazioni, la direzione della forza dipende dalla geometria delle superfici, dalla natura dei materiali e dal movimento relativo. Ne deriva che è fondamentale considerare la struttura dello spazio che c'è tra i corpi interagenti e anche il loro orientamento, per avere una corretta misura della forza caratteristica dell'interazione.

D'altra parte, le interazioni a distanza pongono una sfida cognitiva molto più profonda, poiché presuppongono che due sistemi possano interagire pur essendo separati da uno spazio apparentemente vuoto; dunque, anche se tra essi non avviene un contatto, non vi è un mezzo visibile interposto. L'esempio paradigmatico è fornito dalla gravità, così come dai fenomeni magnetici ed elettrici, dove l'attrazione o la repulsione avvengono senza che vi sia alcun mezzo materiale visibile tra i corpi. Ciò è spiegato dalla velocità istantanea che caratterizza le interazioni a distanza: la forza sembra "saltare" simultaneamente da un punto all'altro del corpo e non ha bisogno di un tempo per viaggiare; ciò significa considerare l'astrazione matematica per cui idealmente lo spazio intermedio non partecipa all'interazione, non ostacola né trasporta. Inoltre, a differenza delle interazioni a contatto, qui parliamo di un'azione che si manifesta sempre lungo la congiungente dei corpi interagenti: la direzione della Forza, dunque, è sempre centrale.

Tale distinzione, tuttavia, porta con sé un paradosso epistemologico che ha attraversato i secoli. Accettare l'interazione a distanza significa infatti interrogarsi su cosa accada nello spazio che separa i corpi: se per il senso comune il vuoto è un nulla inerte, per la fisica esso deve in qualche modo farsi portatore di qualcosa, di un'influenza. La discrepanza concettuale tra un'interazione a contatto a velocità finita e una distanza istantanea, è ciò che storicamente ha spinto gli scienziati a cercare una visione unificata, al fine di capire se le forze a distanza siano realmente tali o se, ad un livello microscopico, lo spazio stesso non agisca come un mediatore plastico, rendendo ognuna di queste interazioni, in ultima analisi, una forma di "contatto" con una struttura invisibile, ma presente. Esplorare queste differenze permette dunque di analizzare criticamente il modello newtoniano, evidenziando come la ricerca di un meccanismo che spieghi l'azione a distanza sia stata la vera forza motrice verso la scoperta del concetto di campo.

La formulazione della Legge di Gravitazione Universale, presentata da Isaac Newton nei suoi *"Philosophiae Naturalis Principia Mathematica"* del 1687, rappresenta senza dubbio uno dei vertici del pensiero scientifico moderno, poiché sancisce per la prima volta l'unificazione delle leggi fisiche che governano l'intero cosmo. Prima di questo fondamentale contributo, la cultura filosofica e scientifica occidentale era dominata dalla distinzione aristotelica tra il mondo terrestre, corruttibile e imperfetto, e il mondo celeste, retto da dinamiche eterne e circolari. In questo contesto, la distinzione fenomenologica tra interazioni a contatto e interazioni distanza non rappresenta solo una classificazione fisica, ma costituisce il terreno di scontro intellettuale su cui Isaac Newton costruì l'intera architettura della Meccanica Moderna. Per comprendere appieno la portata della sua rivoluzione, è necessario osservare come egli inizialmente, influenzato dalla filosofia cartesiana, cercasse di ricondurre ogni fenomeno studiato, anche quello della gravità, al paradigma del contatto che allora era considerato l'unico scientificamente accettabile. La fisica cartesiana, infatti, spiegava il moto dei pianeti attraverso l'azione a contatto, meccanica, di giganteschi "vortici" di materia sottile. Al contempo, Newton si era reso conto della dilemmatica necessità di conciliare l'evidenza astronomica della gravità

con la contingenza di un mediatore fisico; pertanto, ricorse a lungo all'ipotesi della presenza di una forma di "etere" che riempiva lo spazio (1675). L'etere sarebbe stato assai più denso nello spazio "vuoto" che non all'interno di corpi, o in prossimità degli stessi; come conseguenza di ciò, esso avrebbe avuto la tendenza a spostarsi dalle zone di più alta densità a quelle di minor densità, come fa un gas libero di espandersi trascinando con sé ogni particella materiale: i corpi sarebbero stati quindi sollecitati a passare dalle parti dove il mezzo eterico era più denso, ossia lontano da altri corpi, a quelle dove era più rarefatto, ossia vicino ad altri corpi. Così, un corpo sospeso sopra la Terra sarebbe caduto verso il basso perché l'etere era ritenuto tanto meno denso quanto più ci si avvicinava al pianeta (e ciò spiegava la gravitazione come effetto di "pressione" dell'etere gravitazionale). All'osservatore, ciò sarebbe apparso come un effetto risultante da una forza attrattiva della massa terrestre nei confronti di quella del corpo. Newton aveva inizialmente accettato il modello meccanicistico dell'etere consapevole della riluttanza scientifica manifestata nei confronti della sua idea di "vuoto" che può trasmettere una forza, ma successivamente si convinse che anche la presenza di tale sostanza eterica era una mera fantasia, in quanto essa non avrebbe potuto agire sulla materia senza produrre effetto alcuno sui nostri sensi. Newton superò i limiti del meccanicismo tradizionale e comprese che l'interazione che governa la caduta degli oggetti sulla Terra e quella che mantiene la Luna e i corpi celesti sulle loro orbite, rispondevano a un unico principio universale. *«La stessa forza che, nel cielo stellato, tiene la nostra dolce amica Luna, / e che decresce con 'r' al quadrato/ pur sulla mela agisce. È una fortuna»*. Nei versi di questa filastrocca inglese, riprendendo il celebre aneddoto della mela, è riassunta in forma poetica la Legge di Gravitazione Universale formulata da Newton¹¹.

Questa riconduzione dei fenomeni terrestri e celesti ad un unico principio, lo costrinse a scontrarsi con il paradosso dell'azione a distanza, portandolo a formulare una legge che, pur non spiegando ancora il "come" l'attrazione si

¹¹ [https://www.treccani.it/enciclopedia/gravitazione_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/gravitazione_(Enciclopedia-dei-ragazzi)/)

propagasse, ne definiva con precisione matematica il "*quanto*". Newton, infatti, combinò l'argomento iniziale con la terza legge di Kepler attraverso l'analisi matematica, concludendo che, supposta l'orbita circolare, gli sforzi (*conatus*) di allontanamento dei pianeti dal Sole vanno come l'inverso dei quadrati delle loro distanze da esso¹².

Con il suo trattato "*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*" (1687), dopo aver "dimostrato" le leggi di Kepler sulla base dei principi della dinamica da lui formulati, Newton sviluppa le teorie del moto della Luna e delle maree, il problema dei tre corpi, e condusse i calcoli relativi alle traiettorie delle comete¹³. Ed è proprio basandosi sui teoremi ricavabili dai principi della dinamica e dai fenomeni osservabili, che Newton presentò (nella III edizione del trattato, 1720) la formulazione matematica della Legge di Gravitazione Universale, secondo la quale due corpi si attraggono con una forza proporzionale alle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra essi. La legge di Newton mette in relazione la Forza di Gravità (F), le masse dei corpi (m_1 e m_2) e la loro distanza (r), a costante universale indicata con G . La sua formula è:

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2} \quad 14$$

Dal punto di vista concettuale, questa formula descrive una Forza che è:

- Universale: agisce su ogni particella dotata di massa nell'universo;
- Attrattiva: tende sempre ad avvicinare i corpi;

¹² [https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_\(Storia-della-Scienza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_(Storia-della-Scienza)/)

¹³ [https://www.treccani.it/enciclopedia/philosophiae-naturalis-principia-mathematica_\(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche\)/#google_vignette](https://www.treccani.it/enciclopedia/philosophiae-naturalis-principia-mathematica_(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche)/#google_vignette)

¹⁴ [https://www.treccani.it/enciclopedia/gravitazione_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/gravitazione_(Enciclopedia-dei-ragazzi)/)

- A lungo raggio: non si annulla mai completamente, anche a distanze enormi (tende a zero solo all'infinito).

Ne deriva che dimezzare la distanza significa quadruplicare la Forza. Pertanto, poiché presso la superficie della Terra la gravità acceleratrice (Forza acceleratrice gravitazionale) è la medesima per tutti i corpi, essi subiranno un'accelerazione uguale e dunque la gravità motrice (forza motrice gravitazionale) o peso (P) sarà direttamente proporzionale alla massa del corpo. Se infatti P è la gravità motrice e g la gravità acceleratrice, ossia l'accelerazione di gravità, allora dalla relazione risulterà la proporzionalità diretta tra peso e massa:

$$P=g \times m.$$

Diminuendo l'azione della gravità acceleratrice con la distanza, decresce l'accelerazione g , resta costante la massa m , e il peso P diminuisce in ugual misura della gravità acceleratrice, risultando come il prodotto dell'accelerazione di gravità per la massa. Per cui: *“Presso la superficie della Terra, dove la gravità acceleratrice o forza gravitazionale è la medesima in tutti i corpi, la gravità motrice o peso è in proporzione al corpo: ma se si salisse in regioni dove la gravità acceleratrice è minore, il peso diminuirebbe in ugual misura, e sarebbe sempre come il prodotto del corpo e della gravità acceleratrice¹⁵”*.

La legge di gravitazione universale, dopo che Newton ha dimostrato che la forza centripeta tra la Luna e la Terra è quella stessa forza che chiamiamo "gravità" (*Principia*, III, prop. 4, teorema IV), segue al riconoscimento che le forze centripete nei moti orbitali dei satelliti e dei pianeti sono proporzionali alle masse. Infatti, tali forze accelerano ugualmente corpi ineguali, i quali descriverebbero, nella discesa verso il centro da uguali distanze, spazi uguali in tempi uguali. La teoria gravitazionale è inoltre utilizzata per la spiegazione delle maree e per la previsione dei moti lunari. Il Libro III contiene anche la

¹⁵ [https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_\(Storia-della-Scienza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_(Storia-della-Scienza)/)

spiegazione dell'appiattimento della Terra ai poli, per effetto della sua rotazione, e quella della precessione degli equinozi¹⁶.

Nella fisica classica newtoniana, dunque, la gravità è interpretata come una Forza conservativa di attrazione a distanza agente fra corpi dotati di massa e la sua manifestazione più evidente nell'esperienza quotidiana è la Forza Peso. Attraverso l'espressione matematica, la gravità smette di essere un fenomeno locale e isolato per divenire una proprietà intrinseca e universale della materia stessa. Ma Peso e Massa di un corpo non sono affatto sinonimi: l'uno varia da un luogo all'altro del nostro pianeta, mentre l'altra è una proprietà intrinseca dei corpi. La forza peso si ottiene moltiplicando la massa (inerziale) del corpo per l'accelerazione di gravità, che sulla Terra vale circa $9,8 \text{ m/s}^2$. Il valore di g cambia con la latitudine, non essendo il nostro pianeta una sfera perfetta; quindi, per diventare un po' più leggeri (ma non per dimagrire!) si può andare all'Equatore, dove l'attrazione gravitazionale è minore. La differenza, tuttavia, è piuttosto piccola: molto più evidente, è la variazione di g spostandosi dalla Terra alla Luna. Qui gli astronauti riescono a muoversi con agilità, nonostante abbiano sempre la stessa Massa e per giunta indossino anche pesanti tute spaziali, perché l'accelerazione di gravità (e quindi anche la Forza) è solo $1/6$ di quella terrestre, avendo la Luna una massa circa cento volte inferiore rispetto a quella della Terra¹⁷.

Le teorie newtoniane si imposero rapidamente come le più esatte da un punto di vista matematico, pur ricevendo critiche dai seguaci di Descartes e da Leibniz per il ricorso all'azione a distanza, incompatibile con una visione puramente meccanicista del cosmo. L'idea che i corpi celesti potessero influenzare il mondo terrestre (in particolare, che la Luna fosse la causa delle maree) fu osteggiata infatti per le sue reminiscenze astrologiche, sembrando attribuire poteri divini ai pianeti: *“L'astrologia pur abbandonando il politeismo, aveva continuato non*

¹⁶ [https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_\(Storia-della-Scienza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_(Storia-della-Scienza)/)

¹⁷ [https://www.treccani.it/enciclopedia/gravitazione_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/gravitazione_(Enciclopedia-dei-ragazzi)/)

soltanto ad attribuire un significato magico ai vecchi nomi divini, ma anche poteri tipicamente divini ai pianeti, poteri che essa trattava come "influssi" calcolabili. Non ci si deve stupire del fatto che essa veniva rifiutata dagli aristotelici e da altri razionalisti. Essi però la rifiutarono per i motivi in parte sbagliati e andarono troppo oltre nel loro rifiuto. [...] La teoria newtoniana della gravitazione universale mostrò non solo che la Luna poteva influenzare il "mondo sublunare" ma, oltre a ciò, che alcuni corpi celesti super lunari esercitavano un influsso, un'attrazione gravitazionale, sulla Terra, e quindi sugli eventi sublunari, in contraddizione con la teoria aristotelica. Perciò Newton accettò, consapevolmente anche se con riluttanza, una dottrina che era stata rifiutata da alcuni dei migliori cervelli, Galileo incluso¹⁸."

Di fatti, dietro l'eleganza formale del suo modello matematico, si celava un paradosso concettuale che scuoteva le fondamenta stesse del pensiero scientifico dell'epoca: l'idea che due corpi potessero influenzarsi reciprocamente attraverso il vuoto assoluto, senza alcun mezzo materiale a mediare l'interazione. Tale attrazione era concepita da Newton come un'azione a distanza che non richiede alcun mezzo, pertanto, appare chiaro che il limite di questo modello risiedeva nella sua incapacità di spiegare *come* l'interazione viaggiasse nello spazio. Di fatto, nonostante avesse formulato la Legge matematica della Gravitazione Universale, Newton ammetteva di non conoscerne la *causa fisica*, da cui "*Hypotheses non fingo*" (in italiano: *non invento ipotesi*), la celeberrima espressione contenuta nella seconda edizione dei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, pubblicata nel 1713, precisamente nella sezione finale intitolata *Scolio Generale*: "*[...] In verità non sono ancora riuscito a dedurre dai fenomeni la ragione di queste proprietà della gravità, e non invento ipotesi. Qualunque cosa, infatti, non deducibile dai fenomeni va chiamata ipotesi, e nella filosofia sperimentale non trovano posto le ipotesi sia metafisiche, sia*

¹⁸K. Popper, *Poscritto alla Logica della Scoperta Scientifica* [1983] Trad. it. di M. Benzi, pp. 216-7, Il Saggiatore, 2009.

fisiche, sia delle qualità occulte, sia meccaniche. [...]¹⁹". Con questa frase I. Newton esprime l'impossibilità a definire le cause della forza di gravità, nelle sue ricerche sulla legge gravitazionale, che lo porteranno inizialmente a limitarsi a descriverne gli effetti dinamici, escludendo qualsiasi interpretazione ipotetica metafisica o strettamente meccanicistica²⁰.

N. afferma: *"La "filosofia naturale" si basa sulla verifica empirica e sul linguaggio matematico. Essa non ha bisogno di ipotesi metafisiche."*²¹ E, continua: *"Come in matematica, così nella filosofia naturale lo studio delle cose difficili mediante il metodo analitico deve sempre precedere quello condotto con il metodo sintetico. Questa analisi consiste nel fare esperimenti ed osservazioni e trarre da questi, mediante l'induzione, conclusioni generali, non ammettendo contro di esse delle obiezioni, a meno che non siano derivate da esperimenti o da altre verità certe. Perché nella filosofia sperimentale non bisogna tener conto delle ipotesi. E sebbene il trarre per induzione dei principi generali dagli esperimenti e dalle osservazioni non equivalga a dimostrarli, tuttavia è questo il modo migliore di ragionare che la natura consenta, e può considerarsi tanto più saldo quanto più l'induzione sia generale. E se nessuna opposizione sorge dai fenomeni, si può pronunciare una conclusione universale. Ma se in seguito sorgerà dagli esperimenti qualcosa di contrario, allora si dovrà affermare una conclusione che si accordi con queste eccezioni. Mediante questa analisi possiamo procedere dalle cose composte alle cose semplici, dai movimenti alle forze che li producono e in genere dagli effetti alle loro cause, dalle cause particolari a quelle più generali, fino a giungere alle cause generalissime. Questo è il metodo analitico; quello sintetico consiste nell'assumere come principi le cause scoperte e provate e, mediante queste, spiegare i fenomeni che ne derivano e provare tali spiegazioni"*²².

¹⁹ Isaac Newton, *Opere*, a cura di Alberto Pala, vol. 1, *Principi matematici della filosofia naturale*, collana *Classici della scienza*, Torino, UTET, 1997 (pp. 801-802).

²⁰ Isaac Newton, *Opere*, a cura di Alberto Pala, vol. 1, *Principi matematici della filosofia naturale*, collana *Classici della scienza*, Torino, UTET, 1997 (pp. 801-802).

²¹ I. Newton, *Ottica*, Questione 31

²² I. Newton, *Antologia*, Paravia, Torino, 1963, pagg. 140-141

Dunque, pur avendo formulato la Legge che descriveva l'intensità di tale attrazione gravitazionale, Newton rimase a lungo profondamente tormentato dalla natura di questa Forza, sia per l'ostilità del tempo, che per la sua incertezza a riguardo. In una celebre lettera a Richard Bentley nel 1692, egli espresse chiaramente il suo disagio, definendo "assurda filosoficamente" l'idea che un corpo potesse agire su un altro a distanza senza la mediazione di qualcosa che trasmettesse l'azione (la gravità che agisce nel vuoto senza un mezzo fisico). Egli affermava: *«Che la gravità possa essere innata, inerente ed essenziale alla materia, cosicché un corpo possa agire su un altro a distanza e attraverso un vuoto, senza la mediazione di qualcosa grazie a cui e attraverso cui l'azione e la forza possano essere trasportate dall'uno all'altro, ebbene, tutto ciò è per me una assurdità così grande, che io non credo che un uomo, il quale abbia in materia filosofica una capacità di pensare in modo reale, possa mai cadere in essa. La gravità deve essere causata da un agente che agisca sempre secondo certe leggi, e ho lasciato alla considerazione dei miei lettori il problema se quell'agente è materiale o immateriale*²³. (Cohen, 1978)

Il punto critico risiedeva nella propagazione istantanea. Nel modello newtoniano, se il Sole fosse improvvisamente scomparso, la Terra avrebbe risentito immediatamente dell'assenza della sua attrazione, deviando dalla sua orbita nello stesso istante (ad oggi sappiamo che le perturbazioni nel campo gravitazionale si propagano alla velocità della luce, quindi se il Sole dovesse d'improvviso scoppiare, noi ce ne accorgeremmo dopo circa otto minuti).²⁴

²³ Brano riportato in italiano da (Bellone, 2006a, pp. 438-439)

²⁴ <https://www.saperescienza.it/rubriche/fisica-e-tecnologia/newton-l-etere-e-il-concetto-di-campo-20-9-2021/#:~:text=Una%20rappresentazione%2C%20questa%2C%20che%20non%20persuase%20Newton,se%20ciò%20implicava%20l'ostilità%20del%20mondo%20scientifico.>

Ma questa assenza di “ritardo temporale”, nel modello newtoniano, implicava che l'informazione gravitazionale viaggiasse a una velocità infinita, istantanea, un concetto che contrastava con l'intuizione di una realtà fisica governata da processi causali finiti. Per comprendere la portata di queste contraddizioni che a lungo hanno animato il dibattito scientifico, soprattutto per quanto concerne la questione della velocità, la ricerca didattica in Fisica utilizza spesso la modellizzazione richiamando l'analogia “del bastone rigido e della molla”. Se spingessimo l'estremità di un bastone idealmente "infinitamente rigido" (o perfettamente rigido, cosa che nella fisica reale non esiste), l'altra estremità si muoverebbe nello stesso istante: l'azione, allora, sembrerà propagarsi senza tempo. Al contrario, se urtassimo o tirassimo una molla, osserveremmo l'informazione viaggiare come una perturbazione (un'onda di compressione o d'urto) che impiegherebbe un tempo finito per viaggiare da un capo all'altro, con valori vicini alla velocità del suono, a seconda del materiale di cui è fatta la molla. Newton, non disponendo del concetto di campo, fu costretto a immaginare la gravità come un legame invisibile tra i pianeti dotato di questa "rigidità infinita" come quella del bastone. Spiegare che la gravità, così come la luce, hanno una "velocità di viaggio" limitata, aiuta a far capire che l'Universo somiglia più a una rete elastica (la molla) che a una struttura di ferro indeformabile (il bastone). Tuttavia, l'accettazione di tale legge comportava una sfida epistemologica di enorme portata, che, come detto poc'anzi, lo stesso Newton avvertiva con profondo disagio. Sebbene la formula permettesse di calcolare con una precisione senza precedenti le orbite dei corpi celesti, essa lasciava del tutto irrisolto il problema del meccanismo di trasmissione della forza. Questa idea di una forza capace di "saltare" da un corpo all'altro senza un tempo di percorrenza e senza un mediatore fisico appariva a Newton come un'assurdità logica, tanto che egli stesso scelse di non avanzare ipotesi sulla natura profonda della gravità, limitandosi a descriverne gli effetti fenomenologici e quantitativi. In effetti, l'accettazione di una forza che "salta" da un corpo all'altro istantaneamente rappresentava una rinuncia alla comprensione dei meccanismi profondi della natura. Tale visione, lasciava però un vuoto teorico inaccettabile: lo spazio tra i corpi era considerato un contenitore

inerte, un palcoscenico immobile che non partecipava all'evento fisico, ma si limitava a ospitare la manifestazione di una forza "magica" e immediata. Questa concezione del vuoto come entità inerte che ospita interazioni istantanee resterà dominante per oltre due secoli, fungendo da base per il determinismo meccanicistico, ma lasciando aperta una ferita teorica che solo la fisica del Novecento saprà rimarginare. Newton, pur non potendo spiegare la natura del legame gravitazionale, ha fornito alla scienza il linguaggio per descrivere l'armonia del sistema solare, ponendo le basi per il superamento del senso comune e preparando il terreno alla rivoluzione successiva, quella in cui lo spazio vuoto cesserà di essere tale per diventare un campo dinamico e vibrante. Il tempo per introdurre tale concetto divenne maturo soltanto nell'Ottocento ad opera soprattutto di Michael Faraday e poi di James Maxwell, e consentì il superamento delle obiezioni sollevate contro l'azione a distanza. L'effetto del campo non è istantaneo, ma implica un tempo finito perché la perturbazione passi dalla sorgente al corpo influenzato. Sarà infatti con l'avvento dell'elettromagnetismo e successivamente della relatività che questo "bastone rigido" verrà spezzato: l'introduzione della velocità della luce come limite insuperabile per qualsiasi segnale fisico imporrà il definitivo abbandono dell'istantaneità, trasformando l'interazione a distanza da un evento magico a un processo dinamico, con "ritardo temporale", mediato da uno spazio, il campo.

2.3 Il campo, Faraday, Maxwell: la velocità della luce costante non infinita

Newton avrà un seguito nell'introduzione del concetto di "campo di forza" con Michael Faraday (1791-1867), il quale riuscì a dare una prima risposta convincente alle riflessioni scettiche di Newton. Faraday approdò alla Royal Institution di Londra nel 1813 dove nel 1833 divenne professore, sviluppando una maestria sperimentale che gli permise di spaziare con disinvoltura tra la chimica analitica e la fisica. Questa solida base pratica fu fondamentale quando, nel 1821, egli iniziò a indagare i fenomeni elettromagnetici e, con la sua

straordinaria intuizione visiva, iniziò a concepire lo spazio non come un vuoto geometrico, ma come una trama densa di "linee di forza". Egli formulò per primo l'idea di "campo di forza" come oggetto fisico reale in grado di riportare l'idea di azione a distanza newtoniana a quella di azione a contatto, mediata da una modificazione fisica dello spazio circostante: nella visione di Faraday, ogni carica elettrica o magnete crea attorno a sé una zona di influenza — il campo — che funge da vero e proprio "messaggero" dell'interazione. L'applicazione di questo concetto a qualunque altra forza a distanza consente di: determinare il valore del campo in ogni punto dello spazio e determinare il valore della forza esercitata dal campo su un corpo che si trovi in un punto dello spazio che abbia la stessa natura del campo, in modo che possa subirne l'azione. Ne deriva che l'azione di qualsiasi campo, ad esempio gravitazionale/elettrico/magnetico, possa essere subita solo da un corpo dotato di massa/di carica elettrica/di magnetismo, essendo soltanto la massa/la carica elettrica/il magnetismo in grado di subirla. Nonostante il suo vasto dominio di applicazione in Fisica, il concetto di "campo" può essere introdotto più intuitivamente considerando i fenomeni elettrici: esso si estrinseca nel fatto che una carica elettrica (più in generale una distribuzione di cariche elettriche), con la sua presenza, modifica lo stato "fisico" dello spazio circostante, in maniera tale che se un'altra carica elettrica viene posta in un suo punto, essa subisce una forza elettrica (forza di Coulomb) "da parte di tale spazio", che assume, così modificato, il nome di "campo elettrico". È importante notare che, secondo questa impostazione, la seconda carica subisce una forza elettrica non direttamente dalla prima carica da essa distante (in tal caso si rimarrebbe nella concezione delle azioni a distanza) ma dal campo elettrico da quella creato. In altri termini è il campo elettrico il "mediatore" o "messaggero" dell'azione elettrica che la prima carica esercita sulla seconda. Lo stesso spazio vuoto della meccanica newtoniana, concepito come puro contenitore della materia dotato soltanto di proprietà geometriche, nel quale si trasmettevano istantaneamente (quindi con velocità infinita) le azioni a distanza in linea retta fra i due corpi interagenti, veniva sostituito da Faraday con uno spazio non soltanto geometrico ma anche "fisico", dove la «materia è presente ovunque e non c'è spazio senza materia». Faraday criticava l'idea di uno spazio

vuoto ponendo in evidenza alcuni paradossi di uno spazio concepito soltanto come un continuo geometrico nel quale è immersa la materia in volumi finiti separati da spazi vuoti intermedi, affermando:

“Un corpo non conduttore doveva essere formato da particelle non conduttrici, e queste ultime dovevano essere immerse in uno spazio che necessariamente aveva la proprietà d’essere non conduttore: se lo spazio non godeva di tale proprietà, allora il corpo, macroscopicamente esaminato, non poteva essere non conduttore. Un corpo conduttore come il platino era invece formato particelle conduttrici, Ma come doveva essere lo spazio in questo secondo caso? Affinché il platino fosse effettivamente un conduttore, le sue particelle dovevano essere disposte in uno spazio conduttore: delle particelle conduttrici di platino dislocate in uno spazio non conduttore avrebbero formato infatti un corpo macroscopicamente non conduttore. (Bellone, 2006, p.102).

L’idea di campo di forza fu utilizzata da Michael Faraday, nel 1831, per spiegare il meccanismo dell’induzione elettromagnetica, che è un fenomeno di interazione tra fenomeni elettrici e magnetici, non solo come strumento concettuale, ma anche avente un’esistenza fisica reale. Osservando che una corrente veniva generata in un circuito solo durante la variazione nel tempo di un campo magnetico all'atto della chiusura e apertura di un circuito induttore, egli si scontrò con la natura transitoria del fenomeno. Dunque, per tentare di spiegare questo comportamento, inizialmente teorizzò uno "stato elettrotonico" della materia, una sorta di tensione interna dei conduttori che però rimaneva priva di una chiara evidenza fisica. La risoluzione di queste incongruenze teoriche giunse attraverso un'intuizione profondamente visiva: Faraday ricorse al concetto di "curve magnetiche", osservabili attraverso la limatura di ferro, e stabilì che l'induzione avveniva quando un conduttore "tagliava" tali curve, come analizzeremo di seguito nel dettaglio. Questo passaggio segnò il definitivo superamento dello stato elettrotonico in favore di una visione spaziale dell'interazione, trasformando semplici linee geometriche in quelle "linee di forza" che avrebbero costituito il nucleo concettuale del futuro campo fisico.

“[...] In his paper, when describing the experiment, he speaks of the metal cutting the magnetic curves, and in a note to his paper he says: «By magnetic curves I mean lines of magnetic forces which would be depicted by iron filings». This is the germ of those 'lines of force' which rose up in the mind of Faraday into 'physical' and almost tangible matter [...].”

Da quanto emerge su alcuni scritti dell'autore della biografia di Faraday *“The life and letters of Michael Faraday”* (Jones, 1870, vol. II, p. 5), ad opera del segretario della Royal Society dottor Bence Jones, alla mente di Faraday le linee di forza si palesarono fin dall'inizio (1831) in una forma fisica reale e tangibile (*“the germ of 'lines of force' rose up in the mind of Faraday into 'physical' and almost tangible matter”*) e non come semplice espediente per spiegare l'induzione elettromagnetica, come talvolta si legge.

Tuttavia, la realtà fisica delle linee di forza non era condivisa da tutti e certamente è vero che Faraday negli anni Cinquanta del XIX secolo ne ribadì con forza l'esistenza, dimostrando che esse sono in grado di trasportare energia da un punto all'altro dello spazio. Alla base degli studi che furono sviluppati da Faraday sui legami tra fenomeni elettrici e magnetici occorre richiamare alcune fondamentali scoperte fatte dal fisico danese Hans Christian Oersted (1777–1851) nel 1820. Oersted fece il seguente esperimento: costruì un semplice circuito elettrico con un filo metallico rettilineo alimentato da una batteria elettrica e pose una bussola accanto al circuito. A interruttore aperto non fluiva corrente elettrica e l'ago della bussola si orientava puntando verso il Nord geografico sotto l'azione del campo magnetico terrestre; chiudendo l'interruttore, invece, cominciava a scorrere nel circuito una corrente elettrica e l'ago della bussola ruotava dalla posizione originaria disponendosi perpendicolarmente al filo elettrico, come se subisse l'azione di un campo magnetico diverso da quello terrestre, che non può essere creato che dalla corrente elettrica. Oersted aveva dimostrato che una corrente elettrica, ovvero un flusso di cariche elettriche, genera un campo magnetico che non è creato invece da cariche elettriche ferme. Faraday allora, seguendo un principio di simmetria, si pose il problema se potesse essere vero pure il caso inverso: un campo magnetico (stazionario) può creare una corrente elettrica? Questo non accade,

salvo aggiungere alcune precisazioni. Infatti, Faraday nel 1831 dimostrò, con alcuni esperimenti, che un campo magnetico "variabile" possa generare una corrente elettrica: è il fenomeno dell'induzione elettromagnetica. In realtà sarebbe meglio precisare che tale affermazione è vera se la variabilità del campo magnetico interessa l'area occupata dal circuito indotto. Dalle considerazioni che seguono risulta chiaro che un campo magnetico anche stazionario (cioè costante nel tempo), ma non uniforme (cioè variabile nello spazio), genera una corrente elettrica in un circuito non collegato ad alcuna sorgente di elettricità, nel caso di moto relativo fra la sorgente del campo magnetico e tale circuito.

Il 24 novembre 1831 Faraday presentò alla Royal Society di Londra una memoria scientifica, intitolata *Experimental Researches in Electricity First Series*, nella quale sono contenute le descrizioni dei suoi esperimenti fondamentali che lo condussero alla scoperta dell'induzione elettromagnetica. Ma Faraday, negli anni 1831-1838, proseguì a compiere molte altre esperienze, di cui redasse particolareggiati resoconti in successive note scientifiche sempre intitolate *Experimental Researches in Electricity* per un totale di quattordici serie, poi da lui stesse raccolte in un volume nel 1839.

Le esperienze che dimostrano l'esistenza dell'induzione elettromagnetica sono riconducibili essenzialmente ai seguenti schemi:

Caso 1

In un primo tipo di esperimenti, si considerino due circuiti elettrici affiancati: nel primo circuito (inducente) sono inseriti una batteria elettrica e un reostato, mentre nel secondo circuito (indotto) è inserito soltanto un galvanometro, in grado di rilevare la presenza di una corrente elettrica. Quando l'interruttore del circuito inducente viene chiuso, l'ago magnetico del galvanometro registra una corrente elettrica nel circuito indotto, ma soltanto durante la chiusura dell'interruttore, ovvero durante il tempo impiegato dalla corrente per raggiungere da zero il suo valore di regime costante. Una volta raggiunto questo, la corrente scompare. Lo stesso fenomeno accade quando l'interruttore del circuito inducente si apre e la corrente dal valore di regime diminuisce fino a diventare zero. La corrente indotta in questo secondo caso ha il verso opposto a

quello del caso precedente. In entrambi i casi transienti il campo magnetico, creato dalla corrente inducente, varia da zero fino al valore raggiunto a corrente stazionaria e da questo fino a zero, rispettivamente quando l'interruttore del circuito inducente viene chiuso e aperto. Una corrente indotta si rileva anche quando la corrente del circuito inducente viene variata con il reostato. Anche in questo caso il campo magnetico creato dal circuito inducente varia nel tempo. Faraday denominò "elettrovoltaica" tale tipo di induzione.

Caso 2

In un secondo tipo di esperimenti, si considerino un magnete oppure un circuito elettrico (inducente), nel quale scorra una corrente elettrica stazionaria, e lo stesso circuito indotto del primo esperimento. Dalle esperienze di Oersted, che dimostrano che una corrente elettrica genera un campo magnetico, discende che una spira elettrica è equivalente a una lamina magnetica con il polo nord rivolto dalla parte dalla quale si vede circolare la corrente in verso antiorario. Pertanto, l'uso della spira percorsa da una corrente elettrica stazionaria e l'uso del magnete sono equivalenti come sorgenti di un campo magnetico. È fondamentale osservare che nell'uno e nell'altro caso il campo magnetico stazionario è non uniforme. Se il magnete (o il circuito inducente) è fermo rispetto al circuito indotto nessuna corrente circola in questo. Se, invece, il magnete (o il circuito inducente) si muove rispetto al circuito indotto, una corrente elettrica fluisce in quest'ultimo fin tanto che dura il moto. Il verso della corrente indotta cambia a seconda che il magnete (o il circuito inducente) si avvicini o si allontani rispetto al circuito indotto: è tale da contrastare l'avvicinamento o l'allontanamento del magnete (o del circuito inducente), esercitando rispettivamente un'azione repulsiva o attrattiva.

Scriva Faraday: *«Ogni volta che il contatto magnetico nei punti N e S era stabilito o interrotto, avveniva un movimento nel galvanometro, e l'effetto non era permanente, ma semplicemente momentaneo. Vi era, in ogni modo, trasformazione evidente di magnetismo in elettricità».*

La convinzione di fondo di Faraday era che tutte le forze della Natura fossero connesse e dovevano avere un'origine e una causa comune, che assumeva

diverse forme. Le riflessioni sull'induzione elettromagnetica fecero allontanare definitivamente Faraday dall'idea dell'azione a distanza e abbracciare una nuova concezione dello spazio. Ci sono alcune affermazioni di Faraday sulla natura dello spazio che sembrano preludere alla gravità einsteiniana: «*una causa della gravità che non risieda semplicemente nelle particelle materiali, ma che si trovi, congiuntamente, in esse e in tutto lo spazio*» (Bellone, 2006, p. 109).

Sulla base delle sue sperimentazioni Faraday giunge a una conclusione rivoluzionaria. Concepisce l'atomo non tanto come un corpuscolo materiale, ma piuttosto come un *centro di forza* da cui si irradia la sua azione lungo le *linee di forza*, così gli atomi non hanno un'esistenza indipendente dalle forze che esercitano, essi esistono soltanto tramite di tali forze. Le dimensioni considerate generalmente finite dell'atomo, per Faraday, invece, si estendono ovunque arrivano le linee di forza, perché essi esistono soltanto tramite le forze che esercitano e dove ci sono queste ci sono pure loro. Faraday considerò in tutti i casi delle sue esperienze delle curve in ogni punto delle quali la tangente fornisce la forza magnetica esercitata sul circuito indotto. Introdusse in tal modo l'idea di linea di forza del campo magnetico, inizialmente chiamata "curve magnetiche", aventi le seguenti proprietà:

- a) per ogni punto dello spazio nel quale non sia concentrata una sorgente di forze magnetiche passa una e una sola linea di forza;
- b) la tangente in ogni suo punto fornisce la direzione della forza magnetica in quel punto e con il suo orientamento definisce anche il verso della forza;
- c) la densità delle linee di forza è correlata all'intensità del campo magnetico: il campo magnetico risulta più intenso là dove sono più fitte le curve magnetiche e viceversa.

Faraday introdusse la convenzione seguente nella rappresentazione del campo magnetico tramite le linee di forza o curve magnetiche: il numero di linee di forza che passano attraverso una superficie unitaria è proporzionale all'intensità del campo magnetico in quell'area della superficie (ovviamente è soltanto una convenzione per la rappresentazione del campo, in quanto le linee di forza sono

di numero infinito). Dunque, le linee di forza sono la prova della modificazione dello stato dello spazio prodotta da cariche elettriche in moto (correnti elettriche) o da magneti, ovvero dell'esistenza del campo di forza magnetico. La prova tangibile della loro realtà era fornita da Faraday con la visualizzazione di esse tramite la limatura di ferro: ogni minuscolo pezzetto di ferro si comporta come l'ago di una bussola orientandosi nella direzione della forza magnetica ovvero si orienta nella direzione della tangente alla linea di forza del campo magnetico. Pertanto, ogni curva di involuzione dei pezzettini di ferro costituisce una curva magnetica o linea di forza. La distribuzione spaziale delle curve magnetiche non è altro che una rappresentazione di ciò che chiamiamo *campo magnetico*.

Egli concluse che tutti i casi avevano in comune il fatto che varia il campo magnetico (costituito dalle curve magnetiche) nella regione di spazio occupata dall'anello del circuito indotto, variazione che si può “vedere” intuitivamente immaginando le curve magnetiche che si concatenano con il circuito indotto. È una conclusione qualitativa fondata sull'osservazione che essendo il campo magnetico più intenso là dove sono più fitte le curve magnetiche e viceversa, nel moto relativo fra sistema inducente e sistema indotto quest'ultimo, per la divergenza delle curve magnetiche generate dal sistema inducente, si trova ad essere “attraversato” da curve magnetiche più fitte o più rade, a seconda che vi sia avvicinamento o allontanamento reciproco.

Faraday non utilizzava i dati per costruire equazioni, ma come strumenti per definire e raffinare i concetti fondamentali della natura. La sua profonda diffidenza verso l'idea dell'elettricità come un insieme di particelle agenti a distanza e la sua preferenza per una descrizione relazionale e dinamica dello spazio posero le basi epistemologiche per la sintesi di Maxwell, rendendo Faraday il vero architetto della moderna fisica dei campi. Infatti, nel 1865 il grande fisico teorico scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879) riprese e formalizzò matematicamente l'idea di campo di Faraday, scoprendo teoricamente un fenomeno non ancora sperimentalmente dimostrato, ma che lo sarà più tardi: un campo elettrico variabile genera un campo magnetico così come un campo magnetico variabile genera un campo elettrico. Da come aveva dimostrato sperimentalmente Faraday con la sua legge dell'induzione

elettromagnetica, si ristabilì un principio di simmetria fra i due fenomeni: le due leggi di Faraday e di Maxwell sono l'una duale dell'altra. Nelle sue celebri quattro equazioni che regolano tutti i fenomeni elettrici e magnetici, Maxwell legò fra loro, in un'interazione reciproca, il campo elettrico e il campo magnetico unificati in un unico "campo elettromagnetico":

“La teoria da me proposta può pertanto essere definita come una teoria del campo elettromagnetico, in quanto essa prende in considerazione lo spazio nei pressi dei corpi elettrici e magnetici, e può essere definita come una teoria dinamica in quanto assume che in quello spazio esista una materia in moto grazie alla quale si producono i fenomeni elettromagnetici osservati” (Maxwell, 1865, p. 461).

La «materia in moto grazie alla quale si producono i fenomeni elettromagnetici» era, secondo Maxwell, l'etere, uno strano "materiale" che permea tutti i corpi e dotato di proprietà particolari: invisibile, imponderabile, impalpabile, totalmente rigido (in contrasto con l'esperienza fisica che mostra non esservi nessun corpo totalmente rigido). Oggi sappiamo che la teoria della relatività di Albert Einstein ha dimostrato la non esistenza dell'etere, ma al tempo di Maxwell la tecnologia per la produzione del vuoto non era così perfezionata come lo è oggi e lasciava sempre, in realtà, tracce non trascurabili di materia. Per tale motivo Maxwell parlava di «cosiddetti vacua», per porre in evidenza che non era possibile realizzare totalmente il vuoto. Questa osservazione forniva, ai suoi tempi, un sostegno all'esistenza dell'etere (Bellone, 2006c, p. 308).

Vediamo ora cosa intendeva Maxwell per interazione fra campo elettrico e campo magnetico. Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico che, però, prima non esisteva e quindi anch'esso risulta variabile; quindi, secondo Faraday, deve generare un altro campo elettrico che, essendo anch'esso generato da una situazione in cui non esisteva, è anch'esso variabile e quindi genera un altro campo magnetico anch'esso variabile e così via. Siamo in presenza di una specie di "reazione a catena", o meglio di un fenomeno autosostenentesi: un campo elettrico variabile genera un campo magnetico variabile, che a sua volta genera un campo elettrico variabile, che a sua volta genera un nuovo campo

magnetico variabile, che a sua volta genera un nuovo campo elettrico variabile ecc. Questa combinazione di campi elettrici e magnetici variabili in grado di autosostenersi costituisce una perturbazione del campo elettromagnetico che non si propaga istantaneamente da un punto all'altro, ma con un certo ritardo con le modalità tipiche della propagazione per onde. Le perturbazioni dei due campi, elettrico e magnetico, si propagano come un'onda da un punto all'altro dello spazio: le increspature del campo elettromagnetico provocate dalle variazioni dei due campi componenti si propagano "per onde" nello spazio con le stesse modalità con cui la perturbazione di una superficie liquida, a seguito della caduta di un sasso, si propaga in tutto il liquido. Tutta la moderna tecnologia delle telecomunicazioni (radio, televisione, cellulari, ecc.) è basata su tale fenomeno: le onde elettromagnetiche.

Quindi, fu James Clerk Maxwell a tradurre le intuizioni visive di Faraday nel rigore del linguaggio matematico, giungendo ad una conclusione rivoluzionaria: le perturbazioni del campo elettromagnetico si propagano nello spazio sotto forma di onde. Calcolando la velocità di queste onde, Maxwell scoprì che essa coincideva esattamente con la velocità della luce. Questa scoperta non solo unificò l'ottica con l'elettromagnetismo, ma sancì il definitivo tramonto dell'istantaneità newtoniana: la luce, e con essa ogni interazione fisica, viaggia a una velocità finita e costante. Parlare di velocità della luce costante significa riconoscere che lo spazio e il tempo sono indissolubilmente legati: se il Sole sparisse, la Terra continuerebbe a orbitare nel "nulla" per circa otto minuti, il tempo necessario affinché l'informazione della sua scomparsa viaggi attraverso il campo gravitazionale alla velocità della luce. Dunque, un "campo", in Fisica, può essere più semplicemente definito come l'insieme dei valori che una data grandezza fisica (scalare, vettoriale o tensoriale) assume nello spazio, in conseguenza di fenomeni fisici di varia natura. È sottinteso che, tale proprietà, implica una modificazione dello stato dello spazio tale da consentire l'assunzione di quei valori della grandezza fisica in oggetto soltanto da parte di corpi per i quali ha senso l'attribuzione di quella particolare grandezza fisica. Questa definizione di campo sottintende ciò che Faraday aveva intuito: lo spazio non è soltanto geometrico ma anche fisico, perché manifesta proprietà fisiche

non appena lo andiamo ad esplorare con opportuni mezzi. Alla fine di questo itinerario storiografico sul concetto di campo, viene spontaneo chiedersi la ragione di questo termine: campo. La risposta è semplicissima: l'analogia con un campo fiorito, in ogni punto del quale c'è un fiore; ma al posto del fiore pensiamo di volta in volta il valore di una grandezza scalare (la temperatura per esempio) o di una grandezza vettoriale (forza, velocità, ecc.) o di una grandezza tensoriale (tensione, deformazione, ecc.).

2.4 Esperimenti virtuali su campi elettrici e magnetici. La logica computazionale

L'uso della modellizzazione, resa possibile da metodi numerici avanzati e dalla velocità di calcolo segna un mutamento epistemologico fondamentale nel passaggio dalla fisica puramente analitica a quella computazionale. Questi mutamenti risultano particolarmente rilevanti sia nella fisica teorica che nelle applicazioni. In didattica della fisica risultano particolarmente utili ambienti di simulazione dinamica quali *Interactive Physics*, *NetLogo* che permettono di generare e studiare modelli di fenomeni anche complessi. Molto diffusi seppure meno "liberi" sono anche i sistemi di simulazione-applet quali *PhET Interactive Simulations* e *Vaszak*, che integrano interattività e rappresentazioni grafiche e iconiche. Ho verificato che se ben integrate nelle attività sperimentali e non usate in modo acritico, possono aiutare nell'interpretare fenomeni legati al concetto di campo. In effetti, in fisica teorica, il concetto di "campo" rappresenta una sfida interpretativa complessa: si tratta di un'entità che, pur permeando lo spazio e possedendo energia, quantità di moto e dinamica propria, rimane intrinsecamente inaccessibile alla percezione sensoriale diretta. In questo contesto, la simulazione digitale rappresenta l'unico strumento capace di rendere fenomenologicamente trattabile la struttura profonda dello spazio-tempo, trasformando l'astrazione matematica in un'esperienza operativa. Dal punto di vista fisico e matematico, queste piattaforme operano come solutori numerici di equazioni differenziali alle derivate parziali, agendo secondo una logica di discretizzazione dello spazio nota come "metodo della *mesh*" ("maglia" o

"rete"). In fisica computazionale e ingegneria, il "metodo della mesh" è la tecnica fondamentale per risolvere equazioni complesse (come quelle di Maxwell o di Einstein) che non potrebbero essere risolte "a mano" per l'intero spazio. Tale metodo rappresenta la traduzione pratica della Logica Locale (secondo la quale ciò che accade in un punto dell'universo dipende esclusivamente dalle condizioni e dalle proprietà dello spazio in quel preciso punto e nelle sue immediate vicinanze, non da influenze istantanee provenienti da oggetti lontani) in ambito computazionale. Poiché un computer non può elaborare l'infinito continuo dello spazio reale, esso deve "discretizzarlo", ovvero dividerlo in una fitta rete di punti, volumi o celle elementari chiamata, appunto, mesh. Questa maglia trasforma un problema differenziale continuo in un sistema di equazioni algebriche che il processore può risolvere iterativamente. In un simulatore di campi elettromagnetici, come le *Field Applet*, lo spazio non viene considerato come un vuoto indistinto, ma come una scacchiera tridimensionale. In ogni "nodo" di questa rete (l'incrocio delle linee della maglia), il software calcola il valore locale del campo elettrico o magnetico applicando le equazioni (di Poisson o le leggi di Maxwell). Il comportamento globale che noi vediamo sull'interfaccia non è altro che il risultato dell'unione dei valori calcolati in ogni singolo punto della mesh. Questo approccio è strettamente connesso al concetto di procedura locale: il software non "sa" in anticipo quale forma avrà il campo totale; esso si limita a far sì che ogni punto della rete "dialoghi" con quelli vicini, rispettando le condizioni al contorno impostate dall'utente (come la posizione di una carica). È un esempio perfetto di struttura emergente: dalla rigorosa applicazione di regole semplici su una griglia locale emerge la complessità visibile dell'intero sistema fisico. Senza la mesh, non sarebbe possibile trasformare la teoria della relatività o l'elettromagnetismo in modelli visualizzabili, poiché è proprio questa suddivisione dello spazio in unità discrete che permette alla logica algoritmica di "masticare" la complessità della natura, rendendo calcolabile ciò che altrimenti resterebbe puramente astratto. Quando, per esempio, si simula una distribuzione di cariche o l'induzione prodotta da un solenoide, il software non esegue una semplice operazione grafica, ma risolve iterativamente equazioni fondamentali. In tale

approccio, il vuoto cessa di essere un nulla inerte per configurarsi come una griglia di punti in cui i valori dei vettori vengono calcolati localmente, permettendo di visualizzare il campo come un tensore di sforzo dinamico. Tale metodologia consente di isolare il "fenomeno puro", eliminando le variabili accidentali del laboratorio fisico per testare la coerenza interna delle leggi di Maxwell in condizioni ideali. L'operatività tecnica di queste piattaforme si manifesta con particolare chiarezza attraverso esperimenti virtuali che trasformano le astrazioni matematiche in fenomeni dinamici manipolabili. Nella piattaforma *Vaszak*, ad esempio, il funzionamento del software si focalizza sull'integrazione delle traiettorie in tempo reale, permettendo di esplorare la dinamica delle particelle cariche soggette alla forza di Lorentz. Un caso emblematico è quello del selettore di velocità, in cui l'utente può impostare campi elettrici e magnetici ortogonali tra loro: l'esperimento virtuale rivela che solo le particelle dotate di una specifica velocità riescono a mantenere un moto rettilineo uniforme, poiché il software calcola istante per istante il bilanciamento locale delle forze agenti sulla carica. In questo contesto, il risultato cinematico non è una traiettoria predefinita dal programmatore, ma l'esito emergente di un calcolo iterativo che traduce un'uguaglianza algebrica in un comportamento fisico osservabile, rendendo tangibile la natura locale dell'interazione elettromagnetica. Parallelamente, le *Field Applet* offrono una prospettiva complementare, spostando l'attenzione dal moto della particella alla topologia stessa dello spazio. Attraverso la visualizzazione dei flussi e dei potenziali, queste applicazioni permettono di studiare la struttura di un dipolo o il comportamento di un solenoide non come schemi statici, ma come configurazioni reattive della mesh computazionale. Un esperimento significativo riguarda la legge di Faraday, in cui il movimento di un magnete virtuale attraverso una bobina genera una variazione del flusso magnetico che il software traduce immediatamente nella visualizzazione di un campo elettrico indotto. In tale scenario, lo spazio smette di essere un vuoto inerte per configurarsi come un mezzo elastico che reagisce al movimento della materia, propagando l'informazione elettromagnetica secondo le leggi di Maxwell.

L'integrazione di questi strumenti nel percorso di tesi permette di dimostrare come la Logica Locale non sia solo un principio teorico, ma una realtà operativa verificabile. Muovendo una carica o variando l'intensità di un magnete in questi ambienti digitali, l'utente osserva la riconfigurazione immediata delle linee di forza e delle superfici equipotenziali, sperimentando direttamente come le strutture macroscopiche del campo emergano dalla somma di infinite interazioni puntuali. Qui, il linguaggio informatico trasforma le leggi della fisica in vere e proprie leggi procedurali, dove il principio di causalità viene tradotto in una sequenza rigorosa di stati logici. Attraverso la modellizzazione, lo spazio diventa un mezzo elastico e reattivo, descritto da un alfabeto che eredita la precisione della geometria greca e la dinamica della fisica classica. L'uso di questi simulatori avanzati costituisce l'estensione necessaria del laboratorio di fisica contemporaneo, permettendo di decifrare il "testo" della natura con una chiarezza senza precedenti, in quanto comprendiamo che è l'universo stesso che opera secondo una logica di regole semplici e ripetute, di calcolo procedurale, non di equazioni fisiche complesse: *«Per molto tempo abbiamo pensato che le leggi della natura fossero equazioni matematiche. Ma ora stiamo capendo che possono essere meglio descritte come programmi, o algoritmi, che definiscono come il sistema evolve passo dopo passo»*²⁵.

E ciò in un'ottica di potenziamento del ragionamento basato sulla logica computazionale, inteso non solo come mero strumento teorico, ma come un nuovo modo di "pensare" la fisica (e la realtà) attraverso la manipolazione diretta di quei micromondi logici in cui la complessa struttura dello spazio-tempo emerge dalla rigorosa applicazione di istruzioni locali. La dinamica del campo, in questo contesto, diventa così una realtà concreta e accessibile, portando a compimento quel processo di dematerializzazione della forza iniziato millenni fa e rivelando un universo dove il "tutto" macroscopico è il risultato emergente di una danza di relazioni locali coordinate da un unico, coerente rigore logico.

²⁵ S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, Champaign 2002.

2.5 Il contributo teologico: l'Angelologia

La trattazione dell'evoluzione del concetto di forza non può prescindere da una profonda radice teologica e poetica che, per secoli, ha interpretato il dinamismo del cosmo come l'espressione di una volontà superiore. Nella filosofia greca, permeata di una visione intrinsecamente animistica, la natura non necessitava di agenti meccanici esterni per giustificare il movimento, poiché era intesa come un organismo vivente. Già con Anassimandro (610-546 a.C.) si assiste a una prima relativizzazione dello spazio, dove i concetti di "alto" e "basso" perdono la loro absolutezza, mentre Empedocle (495-435 a.C.) e Anassagora (500-428 a.C.) introducono principi ordinatori — come l'Amore e l'Odio e una Mente suprema (Nous) — per spiegare l'aggregazione e la separazione dei corpi. Platone (427-347 a.C.), dal canto suo, ipotizzava l'esistenza di una *dynamis*, un'energia intrinseca alla materia capace di spingere il simile verso il simile, ponendo le basi per una concezione relazionale della realtà fisica. Tale prospettiva trovò una sistemazione organica nel sistema aristotelico, che dominò il pensiero scientifico per secoli. Aristotele (384 a.C.–322 a.C.) divise l'Universo in due domini distinti: il mondo sublunare, composto dai quattro elementi (Terra, Aria, Acqua, Fuoco) soggetto a moti rettilinei e corruttibili, e il mondo celeste, formato da sfere eteree e incorruttibili. In questo modello, il movimento degli astri era interpretato come un anelito verso la perfezione del Primo Motore Immobile, Dio. Per spiegare la regolarità e la persistenza di tali moti, la tradizione medievale e rinascimentale associò spesso il movimento delle sfere celesti anche all'azione di Intelligenze motrici, identificabili con le gerarchie angeliche. Lo spazio aristotelico, di fatti, non era un vuoto inerte, ma un insieme di "luoghi naturali" verso cui i corpi tendevano per propria natura: la Terra verso il centro, il Fuoco verso l'alto. Ogni movimento che si discostasse da questo ordine naturale era considerato violento e richiedeva l'applicazione costante di una forza, secondo una fisica dedotta più dalla fisiologia umana che dall'osservazione meccanica astratta. Questa visione animistica del mondo permase a lungo e influenzò anche la poesia successiva: ricordiamo la celebre

chiusa della *Divina Commedia* (1304-1321 d.C.), dove Dante Alighieri descrive «l'amor che move il sole e l'altre stelle²⁶». Il verso dantesco sintetizza mirabilmente la cosmologia medievale e aristotelica, in cui prevale la concezione secondo la quale il movimento degli astri non è causato da una spinta materiale o da una legge di gravitazione universale: in questo sistema, l'Universo è concepito come un organismo vivente e gerarchico, dove ogni sfera celeste è mossa da un'Intelligenza motrice che desidera la perfezione, ovvero Dio. L'amore, dunque, funge da vera e propria "forza fondamentale", un principio d'ordine capace di aggregare i corpi e regolare le orbite celesti senza la necessità di un agente meccanico visibile. Tale visione animistica della natura, pur venendo progressivamente sfidata dalla rivoluzione scientifica, non scompare del tutto nel pensiero di Isaac Newton (1642-1727 d.C.), ma subisce una sofisticata trasposizione. L'originalità di Newton risiede nel modo in cui egli rielaborò le influenze del suo tempo, a partire dalla critica radicale alla teoria dei vortici di Cartesio (1596-1650). Mentre per i suoi contemporanei l'Universo era una macchina saturata da "materia sottile", Newton giunse a concepire lo spazio e il tempo non come entità indipendenti, ma come luoghi primari e immutabili, definendoli nel "*De gravitatione*²⁷" come un effetto emanativo di Dio. In questa prospettiva, l'immutabilità dello spazio non è solo un postulato geometrico, ma un corollario della natura divina: poiché Dio è un ente primariamente esistente e onnipresente, lo spazio che ne deriva non può essere mosso né alterato. Newton pone a fondamento della sua fisica un'analogia sorprendente tra l'uomo e il Creatore, sostenendo che la nostra capacità di muovere volontariamente il corpo sia il "tipo" o il modello della facoltà divina di muovere e creare la materia: come la volontà umana è capace di muovere il proprio corpo, così la volontà divina muove i pianeti e sostiene la materia universale; in una concezione di "Essere" univoca, sia quando riferito alle creature che quando riferito a Dio. Questa

²⁶ Dante Alighieri, *Divina Commedia*, Paradiso, Canto XXXIII, v. 145.

²⁷ I. Newton, *De Gravitatione et aequipondio fluidorum* (ca. 1668-1684), in A. R. Hall e M. B. Hall (a cura di), *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*, Cambridge University Press, Cambridge 1962.

connessione gli permette di ridurre ogni difficoltà ontologica sulla natura dei corpi alla nostra esperienza immediata della volontà, rendendo la facoltà motoria umana un riflesso del potere creativo di Dio.

Nello *Scholium generale* dei *Principia*, Newton consolida questa visione descrivendo Dio non come un'entità astratta dei filosofi, definita solo da eternità e perfezione, ma come un "Pantocratore", ovvero un Signore onnipresente la cui sostanza costituisce la durata e lo spazio. Contro le tesi deiste, egli nega che Dio sia l'anima del mondo, preferendo un "fenomenismo radicale" che riconosce i limiti della conoscenza umana: noi possiamo percepire solo le figure, i colori e le superfici esterne dei corpi, ma non conosciamo le loro "sostanze intime", proprio come non possiamo conoscere la sostanza di Dio. La gravità stessa, in questo quadro, emerge come una forza non meccanica che non può essere dedotta dai soli fenomeni; per questo Newton sceglie di non "fingere ipotesi" (*hypotheses non fingo*), poiché ogni spiegazione metafisica o meccanica non tratta dai dati fenomenici, risulterebbe arbitraria nel suo sistema di filosofia sperimentale. Sebbene egli sostituisca l'amore poetico di Dante con il rigore della geometria, il fondamento ultimo del moto rimane di natura non meccanica: se per il poeta è l'Amore a muovere le stelle, per lo scienziato è una volontà di ordine divino, onnipresente, che spiega l'azione della gravità e assicura la stabilità del creato. Di fatti, Isaac Newton, pur essendo l'architetto della rivoluzione meccanica, rimase a lungo profondamente legato a questa eredità spirituale, cercando per tutta la vita di conciliare la precisione matematica delle sue leggi con la presenza pervasiva di Dio, nella perseverante ricerca di un mediatore. Speculò a lungo su uno "spirito sottilissimo", sostanza immateriale che pervade i corpi e si nasconde in essi, responsabile non solo della coesione della materia e delle attrazioni elettriche e magnetiche, ma anche della trasmissione delle sensazioni e del comando della volontà ai muscoli negli esseri viventi: un "etere elettrico", descritto nelle nuove *Queries* dell'*Opticks*, che viene ipotizzato essere un'emanazione capace di permeare il vuoto e di fungere da mezzo di unione tra "l'anima pensante e il corpo non pensante", ovvero tra Dio e il mondo. Dunque, per Newton la materia non è più in opposizione all'anima; essa appare quasi priva di massa e

governata da forze che agiscono nel microcosmo con la stessa armonia divina che egli aveva matematicamente dimostrato per il moto dei pianeti nel macrocosmo. La struttura geometrica del mondo diventa così il riverbero visibile di una geometria divina, accessibile all'uomo non solo attraverso il calcolo, ma anche attraverso lo studio della sapienza antica e delle verità rivelate. Possiamo, quindi, comprendere come nella genealogia della scienza occidentale, l'angelologia medievale non abbia occupato un ruolo marginale o meramente teologico, ma si sia configurata come un sofisticato corpo di strumenti concettuali che ha permesso ai fisici di affinare idee fondamentali come spazio, dimensione e movimento. Dal contributo di Rebekah Wallace²⁸ *“Legacy of the angels”* (*Aeon Magazine*), possiamo apprendere quanto nel corso della storia gli angeli abbiano offerto una spiegazione razionale al dinamismo delle entità fisiche, ponendosi in quel vuoto teorico antecedente alla scoperta formale della gravità o dell'energia, quando il comportamento del cosmo appariva come un enigma irrisolto. Per pensatori come Maimonide (1135-1204), ad esempio, le forze invisibili che generano il movimento erano riconducibili all'azione di Intelligenze angeliche: i pianeti stessi erano intesi come entità dotate di “Intelligenze angeliche” perché seguivano con rigore le loro orbite. In questa prospettiva, persino impulsi biologici invisibili venivano qualificati sotto la categoria di “angelo”, intesi come forza motrice incorporea. Il contributo più significativo di questa tradizione analizzata dalla Wallace risiede nella trattazione del modo in cui il dibattito sulle “sostanze separate” ha alimentato un rigore analitico sulla natura dello spazio del luogo: i teologi scolastici non intendevano semplicemente speculare, ma sistematizzare la realtà. La sfida cruciale consisteva nel definire la natura degli angeli in modo da differenziarli da Dio: se anche gli angeli sono immateriali come Dio, come possono essere “limitati”, localizzati, senza cadere nell'onnipresenza divina?

Così come l'essere umano è limitato dal corpo e può esercitare forza solo

²⁸ Rebekah Wallace (1982), ricercatrice e Research Fellow presso il *Blackfriars Hall* dell'Università di Oxford e l'Università di Birmingham, è una saggista e filosofa della scienza specializzata nel dialogo tra il pensiero neo-aristotelico e la fisica moderna.

attraverso il contatto diretto (come nel lancio di una palla), l'angelo doveva possedere una localizzazione che non ne compromettesse l'immaterialità né ne espandesse il potere fino all'onnipresenza divina. Questo problema costrinse la filosofia medievale a misurarsi con la fisica di Aristotele, che allora costituiva il paradigma dominante, per la quale il "luogo" non esisteva indipendentemente dai corpi. Per Aristotele, la fisica riguardava il movimento delle cose in funzione della loro natura intrinseca (il Fuoco verso l'alto, la Terra verso il basso) e il concetto di "luogo" era inteso esclusivamente come il "contenitore" di un corpo. In tale visione, non poteva esistere un luogo senza un corpo, rendendo così il vuoto logicamente impossibile. In questo scenario, Tommaso d'Aquino (1225-1274) nelle *Questioni*²⁹, propose una soluzione pionieristica a ciò, affermando che Dio sia in ogni luogo non per "estensione", ma per potenza, presenza ed essenza e che un angelo (o lo Spirito) è in un luogo "per applicazione della sua virtù (potenza)". Questa intuizione poneva per la prima volta l'attenzione sul fatto che un'entità spirituale è "dove agisce", da cui deriva che se lo Spirito Santo agisce su tutta la creazione, è in tutta la creazione; e ciò gettava un seme oracolare per quello che secoli dopo sarebbe diventato il concetto di campo: esso esiste dove si avverte la sua forza.

Tuttavia, questa soluzione si scontrò con le "Condanne di Parigi" del 1277, quando il vescovo Étienne Tempier proibì ben 28 tesi riguardanti le "sostanze separate", tra cui l'idea che la posizione di un angelo dipendesse esclusivamente dalla sua azione. In effetti, la domanda che restava sospesa (ovvero "dove si trova l'angelo quando non agisce?") fu la spinta necessaria affinché la speculazione medievale si potesse orientare verso vette di sofisticatezza ancora maggiori. Il divieto di insegnare certe tesi aristoteliche (secondo le quali il "luogo" era inteso come contenitore fisico e che avesse direzioni assolute -il "su" e il "giù"-) spinse studiosi come Giovanni Duns Scoto (1265-1308) ad una reinterpretazione radicale del "luogo fisico". Scoto operò una "neutralizzazione" del luogo, privandolo di riferimenti direzionali

²⁹ San Tommaso d'Aquino: *Summa Theologiae* (Prima Pars, Questioni 8 e 52)- 1265-1274.

assoluti e trasformandolo in una proprietà matematica, un concetto astratto, svincolato dalla posizione fisica e dalla natura intrinseca dei corpi, di matrice aristotelica, simile alla nostra moderna idea di dimensione. Egli introdusse il concetto di “potenza passiva” secondo la quale gli angeli (entità senza confini materici) hanno la capacità di trovarsi in un luogo per volontà divina, ma vi risiedono in modo “indeterminato”, ovvero senza che il luogo e il corpo debbano definirsi a vicenda. Dunque, ridefinendo il luogo come qualcosa che può essere occupato in modo "indeterminato" da entità immateriali, e operando questa separazione del luogo (“contenitore”) dai corpi fisici (“contenuto”), Scoto ha creato il presupposto teorico per la nascita dello “spazio assoluto” newtoniano della Fisica Classica, dove le forze possono agire dall'esterno sui corpi. Scoto spiega che, analogamente a una superficie, che deve avere un colore (ma non importa quale), così un'entità spirituale, priva di estensione, deve occupare uno spazio per agire, ma non è "incastrata" in esso dalle dimensioni fisiche (cioè vi risiede in modo “indeterminato”), al contrario dei corpi fisici che occupano un luogo in modo determinato dalle loro dimensioni. Questa idea permette di pensare a una presenza che è "qui" ma che può influenzare "lì" senza spostarsi fisicamente, proprio come il Padre, il Figlio e lo Spirito Santo sono distinti ma co-presenti ovunque nella Santa Trinità. Di fatti, Scoto descrive Dio e lo Spirito non come oggetti statici, ma come “Infinità Intensiva”. Lo Spirito Santo non è "ovunque" perché è gigantesco, ma perché la sua "intensità" (la sua potenza) non ha limiti. Dunque, possiamo affermare che con Duns Scoto assistiamo alla “liberazione dello spirito dalla prigione del luogo fisico”: grazie a lui la teologia inizierà a pensare allo Spirito come a

una dimensione più che come a una creatura. Se lo Spirito Santo è "senza confini", non è perché è una nuvola infinita, ma perché la sua natura è puramente relazionale e operativa: egli è l'Azione a distanza pura, che non richiede tempo per viaggiare perché, come direbbe Scoto, la sua "potenza passiva" lo rende già disponibile in ogni coordinata dello spazio-tempo.

Dobbiamo, però, constatare che le tesi usate da Tommaso d'Aquino e Duns Scoto per spiegare il movimento degli angeli, riprendono studi già affrontati

secoli prima da Sant'Agostino d'Ippona (354-430 d.C.)³⁰. Egli rielaborò quanto sostenuto dal filosofo presocratico Anassagora, ovvero che "tutto è in tutto" poiché in ogni singola particella di materia coesistono i "semi" (*omeomerie*) di tutte le cose, applicandolo alla natura dell'anima e di Dio. Nella sua opera sulla Trinità, "*De Trinitate*"³¹, Sant'Agostino spiega che lo Spirito possa essere "ovunque" senza occupare spazio: Dio (e l'anima) non è diffuso nello spazio come un gas o una luce, non occupa uno spazio come un corpo fisico, ma è "*totus in universo et totus in qualibet parte*" (tutto in tutto e tutto in ogni parte). E così, mentre un corpo ha una parte in un luogo e un'altra parte altrove, l'anima è "*tota in toto corpore, et in qualibet eius parte tota est*" (tutta in tutto il corpo e tutta in ogni sua parte). Questa idea di qualcosa che possa essere "presente" in un luogo senza "occupare" spazio era particolarmente rivoluzionaria per il tempo, dominato da tendenze stoiche e materialiste: allora, Sant'Agostino stava introducendo una metafisica dell'immaterialità pura, fornendo un modello logico per l'infinito, ovvero un Dio che può essere interamente presente in ogni punto del Creato senza essere diviso. Questa è la prima vera definizione di una presenza "non locale" della storia. Lo spirito non ha confini perché non è *esteso*. S. Agostino, a tal proposito, utilizza spesso l'analogia della memoria o della volontà: esse agiscono su tutto il corpo ma non si trovano in un suo "punto" specifico. Infatti, Agostino spiega che l'anima non si distribuisce nello spazio per "estensione", ma per "presenza". Se ti pungi un dito, è l'intera anima a sentire il dolore, non solo una "frazione" d'anima che si trova nel dito. Dunque, S. Agostino ha fornito la prima struttura logica per pensare ad entità che agiscono ovunque senza essere pezzi di materia: proprio come l'anima di Agostino è "tutta in ogni parte" senza essere materiale, il campo elettrico di Maxwell permea lo spazio e ogni suo punto contiene le informazioni di forza dell'intero sistema. Infatti, un campo elettromagnetico,

³⁰ Padre e Dottore della Chiesa, filosofo e vescovo di Ippona, l'instancabile ricercatore che ha sintetizzato la sapienza classica e il pensiero cristiano, trasformando l'autobiografia in indagine filosofica e ponendo le fondamenta della cultura occidentale.

³¹ Libro VI, Capitolo 6

come un Campo di Forza in generale, non è un "oggetto" che riempie la stanza, ma è un'intensità presente in ogni punto della stanza; qualcosa che non è "una cosa", ma è la "relazione" tra le cose. Così come lo Spirito Santo, nella Trinità, agisce come "*persona-amore*" ³², forza di relazione che tiene uniti Padre e Figlio, agendo a distanza ma essendo intimamente presente.

L'eredità di questi esercizi teorici è sopravvissuta alla modernità, trasformandosi nei "demoni della fisica" che hanno popolato il pensiero scientifico dell'Ottocento e del Novecento, ovvero delle Intelligenze soprannaturali utilizzate come esperimenti mentali per testare leggi naturali o esplorare il legame tra informazione ed entropia. Dal demone di Laplace, che incarna il potere predittivo assoluto, al "diavoletto di Maxwell", che nel 1867 servì a testare la seconda legge della termodinamica, la figura dell'Intelligenza senza corpo ha continuato a fungere da strumento di modellazione per fenomeni non immediatamente comprensibili. Nel suo contributo, Wallace osserva che persino giganti come Einstein, pur dichiarando di voler "bandire i fantasmi" del tempo e dello spazio assoluti, hanno operato all'interno di una struttura di pensiero resa possibile proprio da quei dibattiti sulla relazione tra mondo materiale e immateriale. È indubbio, dunque, che l'angelologia abbia svolto nel corso della storia una funzione di mediazione insostituibile, offrendo quello spazio intellettuale in cui soggetti immateriali dalle proprietà familiari (intelligenze capaci di agire) sono stati usati per esplorare concetti non intuitivi (forze invisibili). Ciò ha permesso alla scienza di compiere il salto metafisico necessario verso la comprensione dello spaziotempo, delle dimensioni invisibili che governano il cosmo e della moderna concezione del concetto di campo.

³² Giovanni Paolo II, Lettera Enciclica *Dominum et Vivificantem (Il Signore e dà la vita)* sullo Spirito Santo nella vita della Chiesa e del mondo, 30 maggio 1986.

2.6 Una visione unificata: il capolavoro di Einstein, le onde gravitazionali

Abbiamo analizzato come nell'evoluzione del concetto di campo, il superamento dell'istantaneità newtoniana iniziò nell'Ottocento grazie alle intuizioni visive di Michael Faraday e le sue formalizzazioni matematiche ad opera di James Clerk Maxwell. Faraday, con le sue linee di forza, iniziò a popolare il vuoto di tensioni e vibrazioni, trasformando lo spazio in un "campo" d'azione. Maxwell tradusse queste visioni in matematica, dimostrando che il campo non è solo un artificio matematico per descrivere le forze, ma un'entità fisica autonoma capace di possedere energia, quantità di moto e, soprattutto, di propagarsi nel tempo. Di fatti, con Maxwell si arriva ad affermare che le perturbazioni elettromagnetiche non sono istantanee, ma si propagano alla velocità della luce. E questa scoperta segnò un limite invalicabile a qualsiasi interazione a distanza: l'informazione fisica non può essere istantanea; e se un segnale richiede tempo per viaggiare, allora lo spazio intermedio deve essere una realtà fisica capace di trasportare l'informazione. Questo risultato mise in crisi definitiva la gravità di Newton, che continuava a essere descritta come un legame "senza tempo". Se la luce impiega tempo per colmare le distanze, come poteva la gravità attraversare il sistema solare in un istante? La risposta a questa domanda richiese un salto concettuale che fu compiuto da Albert Einstein con la teoria della Relatività Generale, nel 1915. La teoria della Relatività formulata da A. Einstein, prima nella sua versione Ristretta e poi in quella Generale, ha modificato profondamente la teoria della relatività galileiana e ha cambiato il nostro concetto di tempo e di spazio, definiti ora relativi. L'evoluzione del concetto di relatività segna il passaggio cruciale da un universo inteso come ingranaggio meccanico a un cosmo interpretato come un sistema dinamico e partecipativo, dove le categorie di spazio e tempo cessano di essere contenitori inerti per trasformarsi in protagonisti attivi della fisica. Nella visione classica di Galileo Galilei, il moto era già considerato relativo all'osservatore, ma tale flessibilità si arrestava di fronte alla natura del tempo, che veniva postulato come una grandezza assoluta, universale e imperturbabile. In questo scenario, lo spazio fungeva da

palcoscenico fisso e immutabile su cui gli eventi si limitavano a scorrere senza influenzarne la struttura. La vera rivoluzione intellettuale si compie nel 1905, quando Albert Einstein, con la teoria della Relatività Ristretta, scardina questo presupposto introducendo la costanza della velocità della luce come unico limite assoluto della natura. Per garantire che la luce mantenga la medesima velocità per ogni osservatore, a prescindere dal suo stato di moto, A. Einstein dimostrò che sono proprio il tempo e lo spazio a doversi flettere: ne scaturiscono i fenomeni della dilatazione temporale e della contrazione delle lunghezze, che porteranno alla fusione definitiva di queste due entità nel concetto unitario di spazio-tempo. Egli si servì di alcuni presupposti classici per spiegare la relatività del moto: partendo dall'esempio del passeggero che osserva il treno vicino, egli sottolineava che il moto non è un concetto assoluto ma relativo, senza un punto di riferimento esterno immobile (come il marciapiede della stazione), è impossibile stabilire quale dei due corpi si stia effettivamente muovendo; egli si servì anche dell'immagine del "gran navilio" di Galileo che procede senza scossoni, con il quale G. dimostra che, all'interno di un sistema che si muove a velocità costante, le leggi della meccanica non cambiano, rendendo il movimento impercettibile per chi si trova sottocoperta.³³ A. Einstein arriverà così all'esperimento cardine della Relatività Ristretta del treno³⁴: utilizzando un impulso luminoso che viaggia dal soffitto al pavimento di un vagone in corsa, Einstein dimostra che, poiché la velocità della luce è costante per ogni osservatore, il tempo deve necessariamente scorrere in modo diverso per chi sta sul treno rispetto a chi lo osserva dalla banchina. Ciò è servito a dimostrare la dilatazione dei tempi e la contrazione delle lunghezze partendo dal presupposto che la velocità della luce sia costante. All'interno di questa nuova struttura spaziotempo delineata, ogni evento fisico è definito da coordinate

³³ G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, a cura di L. Sosio, Einaudi, Torino 1970 (ed. orig. 1632). Esperimento del gran navilio.

³⁴ A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, trad. it. di G. L. Rigato, Boringhieri, Torino 1967 (ed. orig. 1916).

indissolubilmente legate tra loro, rendendo impossibile trattare la posizione di un corpo senza considerarne contemporaneamente la sua dimensione temporale. A questa ridefinizione metrica si affianca l'intuizione dell'equivalenza tra gravità ed accelerazione, sintetizzata nell'articolo del 1905 in cui A. Einstein espone i fondamenti della Relatività Ristretta, nella celebre equazione: $E = mc^2$. Essa stabilisce che se un corpo emette un'energia E sotto forma di radiazione, la sua massa m diminuisce di una quantità E/c^2 ; quindi, massa ed energia possono trasformarsi l'una nell'altra. Questo avviene per esempio nei decadimenti radioattivi o nelle reazioni nucleari. L'equazione $E = mc^2$ dice anche che una piccolissima massa può trasformarsi in una enorme quantità di energia, perché il fattore c^2 vale 9×10^{16} . Per esempio, così si spiega perché una stella possa splendere per miliardi di anni trasformando, attraverso le reazioni nucleari, una piccolissima parte della sua massa in un'enorme quantità di energia. Questa formula rivela che la materia non è altro che una forma di energia estremamente condensata, fornendo la spiegazione fisica a processi energetici immensi, come appunto le reazioni nucleari che alimentano le stelle.

Tuttavia, sarà con la Relatività Generale, nel 1915, che il pensiero di Einstein raggiungerà il vertice della sua magnificenza. Attraverso il principio di equivalenza, che stabilisce l'indistinguibilità tra gli effetti dell'accelerazione e quelli della gravità, la gravitazione viene sottratta al dominio delle "forze invisibili" che agiscono a distanza per essere ricondotta alla geometria stessa dell'universo. L'esperimento fondamentale della Relatività Generale è quello dell'astronave in caduta libera³⁵: l'esempio dell'astronauta a motori spenti illustra il principio di equivalenza, rivelando che in un sistema che cade liberamente, la gravità sembra scomparire, trasformando un ambiente accelerato in un riferimento "localmente inerziale" dove gli oggetti galleggiano nel vuoto. Ed è da questo esperimento che soggiunse un pensiero al Nostro: *["Se una persona cade liberamente, non sentirà il proprio peso". Rimasi stupefatto.*

³⁵ A. Einstein, *Il significato della relatività*, trad. it. di E. Persico, Newton Compton, Roma 1971 (raccolta di conferenze del 1921).

*Questo semplice pensiero mi fece una profonda impressione. Mi spinse verso una teoria della gravitazione.”]*³⁶

Einstein capì che in un sistema in caduta libera (come l'astronave) la gravità viene "annullata" dall'accelerazione. Questo gli permise di estendere le leggi della fisica a sistemi non solo in moto rettilineo uniforme, ma anche accelerati. Non è un caso che Einstein definì questo "*il pensiero più felice della mia vita*" (in tedesco: "*der glücklichste Gedanke meines Lebens*")³⁷: fu attraverso questo "pensiero felice" che egli capì che la gravità e l'accelerazione sono indistinguibili, gettando così le basi per descrivere la gravità come curvatura dello spazio-tempo. Di fatti, mentre il treno scardina l'idea di un tempo uguale per tutti (Relatività Ristretta), l'astronave scardina l'idea che la gravità sia una forza esterna (Relatività Generale), trasformandola in una proprietà geometrica dello spazio. In questa prospettiva, la presenza di massa o energia ha il potere di incurvare il tessuto dello spazio-tempo, e dunque i corpi celesti non si muovono perché "attratti" da una forza, ma perché seguono le naturali curvature di una trama cosmica elastica. Tale curvatura è talmente reale da deviare persino il cammino della luce, come confermato dalle osservazioni astronomiche sulle lenti gravitazionali. La visione einsteiniana trasforma così l'universo in un sistema in cui la materia detta allo spazio come curvarsi e lo spazio detta alla materia come muoversi: la relatività trasforma l'Universo da un "contenitore vuoto" della visione classica a un mezzo dinamico e partecipativo in cui le onde gravitazionali sono le "increspature" di questa geometria che viaggiano attraverso il vuoto cosmico, inteso come un mezzo vibrante e vibrato dalla realtà fisica che lo abita (proprio come le onde su uno specchio d'acqua quando vi si lancia un sasso). Il passaggio dalla Relatività Ristretta a quella generale

³⁶ A. Einstein, *Grundgedanke und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung*, manoscritto del 1920, ora in *The Collected Papers of Albert Einstein*, Vol. 7, Princeton University Press, Princeton 2002, Doc. 31.

³⁷ A. Einstein, *Grundgedanke und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung*, manoscritto del 1920, ora in *The Collected Papers of Albert Einstein*, Vol. 7, Princeton University Press, Princeton 2002, Doc. 31.

rappresenta una definitiva affermazione della “Logica Locale” come chiave di lettura dell’Universo che diventa, così, una trama di relazioni in cui: *«Le leggi della natura devono essere costruite in modo tale da essere valide per sistemi di coordinate in qualsiasi stato di moto.»*³⁸

Questa affermazione racchiude un’esigenza di invarianza e, al contempo, di estrema aderenza alla realtà puntuale: la legge fisica non è un comando calato dall’alto su uno spazio inerte, ma una proprietà che deve sussistere in ogni singolo punto dello spazio-tempo, indipendentemente dalla prospettiva dell’osservatore. Tale visione rappresenta un richiamo alla filosofia agostiniana: così come per Sant’Agostino l’anima veniva definita come un’entità che è «tutta in tutto il corpo e tutta in ogni sua parte»³⁹ e quindi l’unità dell’essere non frammenta la sua essenza nella molteplicità dei punti; così per Einstein la legge fisica, e la struttura stessa della realtà, abita lo spazio con la medesima pervasività, dunque non esiste un luogo in cui lo spazio-tempo sia un contenitore vuoto, poiché esso è ovunque espressione dinamica delle leggi che lo governano. In definitiva, Einstein ha ripreso l’eredità di Duns Scoto e Newton per portarla a una conclusione estrema: lo spazio e il tempo non sono solo il luogo dove avvengono i fatti, ma sono essi stessi il “campo”. Nella sua visione, dunque, la gravità non è più una forza che agisce "nello" spazio, ma è la geometria stessa dello spaziotempo che si curva in presenza di materia ed energia. Per usare una celebre metafora, se immaginiamo lo spaziotempo come un tappeto elastico, una massa come il Sole non "tira" la Terra a sé con un filo invisibile (l’azione a distanza), ma deforma il tappeto, costringendo la Terra a seguire la curvatura del tessuto (l’azione locale del campo). E il vero capolavoro di questa visione, e la prova definitiva della realtà del campo, è rappresentato proprio dalle onde gravitazionali. Tali onde gravitazionali sono onde trasversali che alterano temporaneamente la metrica stessa dello spazio-tempo e si propagano nel vuoto

³⁸ A. Einstein, *Come io vedo il mondo*, trad. it. di R. Melillo, Newton Compton, Roma 1975 (ed. orig. 1934).

³⁹ Agostino d’Ippona, *De Trinitate*, VI, 6.10

alla velocità della luce. Esse possono accelerare masse nella stessa direzione di propagazione o parallelamente a essa: proprio sfruttando tale proprietà esse risultano osservabili. Quando queste onde attraversano la materia, provocano un'accelerazione relativa tra masse adiacenti, un effetto infinitesimale ma osservabile: è attraverso l'uso di diversi rilevatori applicati a questi fenomeni che si effettua la misura diretta delle onde gravitazionali. I rilevatori disponibili sono di due modalità: i rilevatori a risonanza usano cilindri di alluminio massivi e registrano onde gravitazionali sfruttando la risonanza del sistema, ma presentano una sensibilità che tende rapidamente a zero fuori dalla regione di risonanza; i rilevatori a interferometria laser, costruiti sulla base dell'interferometro di Michelson, che consentono invece una più ampia banda di frequenze di rilevazione. Sebbene finora non siano stati rilevati segnali di intensità accettabile, buoni risultati sono attesi dai rilevatori di nuova generazione, previsti in funzione a breve. In teoria, ogni corpo massivo accelerato rappresenta una sorgente di onde gravitazionali. Tra i processi che potrebbero indicare la presenza di onde gravitazionali misurabili dalla Terra vi è il moto di sistemi binari, supernovae e stelle di neutroni.⁴⁰ La prova indiretta fornita dalla diminuzione della frequenza orbitale nelle pulsar binarie ha aperto la strada alla loro osservazione diretta, confermando che lo spazio-tempo non è un contenitore rigido, ma un mezzo elastico e vibrante.

Einstein intuì che, se la massa deforma lo spaziotempo, allora una massa che si muove in modo accelerato (come due buchi neri che orbitano l'uno attorno all'altro) deve generare delle increspature in questo tessuto, simili alle onde che si propagano sulla superficie di uno specchio d'acqua quando vi si lancia un sasso. Queste onde sono, quindi, vibrazioni della struttura stessa dell'Universo che viaggiano alla velocità della luce, trasportando energia attraverso il vuoto. Il concetto di onda gravitazionale chiude perfettamente il cerchio aperto dai dibattiti medievali sull'azione a distanza e sugli angeli come mediatori del

⁴⁰ https://www.treccani.it/enciclopedia/onde-gravitazionali_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/

movimento. Se per secoli ci si è chiesti come potesse il "nulla" trasmettere un'influenza fisica, le onde gravitazionali ci dicono che il vuoto non è un nulla, ma un mezzo elastico e dinamico, partecipe dell'interazione stessa. Esse rappresentano il trionfo del concetto di campo: la gravità non ha più bisogno di "fantasmi" o di "intelligenze" per agire lontano, perché è lo spazio stesso a farsi messaggero. La rilevazione sperimentale di queste onde e la conferma delle sorprendenti intuizioni di Einstein (1915) avvenuta solo un secolo dopo la loro previsione (2015), hanno dimostrato che viviamo in un Universo fatto di campi vibranti, dove ogni interazione è un dialogo continuo tra la materia e la geometria dello spazio che la ospita. Con le onde gravitazionali, il medievale "anelito" di Aristotele e l'"amore" di coesione universale dantesco trovano una nuova sorprendente formulazione scientifica nella sinfonia sottile dello spaziotempo in movimento: il campo gravitazionale è la voce dello spazio che vibra e le onde gravitazionali sono la prova definitiva che l'Universo è un tutto interconnesso, dove l'informazione viaggia a velocità finita servendosi di un tessuto dinamico ed elastico.

CAPITOLO III

Progettazione e organizzazione del percorso didattico

Il presente capitolo illustra la genesi e l'articolazione metodologica del percorso didattico intitolato *"Visualizzare e rappresentare interazioni a distanza e campi"*. L'esigenza di progettare un itinerario specifico nasce dalla mia volontà di trasporre sul piano pedagogico la transizione epistemologica analizzata nel secondo capitolo: il passaggio da una fisica del "contatto visibile" a una fisica delle "relazioni invisibili". In questa prospettiva, rivolta alla scuola primaria, l'analisi delle interazioni a distanza cercherà di non esaurirsi nell'apprendimento di regole e leggi, per trasformarsi in una riflessione profonda sulla natura dell'invisibile e della relazione, guidando, ad esempio, i bambini a comprendere che la gravità non è un semplice "cadere verso il basso" ma un'attrazione reciproca tra corpi: ciò significa farli riflettere e condurli alla complessità del concetto di interazione e alla profonda natura relazionale del mondo che ci circonda. È proprio attraverso il confronto tra i fatti reali e le rappresentazioni mentali degli alunni che emerge la necessità di modelli più raffinati: il disegno, ad esempio, può aiutare a visualizzare la staticità di una deformazione, mentre il linguaggio descrive il divenire di un movimento. In definitiva, interpretare la forza come interazione significa riconoscere la natura profondamente relazionale del mondo fisico.

3.1 Premessa

La progettazione di seguito presentata si è strutturata sotto forma di itinerario nel quale ho voluto condurre i bambini in una didattica esperienziale, in continuità con le metodologie laboratoriali attivate durante il progetto *MusEdu* del quale la classe è stata destinataria; alla scoperta, adesso, delle interazioni a distanza e dello spazio apparentemente "vuoto" tra oggetti coinvolti in una relazione. Il percorso è stato strutturato con l'intento di accompagnare i bambini al raggiungimento della comprensione dei concetti attraverso postazioni incentrate

sul coinvolgimento cinestetico e sul "fare", cercando di innescare la curiosità della scoperta valorizzando l'attesa per arrivare, poi, a ricongiungere i pensieri attivati durante i vari incontri nella giornata finale di raccolta dati e simulazioni virtuali. Tutte le attività si caratterizzano per l'uso di linguaggi semplificati e di elementi figurati per rendere più concrete le esperienze vissute: metafore come i "bambini-sorgente e bambini-sensibili", i "corridori dei circuiti elettrici", le "facce + e – dei magneti" o le "strade agevoli e disagiate" mi hanno permesso di trasporre concetti fisici complessi in un immaginario vicino al mondo dei bambini, facilitando la modellizzazione dei fenomeni osservati.

3.2 Durante la progettazione

La fase di progettazione didattica rappresenta per l'insegnante un momento cruciale di elaborazione concettuale in cui le finalità educative che si intendono perseguire si intrecciano con la realtà del microambiente della classe. Come sottolineato da Barca, Marzo e Tripaldi (2018)⁴¹, la progettazione è un metodo di lavoro che consente di costruire mappe e identificare traiettorie verso un futuro a lungo termine, pur articolandosi in fasi verificabili nel breve e medio termine. Per perseguire tale finalità ho deciso di lavorare alla mia progettazione, in coerenza con i principi dell'*Universal Design for Learning* (UDL), procedendo nella strutturazione delle attività in modo da accogliere tutte le singole specificità individuali al fine di garantire la democratica partecipazione di tutti, concentrandomi su una progettualità che potesse essere intrinsecamente flessibile, e non strutturata a priori per poi essere calata e adattata successivamente al contesto. In continuità con la prospettiva dell'UDL, Lucio Cottini⁴² si sofferma sulla progettazione definendola democratica quando essa offre "*molteplici mezzi di rappresentazione, azione ed espressione*", garantendo

⁴¹ Barca, G., Marzo, M., & Tripaldi, G. (2018). *Manuale di progettazione didattica*. Roma: Neldiritto Editore

⁴² Cottini, L. (2017). *Didattica speciale e inclusione scolastica*. Roma: Carocci Editore.

a ciascuno di partecipare secondo le proprie possibilità: è su questa traccia che ho inteso strutturare le fondamenta del mio percorso didattico di sperimentazione. Questo approccio risponde non solo a un'istanza pedagogica, ma anche normativa. La Direttiva Ministeriale del 27 dicembre 2012 chiarisce infatti che: «ogni alunno, con continuità o per determinati periodi, può manifestare bisogni educativi speciali [...] rispetto ai quali è necessario che le scuole offrano adeguata e personalizzata risposta»⁴³. In quest'ottica, il mio progetto di sperimentazione sulle interazioni a distanza è stato concepito per tenere conto dei ritmi e dello stile cognitivo di ciascun alunno, con l'obiettivo di garantire opportunità formative molteplici affinché tutti e ciascuno potessero approcciarsi al concetto astratto da trattare, per raggiungere abilità e conoscenze attraverso il canale a lui/lei più congeniale: l'espressione verbale, l'osservazione empirica, la narrazione metaforica o la rappresentazione grafica. Citando Albert Einstein, che affermava: *“Imparare è esperienza. Tutto il resto è semplicemente solo informazione”*⁴⁴, l'ispirazione costante è stata quella di non considerare mai tale impegno progettuale come un dovere, ma come un'invidiabile opportunità di imparare; un buon progetto deve quindi essere in grado di dimostrare in che misura tale opportunità si sia tradotta nel raggiungimento dei traguardi prefissati, rendendo tangibile l'evoluzione del pensiero scientifico dell'alunno.

3.3 Il contesto

La necessità di adeguare e personalizzare le risposte formative in relazione ai bisogni emergenti non può prescindere da un'adeguata conoscenza del contesto classe destinatario della progettualità didattica. Ho scelto di attuare il mio progetto di sperimentazione nella classe 4^a A dell'“Istituto Comprensivo Statale 17 Angiulli”, situata in Piazza Mario Pagano, nel Rione Sanità a Napoli. Ho

⁴³ Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. (2012). *Direttiva Ministeriale 27 dicembre 2012: Strumenti d'intervento per alunni con bisogni educativi speciali e organizzazione territoriale per l'inclusione scolastica.*

⁴⁴ Cit. Albert Einstein

avuto il piacere di conoscere questa realtà durante l'attuazione del Progetto *MusEdu* e fin da subito è scattata una "scintilla": un'energia invisibile ha attratto i nostri cuori dal primo sguardo, rendendo naturale la scelta di collaborare con questo meraviglioso gruppo di studenti e docenti per il mio lavoro di tesi. L'Istituto Angiulli si configura come un presidio educativo fondamentale in un territorio complesso, ponendo al centro del proprio Piano Triennale dell'Offerta Formativa (PTOF)⁴⁵ la *mission* di trasformare la scuola in un "laboratorio di innovazione" e di cittadinanza attiva. La scuola persegue l'obiettivo di garantire il successo formativo attraverso una didattica che valorizzi le differenze come risorsa, promuovendo l'inclusione sociale e la rimozione degli ostacoli che impediscono il pieno sviluppo della persona, in coerenza con il mandato costituzionale. La classe, situata in un'aula molto curata al terzo piano del plesso centrale, è costituita da 11 alunni (6 maschi e 5 femmine) e si presenta estremamente eterogenea. Il gruppo è caratterizzato da diverse specificità che rendono la sezione un microcosmo di inclusione: vi sono un bambino con disturbo dello spettro autistico, un bambino sordo-muto, tre bambini srilankesi e una bambina russa, ma la caratteristica peculiare del gruppo è che tutti hanno imparato a comunicare tramite la LIS. Questa composizione richiede una costante attenzione alla pluralità dei linguaggi e delle modalità comunicative. I bambini vivono il tempo scuola su 40 ore settimanali, condividendo anche il momento del pranzo. Il tempo didattico è diviso prevalentemente tra due insegnanti (area scientifica e area letteraria), il cui lavoro di collaborazione appare estremamente strutturato e complesso in una sinergia finalizzata a garantire la piena partecipazione di tutti e ciascuno, anche laddove lo strumento comunicativo (la lingua italiana, il suono, la voce) viene declinato in modi differenti. Il team docente, da anni attivo in progetti d'avanguardia, ha accolto con entusiasmo la proposta di farmi collaborare con i bambini, permettendo loro di diventare i miei "aiutanti" in un'indagine scientifica vissuta con professionalità, cura e supporto costante.

⁴⁵PTOF: https://www.17circolodidattico.edu.it/archived_files/files/POF_2020.21/NAEE01700C-201922-202021-20210201.pdf

3.4 Preconoscenze

L'indagine sulle preconoscenze è stata concepita non come un test di verifica delle conoscenze già possedute, bensì come un momento di esplorazione degli orizzonti di senso attraverso cui gli alunni interpretano il reale. Il gruppo classe, pur caratterizzato da una complessa stratificazione linguistica e culturale data la presenza di alunni di diverse nazionalità, ha palesato un profilo cognitivo di notevole spessore. Questo è ascrivibile a un lavoro pregresso del team docente estremamente solido, che ha saputo trasformare l'eterogeneità in una risorsa metodologica; nonché alla partecipazione della classe ai laboratori *MusEdu*, i quali hanno affinato nei bambini una postura osservativa di tipo scientifico, rendendoli sempre più competenti nell'analisi fenomenologica e mai superficiali. L'attivazione del percorso è avvenuta attraverso la formulazione di quesiti strategici, volti a scardinare le certezze legate alla fisica del contatto visibile e a generare una "rottura epistemologica" nel pensiero degli alunni. Domande quali *"Secondo voi può succedere qualcosa tra due corpi che non si toccano?"* o *"Cosa accade nello spazio che separa due oggetti che si attraggono?"*, non hanno avuto solo lo scopo di sondare i modelli mentali esistenti, ma hanno agito come veri e propri attivatori di curiosità e aspettativa. In questo modo, ho esortato i bambini ad assumere il ruolo di "aiutante scienziato", chiamati a indagare una dimensione – quella dell'invisibile – che solitamente sfugge alla percezione immediata. Le risposte degli alunni hanno rivelato una spiccata predisposizione a interrogarsi sulla natura dello spazio, ma anche molte incertezze sul tipo di schematizzazione e formalizzazione da dare a questi fenomeni, anche attraverso le parole da utilizzare per spiegarli. In questo processo di costruzione collettiva del sapere, la barriera linguistica e sensoriale non ha rappresentato un limite, ma ha stimolato l'attivazione di canali comunicativi alternativi di estremo interesse pedagogico. È emersa con forza l'efficacia di pratiche spontanee di *peer tutoring*, dove la solidarietà tra pari è

diventata lo strumento principale per garantire la partecipazione di tutti. Particolarmente significativa è stata la naturalezza con cui l'intero gruppo classe ha adottato strategie comunicative gestuali e segni per includere il compagno sordo-muto nella discussione scientifica: tale impegno di traduzione costante (della lingua, del segno, del concetto fisico) ha fatto sì che la riflessione sulle "forze a distanza" diventasse contemporaneamente un'esperienza di inclusione radicale. La curiosità e l'impegno degli alunni con una più spiccata predisposizione per le scienze hanno agito da volano per l'intero gruppo, permettendo anche ai bambini con maggiori difficoltà lessicali di sentirsi parte integrante di una comunità di ricerca che, attraverso il dubbio e l'osservazione, si accingeva a indagare fenomeni all'interno dell'aula-laboratorio.

3.5 Dalle Indicazioni Nazionali

La strutturazione del mio percorso didattico sulle interazioni a distanza trova il suo fondamento epistemologico e normativo nelle *Indicazioni Nazionali per il curricolo* (2012)⁴⁶ e nei successivi *Nuovi Scenari* (2018)⁴⁷, documenti in cui la Scienza viene presentata come un processo dinamico di indagine sul mondo. La mia progettazione si inserisce in questo solco, intendendo la scienza come uno strumento per interpretare il mondo e per sviluppare quel pensiero critico necessario a distinguere il fatto osservabile dalla sua rappresentazione teorica. Come indicato nel capitolo dedicato alla teoria, la scuola ha il compito di promuovere una "frequentazione di fenomeni e concetti" che permetta ai bambini di passare da un approccio sensoriale a uno riflessivo. In tal senso, la mia proposta vuole valorizzare l'aula come comunità di apprendimento, dove la classe non è un insieme di singoli, ma un luogo di negoziazione sociale dei

⁴⁶ MIUR (2012). Indicazioni nazionali per il curricolo della scuola dell'infanzia e del primo ciclo d'istruzione.

⁴⁷ CSPI (2018). Indicazioni nazionali e nuovi scenari. Documento di aggiornamento sulle competenze di cittadinanza.

significati in un approccio coerente con l'idea che l'apprendimento avvenga attraverso l'interazione, il confronto e il "fare" del bambino, che si sostanzia in uno spazio che è un laboratorio permanente di ricerca.⁴⁸ In linea con quanto previsto dal Ministero, il percorso ha mirato al raggiungimento di specifici traguardi e obiettivi di apprendimento, che possono essere così declinati:

- Sviluppo di atteggiamenti di curiosità e ricerca: stimolare il bambino a porsi domande sui fenomeni naturali (come le interazioni magnetiche o elettriche) e a cercare spiegazioni che vadano oltre l'evidenza immediata del contatto fisico.
- Esplorazione dei fenomeni e modellizzazione: condurre gli alunni a esplorare i fenomeni con un approccio investigativo, individuando relazioni tra variabili (distanza, intensità, orientamento) e cercando di rappresentare lo spazio "vuoto" come un'entità fisica attiva.
- Competenza in scienze, tecnologie, ingegneria e matematica (STEM): utilizzare linguaggi e strumenti specifici per descrivere e interpretare il reale, passando da una descrizione puramente fenomenologica a una prima formalizzazione astratta del concetto di campo.
- Competenza sociale e civica in materia di cittadinanza: promuovere la partecipazione democratica attraverso il lavoro cooperativo. In questo contesto, l'abilità di mediazione linguistica e l'uso della lingua dei segni per includere ogni compagno diventano traguardi di cittadinanza attiva imprescindibili.
- Padronanza comunicativa: sviluppare la capacità di esporre le proprie scoperte utilizzando un lessico appropriato, seppur supportato da metafore didattiche, integrando il linguaggio verbale con quello grafico-iconico.

⁴⁸ Frabboni, F. (2004). *Il laboratorio*. Editori Riuniti.

La scelta di una didattica laboratoriale, intesa non solo come spazio fisico ma come scelta metodologica che mette al centro il fare del bambino, ha permesso di declinare l'abilità di cooperazione come un obiettivo trasversale. Il richiamo alle Indicazioni Nazionali ha permesso di trasformare il limitato itinerario didattico laboratoriale di fisica organizzato in 5 incontri, in un'occasione di crescita globale, dove il traguardo non è solo l'acquisizione di un concetto scientifico, ma la maturazione di un metodo di pensiero capace di navigare la complessità, valorizzando al contempo il contributo di ogni singolo alunno all'interno di una comunità educante democratica e inclusiva. Ciò mi ha consentito di inserire queste attività in un continuum con il percorso curricolare, condividendone a pieno orizzonti educativi e valoriali, operando costantemente per sollecitare spirito critico nei bambini e la capacità di interrogarsi di fronte alla realtà.

3.6 Attività

La traduzione operativa del percorso didattico è stata strutturata come un'architettura di esperienze organizzate per "postazioni", dove il fare e il pensare si intrecciano costantemente. L'idea portante è stata quella di trasformare l'aula in un laboratorio di ricerca-azione in cui gli alunni, investiti ufficialmente del ruolo di "aiutanti scienziati", potessero indagare la natura delle interazioni a distanza attraverso un approccio induttivo. Essi, infatti, lavorando in gruppi di ricercatori, hanno avuto la possibilità di ruotare a turno su 3 postazioni sperimentali, in ogni giornata, basate sul tema specifico in trattazione. Il percorso è stato scandito dal valore dell'attesa e della scoperta, non ci sono state anticipazioni né regole prescrittive, solo indicazioni sulla cosa fare in ciascuna postazione al fine di sperimentare la forza a distanza, e ciò ha permesso ai bambini di formulare previsioni, testarle empiricamente e, infine, negoziare socialmente il significato di quanto osservato. Per tale finalità, un elemento metodologico cardine è stato l'uso del "Diario di bordo dello scienziato", uno strumento di documentazione di gruppo che ha permesso di rendere visibile

l'evoluzione del processo di pensiero attivato ed esercitato durante il corso di tutto l'itinerario didattico. All'interno del diario, ogni attività è stata guidata dal ciclo "Prevedere-Osservare-Spiegare": prima del contatto con il materiale o dell'azione su ciascuna postazione, i gruppi dovevano immaginare il possibile esito; durante l'esperimento, dovevano registrare i fatti che osservavano direttamente; dopo l'esperienza, erano chiamati a cercare di modellizzare il fenomeno, ricorrendo a qualsiasi tipo di linguaggio (metaforico, iconico) per descrivere lo spazio tra gli oggetti interagenti. La sequenza delle attività è stata pensata per scalare la complessità ed offrire un continuum di senso nel quale poter ricollegare: si è partiti dalla percezione macroscopica delle forze invisibili nel quotidiano (come il telecomando o il magnetismo semplice), per arrivare alla sofisticata visualizzazione delle linee di campo e all'induzione elettromagnetica, passando per esperienze legate al magnetismo e all'elettricità statica. In questo contesto, l'uso di "elementi figurati" ha svolto un importante ruolo di ponte cognitivo: parlare, ad esempio, di "bambini-sorgente" e "bambini-sensibili" ha permesso di astrarre i concetti di polo e carica, rendendoli entità relazionali; così come l'introduzione della metafora dei "corridori nei circuiti" ha trasformato la corrente elettrica da un concetto astratto a una dinamica vissuta e immaginabile, dove i conduttori e gli isolanti diventavano "strade agevoli o disagiati". Il culmine del percorso è stato rappresentato dalla giornata di raccolta dati e simulazioni virtuali, momento in cui i pensieri attivati nei singoli incontri sono stati ricongiunti in una visione d'insieme. Attraverso l'uso di software di simulazione e la creazione di mappe topografiche delle perturbazioni spaziali (dove i bambini hanno "mappato" le zone di influenza di sorgenti nascoste), si è giunti alla formalizzazione del concetto di Campo. In questa fase, il disegno ha smesso di essere una mera riproduzione della realtà per diventare un modello interpretativo: linee, punti e cerchi concentrici sono diventati l'alfabeto con cui i bambini hanno finalmente "dato una forma" all'invisibile, riconoscendo che lo spazio tra due oggetti non è un vuoto inerte, ma un tessuto dinamico di interazioni. Di seguito si riporta la suddivisione sistematica del percorso, che correla le aree tematiche agli argomenti specifici trattati durante la sperimentazione:

Tematiche	Attività
Interazioni distanza e “forze invisibili”	Interazioni a distanza e il concetto di "bambino-sorgente" e "bambino-sensibile"; accensione del proiettore con telecomando, vibrazione dei diapason e risonanza dei metronomi, sentiero graffetta con magnete/siringa.
Magnetismo	Attrazione e repulsione tra magneti con diversi materiali interposti; visualizzazione delle linee di forza tramite limatura di ferro; costruzione di una bussola; schermo di metallo che blocca il passaggio del campo.
Elettricità	Costruzione di un circuito elettrico; fenomeni di elettrizzazione per strofinio; attrazione e repulsione; uso dell'elettroscopio.
Elettromagnetismo	L'unione dei fenomeni: la costruzione di un elettromagnete e l'osservazione di come l'elettricità possa generare effetti magnetici a distanza.
Modellizzazione del Campo	Sintesi finale: mappatura topografica delle perturbazioni spaziali, simulazioni virtuali e rappresentazione grafica del campo totale.

Tabella creata da me per riassumere schematicamente gli incontri sperimentali

3.7 Metodologie

L'impianto metodologico del percorso non è stato inteso come un semplice supporto operativo, ma come il presupposto di senso necessario per trasformare l'aula in una comunità di ricerca scientifica. La sfida di rendere visibile l'invisibile ha richiesto l'adozione di metodologie attive capaci di integrare la dimensione manipolativa con quella riflessiva, garantendo al contempo che ogni

alunno, indipendentemente dalle proprie specificità sensoriali o linguistiche, potesse concorrere alla costruzione del sapere. Per suscitare interesse si è scelto di renderne l'apprendimento utile e significativo, partendo dal presupposto che esso sia facilitato quando i discenti sono motivati, percepiscono il valore di ciò che studiano e si sentono responsabili del proprio successo. A tal proposito, un ruolo centrale è occupato dal concetto di autoefficacia teorizzato da Albert Bandura, ovvero la convinzione nelle proprie capacità di organizzare e realizzare le azioni necessarie per gestire le situazioni e raggiungere i risultati prefissati. La fisica, in quanto scienza sperimentale, richiede che l'apprendimento avvenga mediante l'esplorazione e lo scambio di idee; per questo motivo, il mio ruolo non è quello di una figura al centro del processo, ma di un mediatore che offre chiarimenti e approfondimenti senza fornire regole a priori, permettendo al bambino di acquisire competenze attraverso l'esperienza, il tentativo e l'errore. In coerenza con questi principi, il percorso ha integrato diverse strategie didattiche attive, a partire proprio dal *Learning by doing* deweyano secondo cui "si apprende facendo"; strategia che ha ridefinito gli obiettivi come un "sapere come fare a" piuttosto che un "conoscere che", in quanto conoscere significa proprio interagire con il mondo e modificare la realtà con il pensiero, elaborando attivamente le idee anziché riceverle passivamente. Parallelamente si è adottato l'approccio dell'IBSE (Inquiry-Based Science Education), che sposta l'asse della lezione dal "sapere" al "ricercare": seguendo il modello delle 5E (Engage, Explore, Explain, Elaborate, Evaluate), gli alunni sono stati coinvolti in una dinamica di indagine continua. Come sostenuto da Harlen (2015)⁴⁹, l'apprendimento delle scienze nella scuola primaria deve puntare sullo sviluppo di "idee grandi" attraverso l'esplorazione diretta, permettendo ai bambini di agire come una comunità di scienziati in miniatura. Questa scelta ha permesso di trasformare l'incertezza iniziale e il dubbio (il cosiddetto "tormento di Newton" citato nel capitolo teorico) in una spinta propulsiva verso la sperimentazione. Parallelamente, la gestione della classe è stata affidata al *Cooperative Learning* e

⁴⁹ Harlen, W. (2015). *Working with Big Ideas of Science Education*. Trieste: Science Education Programme (SEP).

al *Peer Tutoring*, intesi non solo come strumenti di aiuto reciproco, ma come forme di mediazione cognitiva: in una classe caratterizzata da una forte multietnicità e dalla presenza di un bambino sordo-muto, la cooperazione è diventata traduzione, chiave di accesso. Secondo la prospettiva di Vygotskij (1934)⁵⁰ sulla *Zona di Sviluppo Prossimale*, l'interazione tra pari ha agito come *scaffolding* (impalcatura) dinamico: i bambini con una maggiore inclinazione scientifica hanno aiutato i compagni a verbalizzare le intuizioni, mentre l'intero gruppo ha sviluppato una gestualità specifica e segni codificati per includere il compagno sordo-muto, rendendo la lingua dei segni un linguaggio scientifico a tutti gli effetti. Un elemento innovativo introdotto nella progettazione è la *Didattica Metaforica e Narrativa*. Poiché concetti come "campo" o "potenziale" sono intrinsecamente astratti, si è fatto ricorso a "organizzatori anticipati" (Ausubel, 1968)⁵¹ sotto forma di analogie personificate, infatti, l'uso di metafore come i "corridori dei circuiti" o i "bambini sorgente" non ha costituito una semplificazione banale, ma una vera e propria strategia di *embodied cognition* (cognizione incarnata)⁵². Secondo questa prospettiva, la mente apprende concetti astratti proiettandoli su schemi corporei e motori già noti; dunque, trasformare il flusso di elettroni nel movimento di corridori su strade agevoli o disagiati ha permesso ai bambini di "sentire" la resistenza elettrica prima ancora di definirla. Inoltre, l'intero percorso è stato permeato dai principi dell'*Universal Design for Learning (UDL)*. La progettazione non è stata "corretta" a posteriori per gli alunni con BES, ma è nata flessibile, offrendo molteplici mezzi di rappresentazione (per esempio visiva con la limatura di ferro, tattile con i magneti, digitale con le simulazioni) e molteplici mezzi di espressione (il disegno, il gesto, la parola, il diario di bordo), al fine di garantire la partecipazione democratica teorizzata da Dewey (1916)⁵³, dove

⁵⁰ Vygotskij, L. S. (1934). *Pensiero e linguaggio*.

⁵¹ Ausubel, D. P. (1968). *Educational Psychology: A Cognitive View*. New York: Holt, Rinehart & Winston.

⁵² Shapiro, L. (2011). *Embodied Cognition*.

⁵³ Dewey, J. (1916). *Democrazia e educazione*.

l'educazione scientifica diventa palestra di democrazia poiché richiede l'ascolto dell'evidenza e il rispetto del punto di vista altrui nella validazione di un modello. In continuità con l'*UDL* e la prospettiva secondo la quale un bisogno nasca dalla relazione dell'individuo con l'ambiente, e coerentemente con le metodologie attive, l'organizzazione dello spazio fisico è stata oggetto di una progettazione specifica, che ha visto l'aula trasformarsi in un ambiente polifunzionale e flessibile. In linea con le riflessioni di Loris Malaguzzi, lo spazio è stato inteso come un "terzo educatore"⁵⁴ capace di orientare le interazioni, favorire l'autonomia e sostenere i processi di indagine. Di fatti, l'aula è stata riconfigurata in quattro aree di lavoro cooperativo, corrispondenti ai gruppi di ricerca, ciascuna allestita come una "stazione sperimentale" dotata di materiali specifici e del Diario di bordo: questa suddivisione ha permesso di trasformare l'ambiente in un laboratorio diffuso, dove lo spazio tra i banchi diventava esso stesso parte dell'esperimento (si pensi alle prove di distanza per misurare l'intensità delle forze magnetiche o elettriche, o alla prova di allentamento dei due diapason, la volontà di aumentare la distanza tra i due bambini che mantenevano gli estremi della molla). Inoltre, è stata prevista una zona di debriefing finale comune dedicata alla negoziazione dei modelli e al confronto delle ipotesi. Questo spazio ha garantito quella partecipazione democratica di cui si è discusso, permettendo a ogni bambino di visualizzare i contributi dei compagni e di utilizzare agevolmente linguaggi diversi, come il disegno su grande formato, la lingua dei segni, l'espressione metaforica, in un clima di ascolto reciproco. Come suggerito da Borghi, una corretta organizzazione degli spazi scolastici non solo facilita l'apprendimento, ma promuove il benessere relazionale, rendendo l'esperienza della scoperta scientifica un evento sociale condiviso e accessibile.

⁵⁴ Malaguzzi, L. (1995). *I cento linguaggi dei bambini*

3.8 Materiali

I materiali necessari all'attuazione delle attività progettate sono analogici e digitali:

- Magneti di diverse forme (a barra, a disco, a ferro di cavallo)
- Bussole
- Proiettore con telecomando
- Siringa senza ago
- Sfera di polistirolo
- Supporti di diverso materiale (spugna, plastica, legno)
- Scatola di metallo
- Carta argentata
- Due diapason
- Due metronomi
- Limatura di ferro
- Aghi magnetici e bussole
- Graffette di metallo
- Palloncini
- Panni di lana, velcro, seta, cotone
- Bacchette di plastica e di vetro
- Coriandoli
- Pile (4,5V e 9V)
- Filo di rame smaltato
- Lampadine, led e portalampade
- Chiodi di ferro
- Cucchiani di metallo
- Fogli di carta bianca e cartelloni
- Diario di bordo cartaceo

- LIM (Lavagna Interattiva Multimediale)
- Software di simulazione PhET (Interactive Simulations)
- Video scientifici e clip dimostrative
- Computer/Tablet per la raccolta dati finale

CAPITOLO IV

La sperimentazione

4.1 Primo incontro: Alla scoperta delle interazioni a distanza

Durante il primo incontro sono ritornata in classe dai bambini, già precedentemente conosciuti durante il laboratorio MusEdu, presentandomi come una “scienziata in cerca di aiutanti”. Ho spiegato loro che avevo bisogno della loro collaborazione per approfondire un argomento che ho scelto di analizzare al termine del mio percorso di studi universitario, presentando il tema centrale e le modalità operative dell’itinerario didattico di cui sarebbero stati i futuri protagonisti. Sin da subito, quindi, l’obiettivo è stato quello di decostruire la tradizionale asimmetria tra docente e discente per approdare a una dimensione di collaborazione autentica, fatta di scambio reciproco, ascolto e responsabilità. La sfida iniziale lanciata alla classe, nonché tema centrale di questo primo incontro, è stata volutamente ambiziosa: indagare e descrivere le forze invisibile che ci circondano... Ma prima di tutto ho chiesto: *“Bambini, voi avete idea di cosa siano delle forze invisibili? Siete mai stati colpiti da una forza invisibile?”*, ma soprattutto *“Secondo voi, può succedere qualcosa tra due oggetti, anche se questi non si toccano?”*. Queste domande non hanno solo sondato il terreno delle preconoscenze, ma hanno generato una tensione verso l’ignoto, portando i bambini a guardare con occhi nuovi fenomeni spesso dati per scontati, come ad esempio: il vento che spinge le foglie, i capelli che si drizzano quando sfiliamo un maglione di lana, gli oggetti che cadono a terra semplicemente se vengono lasciati, senza che nessuno li spinga...

In questa prima fase, il focus è stato spostato dagli oggetti, alla relazione tra essi, incentrando lo sforzo cognitivo sulla percezione e sulla problematicità dello spazio tra i due. Ho spiegato agli alunni che il nostro compito sarebbe stato quello di "sentire" queste forze per capire cosa accada effettivamente nello spazio in cui si genera. L'invito non era solo quello di osservare il fenomeno, ma di indagare le variabili in gioco: la distanza, l'intensità della forza, la presenza di

ostacoli. La domanda centrale che ha guidato l'intero incontro, e che ha posto le basi per la modellizzazione e rappresentazione successiva, riguardava la natura di tale spazio: *"È materiale o immateriale? Cosa c'è dentro? Che forma ha? Possiamo rappresentarlo con linee, punti o cerchi...?"*.

A questo punto ho spiegato ai bambini, già disposti in *circle time* a terra, con i banchi spostati lungo il perimetro dell'aula, la modalità organizzativa che avremmo adottato per i successivi incontri, nei quali sarebbero stati coinvolti in attività dirette, pratiche, che avrebbero richiesto non solo uno sforzo cognitivo, ma anche manipolativo.



Fig. 1: Circle time introduttivo

Di seguito, gli elementi caratterizzanti la metodologia che avremmo adottato:

divisone in 3 gruppi di lavoro (scelta autonoma dei gruppi e dei ruoli al suo interno); laboratori articolati in 3 postazioni sperimentali per ciascun tema affrontato dal primo al quarto incontro sulle quali i gruppi ruoteranno;

attività collettiva di apertura per ciascun incontro;

dotazione, per ciascun gruppo di un “Diario di Bordo” sul quale annotare quanto sperimentato in ciascuna postazione attraverso l’ausilio di 3 domande guida (“Cosa succederà se...” -ipotesi- “Cosa vedo davvero?” -verifica dell’ipotesi- “Perché è successo?” -spiegazione-).



Fig. 2: “Diari di bordo dello scienziato” usati dai bambini per annotare i dati

Tale strumento è stato strutturato per guidare il pensiero scientifico attraverso una rigorosa sequenza procedurale: prevedere l'esito di un'azione, osservare il fenomeno reale e fornire una spiegazione causale del "perché" sia accaduto.

Procedendo nella trattazione del tema della giornata, ho alimentato la curiosità dei bambini introducendo quello che avrebbero sperimentato nelle postazioni dicendo: *“Secondo voi, è possibile che un oggetto risenta di un altro che gli sta vicino, senza che questi si siano toccati? Che, ad esempio, cada, cambi forma, o addirittura inizia ed emettere un suono senza che nessuno lo tocchi?”*. Proponendo questi ulteriori interrogativi, si comincia a percepire uno stupore crescente, ma con esso anche il disorientamento e l'incredulità. Allora, per rendere più concrete queste idee, procediamo con la prima attività collettiva di apertura per addentrarci più a fondo nella questione e cercare di capire un po' meglio. Questa prima attività consiste in un gioco-simulazione, nel quale i bambini, disposti a cerchio in piedi simulano un'interazione a distanza: un bambino si posiziona al centro del cerchio interpretando il ruolo della “Sorgente” e tutti gli altri, disposti intorno, sono “Corpi sensibili”. Il compito dei bambini-corpi sensibili è quello di rispondere, di reagire, al “segnale” (sonoro, visivo, tattile) emesso dal bambino-sorgente, mantenendo sempre la stessa distanza da esso, come se fossero legati da fili invisibili: qui il gioco è facile. Il bambino al centro dice *“Mani su!”* e tutti gli altri reagiscono eseguendo il comando. Allora dico: *“E se introducessimo degli ostacoli? Sareste sempre in grado di reagire?”*. Allora i bambini vogliono provare e prima si bendano tutti (tranne il bambino-sorgente) e si rendono conto di non riuscire a reagire al segnale visivo emesso dalla sorgente; poi mettono tutti i tappi alle orecchie,

capendo di non riuscire a reagire al segnale sonoro emesso dalla sorgente; infine il bambino-sorgente si allontana dagli altri uscendo fuori dall'aula, emettendo un segnale che non arriva, e dunque al quale non corrisponde nessuna reazione da parte dei corpi-sensibili presenti in aula. Attraverso questo gioco i bambini hanno potuto dunque capire, in modalità cinestetiche, che le interazioni a distanza tra due corpi possono avvenire, ma che ci sono delle “condizioni”, ovvero le variabili, affinché questo avvenga: è necessario che il corpo sensibile sia predisposto a ricevere il segnale (senta e veda), che non vi si interpongano degli ostacoli tra i due e che ci sia la giusta distanza tra essi, altrimenti *“il segnale non prende”*, esattamente quello che accade quando vogliamo condividere contenuti con il Bluetooth. Questa attività mi ha permesso di introdurre la definizione fisica: *“Quelli che abbiamo chiamato fili invisibili, in fisica, si chiamano interazioni a distanza! Oggi ne esploreremo alcune attraverso le tre postazioni investigative.”*

Così introduco le tre postazioni investigative, sulle quali i bambini ruoteranno a gruppi, predisponendo in ciascuna di un “foglio illustrativo” che li guiderà nel da farsi, e del loro “Diario di bordo” per annotare tutto ciò che osserveranno.

Postazione 1: “VEDERE L’INVISIBILE”

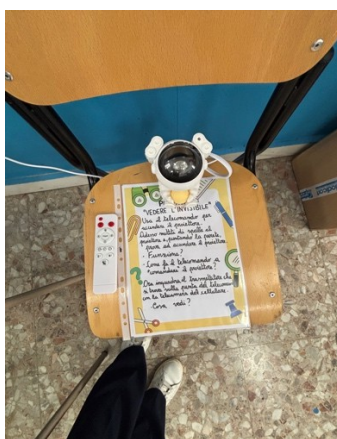


Fig.3: Proiettore da accendere con telecomando

I bambini provano ad accendere un proiettore con il telecomando, vedendo che funziona anche se: *“Non esce niente dal telecomando maestra!”*. Poi, rivolgendo le spalle al proiettore, provano a riaccenderlo e vedono che funziona, allora L. e D. dicono: *“Ma è potentissimo, rimbalza!”*, *“Sì, si accende lo stesso perché si crea un collegamento!”*. I bambini, poi, inquadrando il trasmettitore che si trova sulla punta del telecomando con la fotocamera del cellulare e osservano: *“Wow maestra, ma è blu!”*, *“No è violetto azzurro secondo me!”*. I bambini cominciano a capire che c’è qualcosa nello spazio che permette al telecomando di comandare l’accensione e lo spegnimento del proiettore...



Fig.4: Bambini che accendono proiettore di spalle e inquadratura con fotocamera della punta del telecomando

Postazione 2: “MATERIA VS FORZA”



Fig. 5: Cartoncini con sentieri da percorrere con graffetta e magnete; e con pallina e siringa

In questa postazione i bambini sperimentano due attività nelle quali incontrano la materia invisibile (aria) e la forza invisibile (il magnetismo). Spingendo con una siringa piena d’aria una pallina di polistirolo su un percorso disegnato su un cartoncino, i bambini riescono a guidarla fino al traguardo, L. nota che: *“Non*

l'ho toccata, è il vento che sto facendo che la muove". Poi, posizionando un magnete sotto il cartoncino e una graffetta di metallo sopra ad esso, riescono a muoverla lungo il percorso disegnato, dice D.: "Riesco a trascinarla da sotto maestra, non la tocco proprio".



Fig. 6: Bambini che sperimentano forza e materia

Postazione 3: "VIBRAZIONE E RISONANZA"



Fig. 7: Diapason e metronomi; fogli di spugna, pannello di plastica

Qui i bambini cominciano a immaginare che tramite lo spazio tra due oggetti possa passare dell'energia, osservando come due metronomi, disposti a piccola distanza e fatti oscillare partendo dai due lati opposti, comincino pian piano a oscillare alla stessa frequenza. M. dice: *"Vanno uguale"*, C.: *"Si crea un'oscillazione sonora!"*, N.: *"Prima non vanno insieme, poi vanno insieme"*, S.: *"I suoni si uniscono!"*.

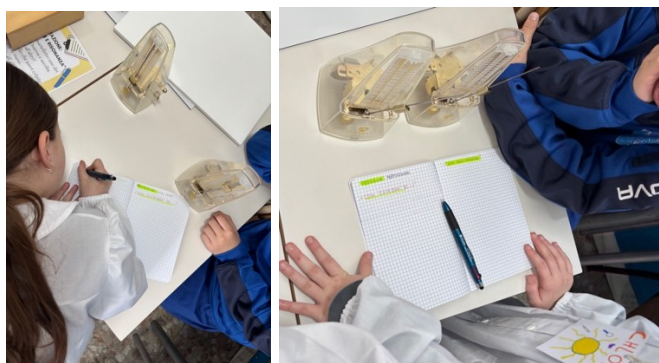


Fig. 8: Bambini che sperimentano metronomi in risonanza

Poi i bambini osservano cosa succede tra due diapason posti a 20 cm di distanza tra loro se ne colpiscono uno soltanto con il martelletto e dopo qualche secondo lo fermano con la mano: notano che inizia a suonare anche l'altro, senza che nessuno l'abbia toccato, perché l'altro diapason. Tra le affermazioni dei bambini: *“Prende il rumore maestra!”*, *“Il rumore passa all'altro tramite l'elettricità!”*, *“No, perché sono uguali e quindi passa la vibrazione!”*, *“Se prendo il rumore nella mano, il rumore se lo prende l'altro!”*

Successivamente hanno posizionato alcuni “ostacoli” (pannello di spugna, pannello di legno, pannello di plastica, pannello di plexiglass) tra i due oggetti che interagivano a distanza, osservando che, nonostante la loro presenza: *“Il rumore passa lo stesso perché attraversa la spugna”*, *“Il rumore passa di lato o passa da sopra”*, *“La vibrazione passa lo stesso perché fa un saltone!”*



Fig. 9: Bambini che sperimentano diapason che vibrano a distanza con pannelli ostacolo

Poi, i bambini sono andati oltre, spinti dalla curiosità, modificando le distanze tra gli oggetti e quando questi erano troppo lontani, rendendosi conto che non succedeva più la stessa cosa, subito esclamavano: *“No, non arriva bene! Avviciniamo!”*.

Posizionando i diapason a terra molto distanti, inoltre, hanno provato a mettere in mezzo un bambino come ostacolo e hanno capito che i due oggetti risentivano molto poco l’uno dell’altro e che il diapason non colpito vibrava producendo un suono quasi impercettibile: L.: *“Shh! Sentiamo bene perché secondo me va!”*, C.: *“No secondo me non funziona sono troppo lontani”*, M.: *“Sì, io lo sento!”*.



Fig. 10: Bambini che aumentano la distanza tra i diapason e interpongono un ostacolo umano tra i due

Le attività della giornata si concludono con un momento di debriefing collettivo in *circle time* in cui, ciascun gruppo, rileggendo i dati principali appuntati sui diari di bordo, si confrontano e cercano di riflettere a partire da una mia sollecitazione: *“In quale delle tre esperienze lo spazio tra i due oggetti vi è sembrato più pieno o più vuoto?”*.



Fig.11: Lettura dei dati e debriefing finale

I bambini disegnano alla LIM le loro idee sullo spazio tra gli oggetti usati:

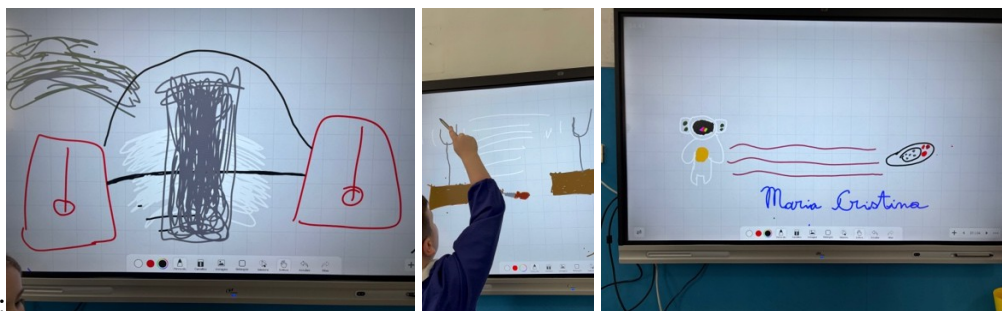


Fig. 12: Disegni dei bambini alla LIM sullo spazio “vuoto” tra gli oggetti

Questa riflessione si conclude osservando che in tutti i casi la sorgente ha cambiato lo spazio intorno a sé, che in questo spazio ci sia qualcosa, ma non abbiamo ancora capito che forma abbia questo spazio... lasciando aperto il mistero di questa scoperta per l'incontro successivo, nel quale cercheremo di definire una forma di questo spazio nel quale, secondo noi è successo qualcosa.

4.2 Secondo incontro: Il magnetismo

Il secondo incontro ha visto i bambini protagonisti di un laboratorio alla scoperta di una specifica “forza invisibile”: il magnetismo. Abbiamo iniziato cercando di ricostruire quanto vissuto nella lezione precedente, quindi, con lo sforzo metacognitivo dei bambini che erano presenti abbiamo coinvolto e spiegato anche ai bambini assenti l'argomento sul quale avevamo iniziato ad indagare (oggetti che interagiscono senza toccarsi, uno spazio nel quale c'è qualcosa, non abbiamo capito ancora cosa, come questo è fatto...). In questa giornata, quindi, dobbiamo cercare di visualizzare, attraverso le postazioni di esperimenti, la forma di questo campo e quello che accade al suo interno; e cercheremo anche di scoprire la sua capacità di attraversare o essere bloccato da degli ostacoli (come nel gioco simulazione della lezione precedente). Dopo un debriefing iniziale in *circle time*, ho presentato ai bambini il magnetismo chiedendo loro: “Voi sapete cos'è il magnetismo?”. Allora R.: “Sì maestra, tipo quando le

calamite si mettono vicine e si attraggono”, D.: “Sì maestra io le attacco sul frigo, domani te lo porto”

Allora ho ampliato la problematizzazione chiedendo: *“Secondo voi, anche noi risentiamo del magnetismo?”*. E subito M.: *“Ah sì, forse perché stiamo a terra maestra, risentiamo della terra”*.

Allora ho chiesto ai bambini se avessero mai usato una bussola e ho spiegato loro come facessero le bussole ad orientarci:

L.: “Sì io lo so, perché ci sono i punti cardinali!”,

allora io: *“Ma chi ci indica i punti cardinali?”*

C.: “Un’asticella”,

C.: “Sì un ago che si muove perché ci muoviamo!”

Io: “Siete voi a muovervi? Siete sicuri?”

N.: “No! Ma ci porta nella strada giusta!”

Io: “Allora sapete chi muove l’ago? È la Terra, perché l’ago è stato magnetizzato, e quindi, (come ieri i bambini-sensibili riuscivano a rispondere ai segnali emanati dal bambino-sorgente) riesce a rispondere a un segnale che la sorgente Terra emette”.



Fig. 13: Presentazione attività e bussole

A questo punto ho presentato ai bambini magneti di diversa forma, descrivendo le loro caratteristiche essenziali: la forma, la costituzione interna, la presenza di

due poli/ “facce” indivisibili e la loro capacità di “attaccarsi” o di “allontanarsi” in base alla vicinanza con una “faccia” uguale o diversa (due “facce uguali” si allontanano, mentre due “facce diverse” amano stare attaccate). Questa presentazione ha funto da ponte per la presentazione delle attività sperimentali da fare nelle postazioni, offrendo contemporaneamente quello spazio di condivisione delle esperienze pregresse dei bambini riconducibili a questi fenomeni: *“Si maestra io lo so perché ci gioco a casa”, “Io li ho visti in un video su Youtube”*.

Questa prima fase di presentazione si è conclusa con un’attività collettiva di apertura chiamata “La bussola umana”. Qui i bambini, disposti intorno a 4 banchi organizzati ad isola, si sono divisi in tre gruppi ognuno dei quali aveva una propria bussola; al centro del tavolo ho posizionato un magnete molto grande e, ricollegandomi sempre al gioco-simulazione dell’incontro precedente, ho detto loro: *“Immaginate adesso che questo magnete sia la sorgente e le vostre bussole siano i corpi sensibili”*. Una volta stabilizzati gli aghi delle bussole, ho chiesto ai bambini di ruotare intorno al tavolo, portando con sé la propria bussola di gruppo per osservare: *“Che succede agli aghi delle bussole quando cambiate posto?”*

E i bambini: “Si muovono maestra!”, “Vibrano!”, “Impazziscono!”

I bambini, avendo osservato che gli aghi delle bussole si muovevano, nonostante il magnete centrale restasse fermo, potevano adesso cominciare a immaginare: *“Allora secondo voi cosa c’è nello spazio vuoto tra il magnete e le bussole?”*

Per aiutarli nella simbolizzazione e avvicinarli all’idea di un campo nel quale stava succedendo qualcosa, ho disegnato alcune linee su un cartoncino, per aiutarli a visualizzare ancora meglio le “strade” (ovvero le linee di campo) che partono dal magnete centrale e che l’ago della bussola cerca di percorrere; spiegando loro che, per questo motivo, ogni volta che la muoviamo è come se le cercasse di nuovo la strada da percorrere. Li guido nell’osservazione dicendo: *“Vedete, è come se l’ago della bussola fosse un esploratore che ci sta indicando che nello spazio intorno alla bussola ci sono delle ‘strade invisibili’, quindi noi*

oggi cercheremo di conoscere meglio queste strade e di visualizzarle, attraverso le 3 postazioni sperimentali”.



Fig. 14: Attività iniziale bussole in rotazione intorno a un magnete; rappresentazione linee di campo

Postazione 1: “MAPPA 2D E MAPPA 3D”



Fig. 15: Foglio, limatura di ferro in polvere, barattolo con olio e limatura

In questa postazione i bambini cercano di dare una “faccia” al campo magnetico ponendo magneti di diversa forma (barra, sfera, U) sotto un cartoncino bianco e poi spolverando della limatura di ferro sopra; vedendo comparire una “ragnatela” (linee di campo), M. dice: *“La calamita trascina la limatura”*, C. risponde: *“Certo! Perché si crea un’attrazione”*; poi utilizzando un barattolo sigillato contenente olio e limatura di ferro e avvicinandovi un magnete osservano la limatura “volare” nello spazio.

D.: *“Guarda che fa maestra lo muovo io!”*, L.: *“E’ una magia”*, S.: *“Adesso faccio dei cerchi vuoi vedere?”*



Fig. 16: sperimentazioni bambini

Postazione 2: “IL LABIRINTO E LO SCHERMO”



Fig. 17: Magneti, graffette, foglio con percorso, supporto di spugna, supporto di metallo, supporto di plexiglass

In questa attività i bambini indagano su come “le strade invisibili”, ovvero il campo, interagiscano con gli ostacoli che incontrano nello spazio. I bambini posizionano magneti di diverse forme sotto un cartoncino su cui è disegnato un percorso e provano a guidare una graffetta di metallo posizionata al di sopra, e riuscendo a controllare bene la graffetta C. afferma: *“E’ successo perché il ferro sotto fa delle linee e tutti gli altri ferri si attaccano”*.

Nella seconda fase, i bambini devono provare a cambiare il supporto (lastra di plastica, tavoletta di legno, foglio di spugna, lastra di metallo) interposto tra il magnete e la graffetta, quindi la strada da percorrere, per vedere quale materiale

riesce a “rubare” o affermare la forza della calamita, impedendole di guidare la graffetta. I bambini osservano affermando: *“Il polistirolo duro ruba la forza del magnete!”*, *“Anche la lastra di metallo non fa camminare la graffetta”*, *“Con il legno funziona”*, *Per farlo camminare sul metallo serve un magnete più forte*, *“Ci sono alcuni materiali che non fanno passare.”*



Fig. 18: Sperimentazioni bambini

Postazione 3: “COSTRUIAMO UNA BUSSOLA”



Fig.19: vaschetta con acqua, ago in tappo di sughero, magnete, bussola

Qui i bambini sperimentano la costruzione di una bussola artigianale per scoprire il reale meccanismo di funzionamento di tutte le bussole. Con i materiali che hanno a disposizione, strofinando sempre nella stessa direzione la punta di un ago su un magnete, lo infilano in un tappo di sughero e lo pongono sull’acqua preposta in una vaschetta affinché questo galleggi. A questo punto osservano: l’ago ruota indicando diverse direzioni fino a fermarsi cercando di percorrere,

come tutte le bussole, quelle “strade invisibili” che vengono emesse da una sorgente, ovvero il grande magnete Terra. I bambini così comprendono che la direzione indicata dall’ago nella vaschetta è la stessa indicata da tutte le bussole; dunque, scrivono i punti cardinali sui 4 lati della vaschetta: se la punta dell’ago che hanno magnetizzato indica il Nord, possono intuitivamente riconoscere anche le altre tre direzioni. Alcune esclamazioni dei bambini: *“WOW, ma come fa a girarsi così?”*, *“In realtà non è proprio uguale alla bussola!”*



Fig. 20: Sperimentazioni bambini

L’incontro si conclude, dopo il debriefing di condivisione delle esperienze in cui si è visto da vicino come fosse fatto questo spazio “vuoto”, con un’attività collettiva finale basata sull’esperimento di Faraday, che serve a dimostrare che il campo può essere “bloccato”: così i bambini scoprono che i metalli hanno un potere speciale, ovvero di “schermare” lo spazio interno, impedendo al campo di entrare (esperimento di Faraday). Usando un oggetto di uso molto comune, il cellulare, i bambini vedono come questo risulti “raggiungibile”, quindi squilla, se telefonando esso è posto sulla cattedra; ponendolo poi in una scatola di legno osservano lo stesso fenomeno, il telefono prende. Ma la questione si fa più

interessante quando avvolgiamo il cellulare in un foglio di carta d'alluminio e lo inseriamo in una scatola di latta chiudendo bene il coperchio: il cellulare non squilla più, risultando "irraggiungibile" sul cellulare di chi chiama. Allora C. dice: *"Ecco perché quando sto nell'ascensore non prende!"*, *"Non ci avevo mai pensato, anche i telefoni interagiscono a distanza è vero!"*



Fig. 21: Debriefing finale e esperimento di Faraday

Con questa attività conclusiva i bambini hanno potuto osservare che esistono degli "scudi magici", come il metallo, che interrompono le "strade che collegano gli oggetti a distanza", catturando la forza che li colpisce e stendendola sulla loro superficie, non permettendone l'ingresso all'interno. Così succede, come per lo spazio dentro la scatola di metallo che rimane "pulito", protetto dal campo esterno, anche per molti fenomeni che avvengono nella realtà che ci circonda.

Nella fase finale dell'incontro, i bambini possono liberamente rappresentare alla LIM quello che immaginano ci sia nello spazio apparentemente vuoto tra gli oggetti che interagivano nelle varie postazioni.

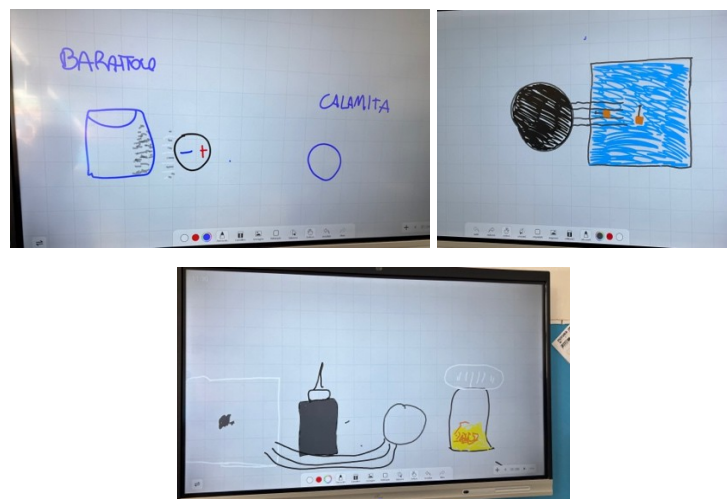


Fig. 21: Disegni dei bambini alla LIM sullo spazio “vuoto” tra gli oggetti

4.3 Terzo incontro: L'elettricità

Il tema centrale del quarto incontro del mio itinerario didattico di sperimentazione è un'altra “forza invisibile”: l'elettricità. Dunque, attraverso le attività sperimentate durante questa giornata intendo spingere la curiosità e la scoperta un passo oltre: se fino a questo momento, con i magneti, abbiamo osservato gli effetti di campi “sempre accesi”, oggi assistiamo alla “nascita” di un campo, ovvero capiamo che le “strade invisibili” che riguardano effetti elettrici, possono essere “accesi” o “spenti”, e quello che faremo insieme sarà proprio cercare di attivare questi campi, di costruire queste “strade invisibili”, attraverso l'energia dello strofinio.

Per introdurre le attività ai bambini presento la nostra protagonista della giornata come una forza invisibile che ama correre, ovvero l'elettricità, che noi comunemente chiamiamo anche corrente elettrica, dicendo: *“Immaginate che in tutti i fili elettrici ci siano miliardi di minuscoli corridori, che gli scienziati chiamano elettroni, che sono un po' pigri. Loro amano stare fermi fin quando non c'è qualcuno che dà loro una spinta e non gli mostra la strada da percorrere. A quel punto loro iniziano a correre!”*

Allora D. mi risponde: *“Sì maestra io lo so cos’è l’elettricità perché a volte mi prendo la scossa quando mi appoggio sul bancone di metallo che sta nella pasticceria di mio nonno!”*

Allora collegandomi a questo dico: *“Sì e lo sai perché? Perché ci sono delle strade che questi piccoli corridori amano tanto percorrere, perché sono fatti di materiali che li lasciano passare molto facilmente, e il metallo è una di queste. Ma adesso pensate una cosa... Dove si trova secondo voi la corrente elettrica?”*

Tra le risposte dei bambini: *“Nella televisione”, “Nel cellulare”, “Nella LIM”, “Nei fili”.*

Allora propongo come attività collettiva iniziale la costruzione in grande gruppo, in *circle time*, di un circuito elettrico, spiegando i suoi elementi costitutivi principali: *“Abbiamo una pila, che gli scienziati chiamano generatore, che è quella spinta che serve a mettere in movimento i nostri corridori pigri, senza la quale nessuno si muoverebbe;*

collegata ai fili di rame rivestiti di plastica, i conduttori, che sono le strade che i corridori percorrono, in particolare scivolano molto velocemente sul metallo;

collegati alla lampadina, ovvero l’oggetto che in questo circuito usa i corridori che la attraversano per funzionare, cioè per illuminare.”



Fig. 22: Attività collettiva di apertura sulla costruzione di un circuito elettrico

D.: *“Che bello maestra, posso provare anche io?”*

Così tutti i bambini, a turno, costruiscono dei circuiti, tra il bagliore e la meraviglia di sentirsi capaci di accendere una lampadina affermano: *“Che bello! Non avevo mai fatto una cosa del genere”, “Wow ma è così facile accenderla!”*



Fig. 23: Esperimenti dei bambini sull'accensione dei circuiti

Per aumentare il livello di problematizzazione e riprendendo l'esempio precedente della bambina che aveva preso la scossa toccando il tavolo di metallo, ho portato i bambini a riflettere sulla loro vita personale per ricordare che in realtà essi facessero quotidianamente esperienze dirette di elettricità al di fuori dei circuiti elettrici. Di fatti, dico: *“Immaginate che non sempre questi corridori si trovano su queste strade, ovvero nei fili conduttori, ma può capitare di trovarli anche su oggetti che ci circondano, come il tavolo di metallo, come sui capelli quando si drizzano sfilando un maglione, come quando prendiamo la scossa toccando una maniglia di metallo”*, e così introduco le postazioni del giorno: *“Oggi, infatti, sperimenteremo la presenza di questi piccoli corridori su oggetti molto comuni che noi cercheremo di mettere in moto strofinando con dei panni (un po' come avevamo fatto per magnetizzare la bussola), così che questi piccoli corridori invisibili possano iniziare a correre e noi possiamo vederne l'effetto sugli oggetti.”*

L. risponde: *“Si maestra io a volte con il palloncino mi strofino i capelli perché così si alzano, perché c'è elettricità”*, M. continua: *“Io a volte sullo scivolo prendo la scossa!”*



Fig. 24: Bambina dimostra come si elettrizza i capelli

Iniziamo così la fase di sperimentazione, in cui i gruppi ruotano a turno sulle tre postazioni investigative:

Postazione 1: “LA FORZA DELL’ ATTRAZIONE”



Fig. 25: Bacchette di plastica/ vetro/metallo; vaschetta con coriandoli; panno di cotone/pile/seta/velcro

In questa postazione i bambini testano quali materiali “accendono meglio” il campo elettrico e sentono che esso è capace di tirare, ovvero di attrarre oggetti. Essi hanno a disposizione diverse bacchette (plastica, vetro, metallo) e diversi panni (cotone, seta, pile, lana, velcro), strofinando tra loro questi materiali e avvicinando le bacchette strofinate al contenitore con i coriandoli devono cercare di capire: qual è la coppia di materiali che riesce ad attrarre più coriandoli e perché alcuni non funzionano. Durante l’attività, completando i diari di bordo è emerso che: *“Secondo noi solo la cannuccia di plastica con il cotone attira i coriandoli”*, *“La bacchetta di alluminio con il pile non attira i coriandoli”*, *“La*

plastica fa molto forte perché è come un magnete”, “Si crea un'elettricità che è capace di tirare i coriandoli”.



Fig. 26: Documentazioni diari di bordo e sperimentazione dei bambini

Postazione 2: “LA REPULSIONE”



Fig. 27: Palloncini appesi a spago, panno di velcro, panno di cotone

Qui i bambini scoprono che è possibile accendere un campo elettrico che non solo tira, ma che questo può anche allontanare due oggetti (così come si allontanavano due “facce” uguali delle calamite). Gli oggetti che usiamo sono due palloncini appesi ad uno spago distanti tra loro 10-15 cm, (a sua volta appoggiato ad un filo presente in classe al quale li abbiamo legati con due mollette) e panni di diverso materiale (cotone, seta, lana, velcro, pile). I bambini osservano che tra i due palloncini appesi, “non succede niente”, ma se essi

strofinano una “faccia” di uno dei due palloncini succede qualcosa all’altro... e se strofiniamo anche una “faccia” dell’altro palloncino, succederà ancora un’altra cosa. Facendo attenzione a tenere sempre in contatto le zone dei palloncini strofinate (ovvero quelle in cui sono stati messi in moto dei corridori) i bambini notano che: *“Se ne strofino uno solo, i palloncini si avvicinano”, “Io li ho strofinati tutti e due e si allontanano, come due ex”, “Quando li ho strofinati tutti e due erano troppo carichi e non potevano stare vicini”, “Maestra vedi, se giro il palloncino però si toccano, prova anche tu”, “Aspetta prima di rivedere dobbiamo scaricare questo palloncino sennò non funziona bene!”*



Fig. 28: Sperimentazione dei bambini

Postazione 3: “L’ELETTROSCOPIO”



Fig. 29: Elettroscopio, bacchette di plastica, cucchiaio di metallo, panno di pile/cotone/seta

In questa postazione, si visualizza l’effetto che diversi oggetti possono determinare sull’elettroscopio. Prima di utilizzarlo, spiego che: *“L’elettroscopio è lo strumento che gli scienziati usano per capire se su un oggetto sono presenti dei corridori, perché questo ha un’asticella di metallo che riesce a risentire (come quando noi eravamo corpi sensibili nel gioco del primo incontro) di un*

segnale che viene emesso dall'oggetto (la sorgente). Dall'oggetto si diffonde il messaggio che ci sono corridori oppure no, perché questi "saltano" sull'asticella di metallo; quindi, in base a come si comporta l'elettroscopio capiamo se su un oggetto c'è carica elettrica o meno."

I bambini hanno a disposizione bacchette di diverso materiale (plastica, vetro, metallo) da strofinare con panni di diverso materiale (lana, velcro, seta, cotone). Dopo averli strofinati, avvicinando le bacchette all'elettroscopio osservano il suo comportamento e affermano: *"Risente della bacchetta di alluminio strofinata con pile", "Non risente del vetro", "Con la bacchetta di plastica strofinata impazzisce", "Si muove molto poco con i cucchiaino di metallo", "Con la cannuccia non funziona."*



Fig. 30: Sperimentazione dei bambini e raccolta dati

Al termine delle attività, dal momento di condivisione in circle time, sono uscite delle idee un po' contrastanti, L. dice: *"Ma tu non ci avevi detto che nei fili del circuito c'era il metallo e fuori c'è la plastica così non prendiamo la scossa? E perché l'elettroscopio non si muove proprio con il cucchiaino che è di metallo? Non ci deve stare elettricità qua?"*

Effettivamente il dubbio era lecito, non era chiaro perché su quelle “strade” che avevamo definito “migliori” per i corridori, in realtà essi non ci fossero, preferendo le “strade di plastica” che avevamo definito più disagiati per loro. Così, sondando un po' le capacità di osservazione sviluppate dai bambini chiedo: *“Secondo voi quale materiale posso mettere nel circuito al posto del filo per far sì che i corridori si muovano e la lampadina si accenda?”*.

Le risposte sono contrastanti: per 6 bambini funziona il cucchiaino di metallo, per 3 bambini funziona la bacchetta di plastica.

Allora inseriamo i due materiali nel circuito, prima la bacchetta di plastica e poi il cucchiaino di metallo, al posto di un cavo, e osserviamo che: nel primo caso la lampadina non si accende, nel secondo caso sì. Così abbiamo ricostruito che gli oggetti che facevano muovere l'elettroscopio non facevano accendere la lampadina, mentre gli oggetti che non facevano muovere l'elettroscopio, facevano accendere la lampadina. Quindi abbiamo potuto accedere alla distinzione tra conduttori e isolanti; ho così spiegato ai bambini che: *“I materiali come la plastica, che si trova fuori ai fili elettrici perché i corridori non amano tanto percorrerla, sono quelli che fanno muovere l'elettroscopio perché i corridori “fuggono” da lei e quindi se avviciniamo la bacchetta di plastica strofinata all'elettroscopio, loro saltano su di lui e lo fanno muovere. Questi sono chiamati ISOLANTI, proprio perché isolano, non fanno correre gli elettroni, anzi li allontanano; perciò, messi nel circuito non fanno accendere la lampadina, perché i corridori sono fermi.”* E continuando: *“Invece i materiali come il metallo del cucchiaino, che si trova dentro ai fili elettrici, sono delle ottime strade per i corridori; perciò, quando avviciniamo il cucchiaino di metallo strofinato all'elettroscopio, questo non si muove: perché non risente di nessun corridore che salta, loro restano tutti sul cucchiaino perché è una strada molto comoda per loro. Questi materiali si chiamano CONDUTTORI, proprio perché conducono i corridori, gli permettono di correre molto agevolmente; perciò, messi nel circuito fanno accendere la lampadina”*.

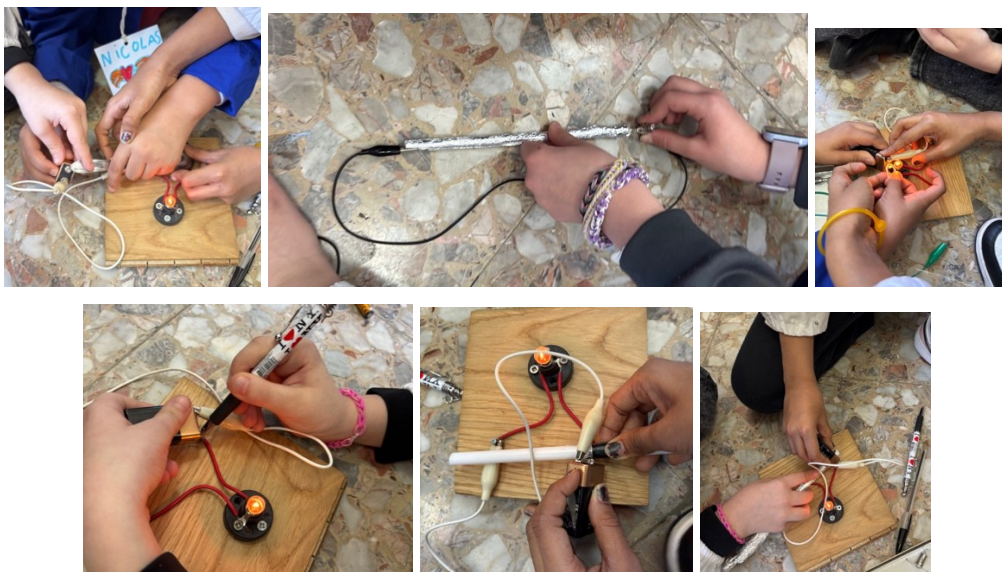


Fig. 31: I bambini provano a inserire diversi materiali nel circuito elettrico

Dopo questa riflessione collettiva, l'incontro si è concluso con le prove, da parte dei bambini del comportamento dei diversi materiali usati nelle postazioni, all'interno di un circuito, osservando la combinazione di materiali necessaria per accendere le lampadine, poi hanno visto la corrente intrappolata nella lampada a plasma e hanno disegnato alla LIM ciò che li aveva colpiti maggiormente.



Fig. 32: Lampada a plasma

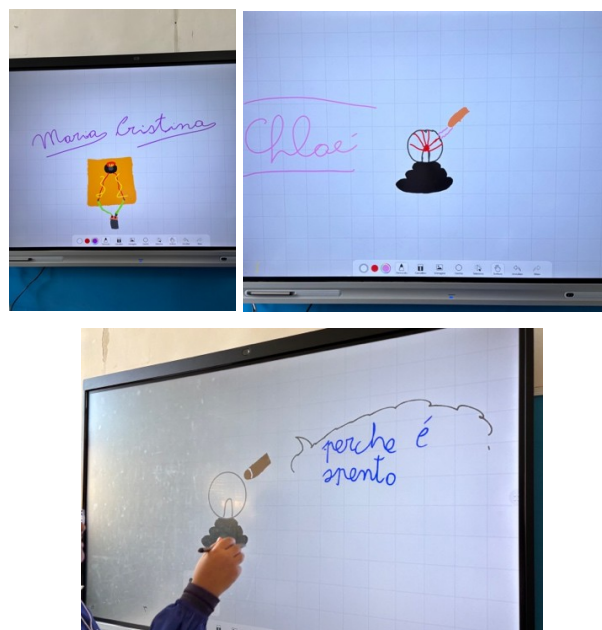


Fig. 33: Disegni dei bambini alla LIM sullo spazio “vuoto” tra gli oggetti

4.4 Quarto incontro: L'induzione elettromagnetica

Le attività di questa giornata hanno rappresentato il raccordo tra le esperienze sul magnetismo e sull'elettricità, l'unione dei due campi, che ha dato nome al tema centrale del giorno: l'induzione elettromagnetica. Qui l'aula si trasforma in un laboratorio dimostrativo partecipato in cui tutta la classe, non più a gruppi, si raccoglie intorno ad un unico “tavolo degli scienziati” sul quale osservare alcuni fenomeni. Innanzitutto, posizionando un circuito elettrico acceso sul banco, pongo un primo interrogativo: *“Secondo voi è possibile che la corrente che c'è in questi fili, faccia qualche altra cosa oltre che accendere la lampadina?”* e N. risponde: *“Si maestra può caricare il telefono secondo me”*. Proviamo, e il telefono non si carica. Allora, ponendo una bussola sul tavolo accanto al circuito dico: *“Può succedere qualcosa all'ago della bussola se la metto qui vicino al circuito elettrico?”*, e i bambini, quasi all'unanimità mi rispondono: *“Si maestra, si muove!”*. Allora, per verificare questa ipotesi, pongo il filo attraversato dalla corrente parallelo all'ago della bussola (già stabile e indicante il Nord) e faccio osservare ai bambini che l'ago si muove e chiedo: *“Che è successo secondo voi? C'è un magnete nascosto che ha mosso la bussola?”*.

D. risponde: *“Allora dentro ai fili c’è magnetismo?”*, Allora M.: *“No, ma come ha fatto a muoversi l’ago con l’elettricità? Non ci posso credere”*.

A questo punto faccio vedere ai bambini che aprendo il circuito, quindi fermando i corridori, e ponendo un cavo non percorso da corrente parallelo all’ago della bussola, questo non si muove più, allora L. afferma: *“Allora funziona solo se sta chiuso e la lampadina è accesa!”*.

Ebbene sì, confermo ai bambini che quello che hanno appena visto si chiama effetto magnetico della corrente elettrica, che consiste nel fatto che i corridori quando sono in movimento nel filo generano nello spazio intorno qualcosa, qualche movimento, che riesce a muovere l’ago della bussola, quello spazio non è più “vuoto”, ma è occupato da un campo invisibile; allora si dice che: una corrente elettrica genera un campo magnetico indotto.

I bambini hanno provato singolarmente in autonomia l’esperimento sul tavolo e sul pavimento, osservando con molta attenzione quando l’ago della bussola riusciva a muoversi grazie alla corrente che attraversava il filo.



Fig. 34: I bambini sperimentano l’effetto magnetico della corrente elettrica

Ma per rafforzare la potenza di quanto descritto e articolare ancora di più la questione dico: *“Bimbi, dovete sapere che gli scienziati dopo che hanno scoperto che la corrente elettrica potesse generare effetti magnetici, si sono chiesti se fosse possibile anche il contrario, ovvero che un campo magnetico generi una corrente elettrica indotta”* e continuando: *“Per scoprirlo hanno fatto diversi esperimenti, che noi oggi cercheremo di rifare attraverso l’uso di un simulatore virtuale: faremo finta di stare in un laboratorio con degli oggetti per vedere se può succedere quello che ipotizziamo”*. Allora predispongo sulla Lim l’interfaccia dell’applet *PhET Colorado-Legge di Faraday* e spiego gli elementi che sono presenti: *“Allora potete vedere sullo schermo che c’è un magnete che si può muovere, un filo di metallo come quello interno al circuito avvolto a formare una ‘bobina’ e collegata a questa bobina c’è una lampadina. La lampadina è spenta, come possiamo fare ad accenderla?”*

C. risponde: *“Maestra ci vuole una batteria”*,

allora io: *“Sì è corretto, ma io vorrei usare il magnete per accenderla, come posso fare?”*

M.: *“Mettila vicino al filo”*

C.: *“No collegala proprio bene al filo, sennò la lampadina non parte!”*



Fig. 35: I bambini sperimentano l’effetto elettrico di un magnete con il simulatore virtuale

Facendo vedere ai bambini che la lampadina non si accende al solo avvicinare il magnete dico: *“Vi ricordate nell’esperimento di prima i corridori che cosa*

dovevano fare nel filo del circuito per far muovere l'ago della bussola? Dovevano muoversi o la bussola si muoveva anche se stavano fermi, cioè se il circuito era aperto?"

D.: "Dovevano correre per forza maestra, con la luce spenta, la bussola non si muoveva!"

Allora io dico: "Bene allora anche il magnete si dovrà muovere per generare qualcosa intorno a lui, no? E per far sì che il filo della bobina ne risenta, muoviamo il magnete avanti e indietro nella bobina! Che succede?"

E tutti: "Sì accende la lampadina!"

Io: "Sì, adesso si accende!"

Allora M.: "Quindi la lampadina si accende solo se il magnete sta vicino e si muove!"

Io rispondo: "Esatto! Bene, quindi con questo esperimento abbiamo provato quello che gli scienziati si sono chiesti tanti anni fa: anche un magnete in movimento può generare intorno a sé un campo elettrico indotto capace di far correre gli elettroni e quindi accendere una lampadina."



Fig. 36: Simulatore virtuale Legge di Faraday

Al termine di questa fase, molto attratti dal simulatore virtuale i bambini hanno provato a turno alla LIM ad accendere la lampadina muovendo il magnete e io ho anticipato che nell'incontro successivo avremmo utilizzato molti altri simulatori virtuali per cercare di dare finalmente una forma e una

rappresentazione a questo spazio apparentemente “vuoto” che c’è tra due oggetti che agiscono a distanza, che abbiamo cercato di conoscere sempre di più attraverso tutte le postazioni sperimentate.

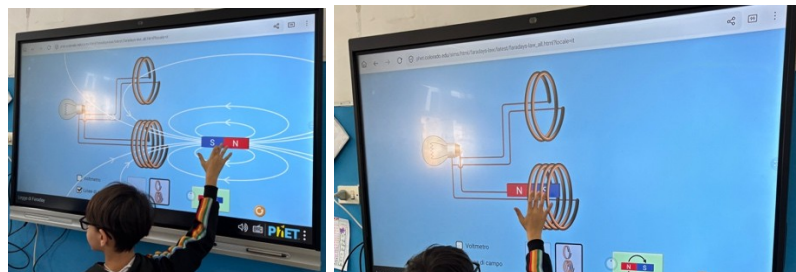


Fig. 37: I bambini sperimentano il simulatore

4.5 Quinto incontro: Modellizzazione e Autovalutazione

In questo ultimo incontro, attraverso l’utilizzo di diversi simulatori virtuali, ho voluto ricostruire il percorso di tutte le esperienze vissute dal primo incontro, offrendo quella dimensione di autovalutazione e metariflessione utile a ciascuno studente per ripercorrere la propria evoluzione cognitiva operata durante questo itinerario didattico, nonché ho voluto creare un luogo di valutazione non formale nel quale ho potuto misurare il raggiungimento degli obiettivi preposti alla base di questa progettualità, come momento finale di una valutazione operata in itinere, continua, come postura professionale e relazionale. Mediante la modellizzazione offerta dagli applets utilizzate, i bambini hanno potuto accedere a delle rappresentazioni tangibili, chiare, dei concetti talvolta astratti trattati, e hanno potuto produrre in modo più consapevole una formalizzazione del sapere, incarnando conoscenze, competenze e abilità già sperimentate attraverso le esperienze dirette.

Per la proposta degli applets, ho deciso di seguire un ordine più o meno speculare all’ordine delle attività proposte durante i vari incontri, predisponendo i bambini a semicerchio davanti alla LIM e offrendo, per ogni simulazione, la possibilità a tutti di venire a provarla, mentre il resto della classe osservando le prove poteva partecipare e aiutare i compagni nella comprensione dei concetti e nell’uso.

I laboratori virtuali utilizzati per simulare quanto fatto nelle postazioni e dare un “volto” e vedere graficamente le forze invisibili incontrate, sono:

1. Falstad-cariche <https://falstad.com/emstatic/>

Questo mi ha permesso di introdurre proprio la schematizzazione di base di un corpo carico che emette dei segnali; e proponendo prima l’interfaccia con una sola carica e poi con due ho potuto far vedere come questi segnali, queste linee emesse da ciascuna carica influissero sulle altre, si unissero e avessero una direzione.

Ho inoltre ricollegato alle postazioni, focalizzando l’attenzione sulle cariche di segno + e segno – rappresentate nell’applet, che rappresentavano proprio quelle “facce” diverse nella corrente elettrica così come nei magneti in base alle quali gli oggetti si comportavano in modo diverso.

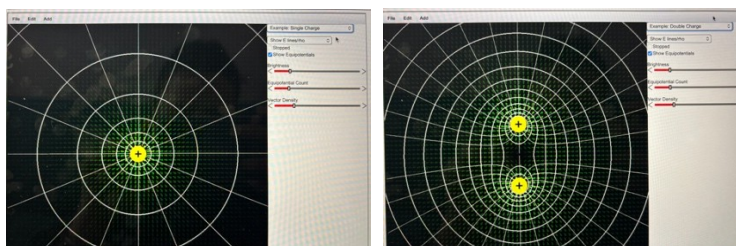


Fig. 38: Interfaccia simulatore virtuale

2. Phet.Colorado-Legge di Coulomb

<https://phet.colorado.edu/it/simulations/coulombs-law>

L’uso di questa modellizzazione mi ha permesso di far vedere ai bambini in forma grafica quella “forza invisibile” ampiamente sperimentata, sia con i magneti che con gli oggetti elettrizzati. L’interfaccia molto chiara e intuitiva rappresenta le forze con frecce di diversa lunghezza (in base all’intensità della stessa in relazione alla distanza) e con diverso verso (in base alle “facce” interagenti degli oggetti, di segno + o -). Inoltre, attraverso le diverse posizioni di trazione o pressione degli omini laterali che sostengono le sfere che interagiscono, i bambini hanno potuto proprio impersonificarsi e ripensare a

quello che avevano fatto: *“Quando i magneti si allontanavano io li volevo spingere più forti per farli attaccare”, “E quando invece si attaccavano io dovevo tirare forte per staccarli”*.



Fig. 39: I bambini sperimentano il simulatore virtuale

3. Vascak- Onda

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/templateimg.php?s=kv_vlneni&l=it

Con questa animazione molto divertente e chiara, riconducendo all'esempio della ola che spesso si fa allo stadio, ho riportato questo movimento a quello che C. aveva intuito nella postazione con i diapason, parlando di “oscillazione sonora che passa da uno all'altro” e di vibrazione; tutte schematizzazioni riconducibili al modello di onda, attraverso la quale “viaggiano” le informazioni nello spazio che c'è tra due oggetti che interagiscono a distanza.

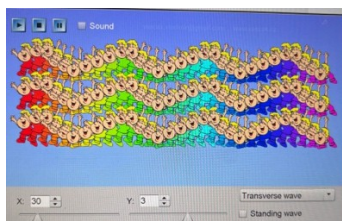


Fig. 40: Interfaccia simulatore virtuale

Qui ho interrotto temporaneamente l'attività di simulazione, facendo vedere ai bambini una molla slinky e spiegando loro che potevano servirsi di essa per costruire nella loro mente un'immagine ancora più nitida di come le onde si propagano trasportando messaggi da una sorgente ad un altro oggetto, in uno spazio che sembra vuoto, ma in cui in realtà "si stanno succedendo una serie di eventi a catena", motivo per il quale lo definiamo campo.

Posizionandomi a terra con i bambini ho mostrato loro come poter simulare la propagazione di un segnale, muovendo la molla slinky; tra le varie osservazioni D. dice: *"Vediamo se il segnale così arriva!"*, L. risponde: *"No, è troppo distesa, così non si vede."*, invece M. dice: *"Vogliamo vedere quanto si allunga? Usciamo fuori nel corridoio! Vai adesso così lanciami il segnale!"*



Fig. 41: I bambini sperimentano la molla slinky

4. Phet.Colorado- Onde introduzione

<https://phet.colorado.edu/it/simulations/waves-intro>

In continuità con l'idea di onda introdotta con la molla, questa simulazione risulta ancora più utile e funzionale perché riconduce al vissuto empirico di ciascun bambino: qui osservando come si diffonde una goccia d'acqua che cade dal rubinetto nello spazio sottostante; come si agitano e “camminano” nello spazio le particelle di suono che vengono emesse da un altoparlante; e come si emana nello spazio la luce emessa da una torcia, i bambini hanno potuto dare una forma a queste informazioni prodotte da sorgenti che viaggiano nello spazio e generano degli effetti che noi possiamo percepire, come un suono, una luce o un'increspatura del livello dell'acqua. L. afferma. *“Sì è vero! Anche il sole fa così.”*

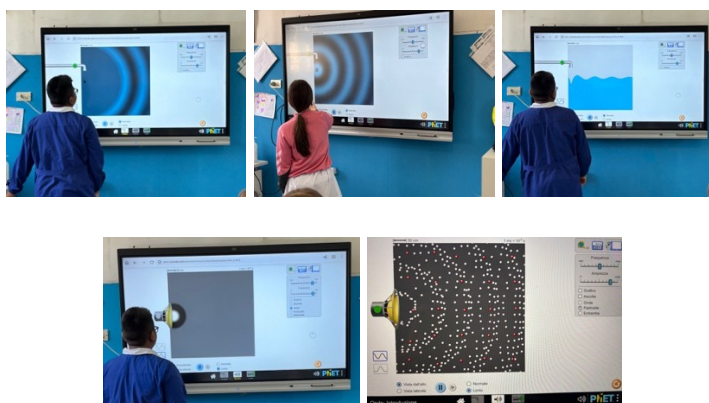


Fig. 42: I bambini sperimentano il simulatore virtuale

5. Vascak- cariche e campi elettrici

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=elpole_pole&l=it

Riproponendo con un'interfaccia molto chiara la rappresentazione di due oggetti che interagiscono a distanza sotto forma di schematizzazione (ovvero con puntini con segno + e segno -), ho riportato nuovamente l'attenzione sulle frecce rappresentanti le forze invisibili uscenti da questi oggetti, facendo vedere come, operando modifiche di segno o di posizione, ci fossero dei cambiamenti anche nelle regioni di spazio esterne ad essi, ovvero in quella zona che abbiamo

definito campo. Inoltre, ponendo dei puntini con + e - in altre posizioni di spazio, i bambini hanno visto come la zona di spazio da essi occupata subiva una perturbazione, un cambiamento, che si diffondeva in modo simile a quello delle oscillazioni viste in precedenza.

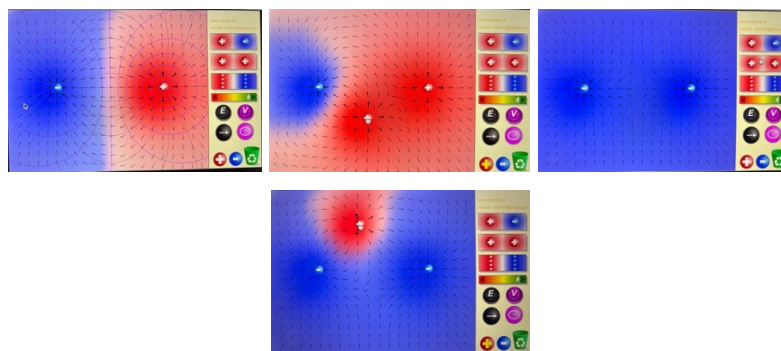


Fig. 43: Interfaccia del simulatore virtuale

6. Phet.Colorado- elettricità statica e palloni

<https://phet.colorado.edu/it/simulations/balloons-and-static-electricity>

Questo simulatore, molto chiaro e immediato, ha permesso ai bambini di capire molto facilmente il motivo per il quale, strofinando un palloncino su un maglione, esso vi venisse attratto: attraverso una semplice rappresentazione grafica di un'esperienza già vissuta nella realtà i bambini hanno potuto accedere al concetto fisico sotteso riguardante l'elettrizzazione per strofinio, l'attrazione di cariche di segno opposto e la disposizione delle cariche sulle superfici degli oggetti. Provando il simulatore M. dice: *“Vediamo cosa fa il palloncino se lascio solo una carica – sul maglione”*.

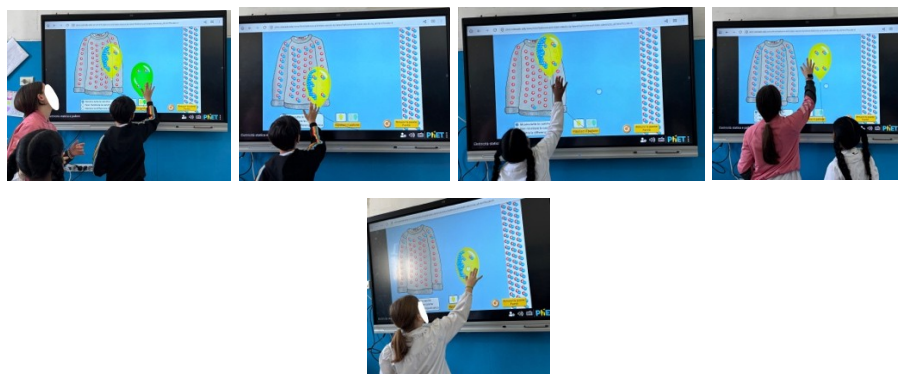


Fig. 44: I bambini sperimentano il simulatore virtuale

7. Phet.Colorado- magneti e bussola

https://phet.colorado.edu/sims/html/magnet-and-compass/latest/magnet-and-compass_all.html?locale=it

Questo simulatore ha rappresentato un ulteriore passo in avanti per chiarire il concetto di campo. Qui, ritornando alle esperienze condotte durante il secondo incontro sul magnetismo, i bambini hanno potuto osservare una modellizzazione molto intuitiva che li ha aiutati a rendere più chiara quell'idea di movimento e di "strade invisibili", generate dai magneti, che gli aghi delle bussole cercavano di percorrere ogni volta che venivano spostate rispetto al magnete centrale (attività collettiva di apertura giorno 2).

Vedendo lo spazio intorno al magnete occupato da "aghi delle bussole invisibili", i bambini hanno concretizzato maggiormente il loro immaginario e hanno potuto vedere anche l'effetto, su questo campo, del movimento del magnete e della bussola, capendo che ad ogni posizione di ciascuno di essi corrispondeva una disposizione diversa dello spazio circostante, che andava ad influire a sua volta sull'altro oggetto.

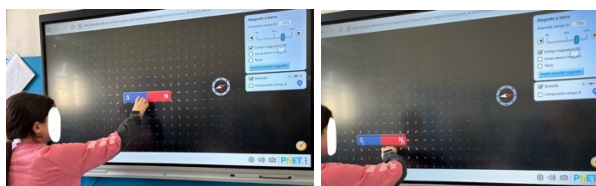


Fig. 45: I bambini sperimentano il simulatore virtuale

8. Phet.Colorado- kit costruzione circuiti

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc/1.0.0/circuit-construction-kit-dc_it.html

Per proporre una simulazione virtuale delle esperienze sull'elettricità, questo simulatore mi ha rappresentato la giusta prova da offrire. Qui i bambini si sono misurati con la loro competenza sviluppata nell'incontro precedente sulla costruzione dei circuiti, operando uno sforzo di memoria per ricordare gli elementi essenziali di quest'ultimo, ma allo stesso tempo hanno potuto esprimere la loro fantasia e curiosità utilizzando anche altri strumenti che nella realtà non avevamo, come resistori, batterie più potenti, monete, gomme e matite per osservare quale fosse il loro comportamento all'interno del circuito.

D.: *“Qua gli elettroni sono lenti, infatti la luce della lampadina è accesa poco!”.*

M. risponde: *“Ah ho capito perché! Non hai messo bene il cavo, lo devi collegare bene!”*, allora C.: *“La puoi mettere anche a testa in giù la lampadina, basta che interagisce!”*

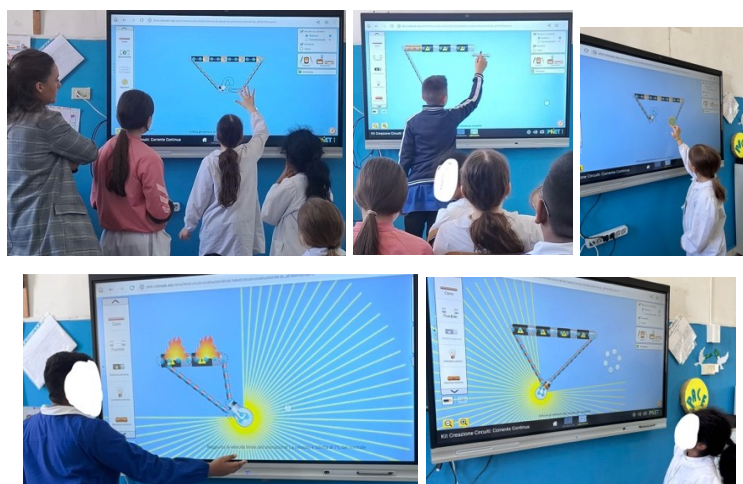


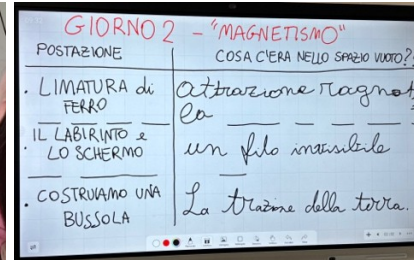
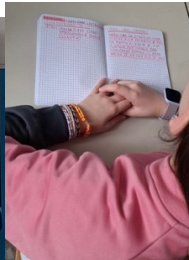
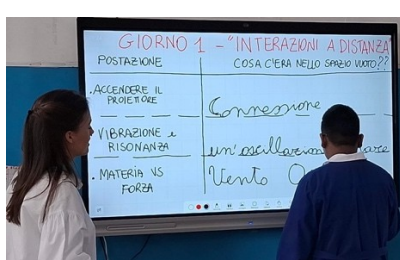
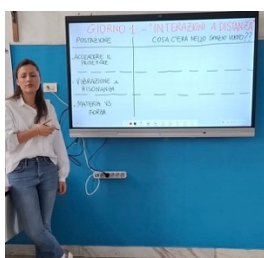
Fig. 46: I bambini sperimentano il simulatore virtuale

Dopo tutte le esperienze con i simulatori virtuali, per tirare le somme e creare un luogo di elaborazione dei dati raccolti, abbiamo costruito una tabella nella quale, per ogni postazione, abbiamo indicato *“cosa c'era secondo noi nello spazio vuoto in quel momento”*. I bambini hanno completato la tabella,

ripercorrendo le esperienze vissute leggendo i dati raccolti sui diari di bordo e confrontandosi su quanto ricordavano, operando una vera co-costruzione della conoscenza, valorizzando la cooperazione e permettendomi di operare una valutazione di sintesi finale della progettualità attuata.

Incontro	Postazioni	Cosa c'era nello spazio vuoto?
1: Interazioni a distanza	• “Vedere l’invisibile” • “Materia VS Forza” • “Vibrazione e Risonanza”	
2: Magnetismo	• “Mappa 2D e mappa 3D” • “Il labirinto e lo schermo” • “Costruiamo una bussola”	
3: Elettricità	• “La forza dell’attrazione” • “La forza della repulsione” • “L’elettroscopio”	
4: L’induzione elettromagnetica	• L’effetto Oersted • Esperimento di Faraday	

Tabella schematica delle attività proposte in ogni postazione sperimentale



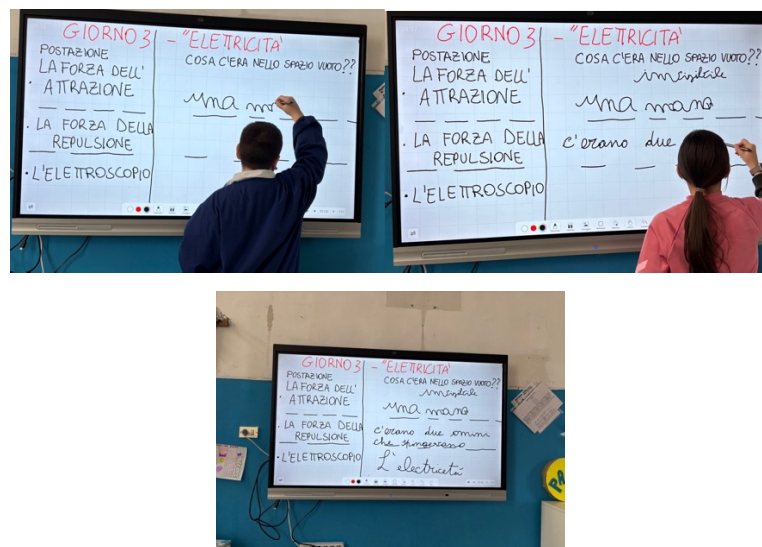


Fig.47: I bambini completano la tabella per schematizzare le esperienze fatte

4.6 Metariflessione personale e limiti riscontrati

Al termine del percorso di sperimentazione, si rende necessaria un'analisi critica volta a far emergere non solo i successi didattici, ma anche i limiti strutturali e le necessarie riprogettazioni in itinere che hanno caratterizzato l'intervento. La pratica della metariflessione mi ha permesso di osservare come la progettazione non possa mai essere un atto statico, bensì un processo ricorsivo, flessibile, capace di adattarsi al contesto di riferimento. Un primo limite significativo è stato riscontrato nella fase di documentazione individuale: ho notato, infatti, una diffusa difficoltà da parte dei bambini nel registrare i dati e le ipotesi sui diari di bordo. Tale operazione, fondamentale per il metodo scientifico, veniva spesso percepita come un obbligo formale e un'interruzione dell'attività, piuttosto che come un'opportunità di riflessione; inoltre, la barriera linguistica, in molti casi, si tramutava in una difficoltà di scrittura che generava "frustrazione da compito", distraendo gli alunni dall'attività pratica, che risultava invece estremamente accattivante. Per ovviare a questo ostacolo e non trasformare la stesura in una sosta inutile, in continuità con i principi dell'*UDL*, ho proposto spesso la modalità grafico-rappresentativa come alternativa alla scrittura, invitando i bambini a esprimersi "in qualsiasi modo preferissero", cercando così di far passare il messaggio che il valore risiedesse nel loro pensiero e non nella

“correttezza formale” della sua espressione. Questo ha permesso di trasformare il diario in un autentico spazio di espressione del sé, coerentemente con il mio costante incoraggiamento: *"a me interessa sapere quello che pensi, e vorrei che ne rimanesse una traccia affinché io possa rileggerci sempre"*. L’offerta di molteplici possibilità di accesso alle attività didattiche si configura, di fatti, proprio come la concretizzazione di quell’ideale di didattica inclusiva, spesso troppo attenta ai bisogni specifici delle singolarità in un’ottica medicalizzante, ma noncurante dei bisogni comuni e possibili bisogni transitori che un alunno può manifestare se disposto in uno specifico ambiente o se portato a vivere una determinata situazione: è in questo che si configura l’impegno dell’insegnante nel fare della classe la prima realtà democratica della società, offrendo a tutti e ciascuno l’opportunità di operare e di partecipare. Il momento più alto di questa democrazia didattica si è manifestato durante le fasi di coinvolgimento attivo e manipolativo dei bambini, come per esempio nella costruzione dei circuiti elettrici. È stato profondamente emozionante osservare come tre bambini di diverse nazionalità, ciascuno con le proprie modalità di partecipazione e barriere linguistiche, stessero collaborando congiuntamente su un compito comune: in quell’istante, quella micro-dimensione della classe sembrava funzionare come un "unico cervello" collettivo volto alla risoluzione del problema. La loro capacità di sfidare le indicazioni iniziali (ad esempio collegando il conduttore direttamente alla base metallica della lampadina invece che sul chiodo, esclamando: *"Guarda maestra, funziona anche così!"*) ha dimostrato come la didattica inclusiva non sia una teoria, ma la realtà di cui abbiamo bisogno nelle nostre progettazioni, in cui ciascuno partecipa offrendo ciò che ha. Un’ulteriore riflessione fondamentale riguarda la gestione dell’imprevedibilità intrinseca al contesto scolastico che ha reso connaturatamente flessibile la mia progettualità. La variabilità numerica degli alunni presenti e le mutevoli dinamiche relazionali quotidiane mi hanno spinto a una costante riprogettazione delle strategie organizzative. Ho dovuto, in particolare, introdurre una significativa flessibilità nella composizione dei gruppi di ricerca, rinunciando a una suddivisione fissa in favore di configurazioni variabili che garantissero la funzionalità delle attività e il mantenimento di un clima d’aula sereno e ordinato in ogni incontro,

permettendo una ricostituzione dei gruppi di lavoro libera, ricorsivamente durante tutto l'itinerario didattico. Questa capacità di "abitare l'imprevisto" ha trasformato la criticità in una risorsa, permettendo ai bambini di sperimentare nuove collaborazioni e di operare anche tra ritmi di lavoro differenti. Ma, in questo scenario di possibile incertezza in cui i bambini hanno agito, i simulatori virtuali si sono rivelati alleati metodologici preziosi. Il loro valore aggiunto risiede nella capacità di rendere visibili fenomeni fisici delicati e complessi con una chiarezza iconica impeccabile, agendo così da contrappeso alla possibile fallibilità degli esperimenti analogici. Il digitale ha offerto una dimensione protetta in cui l'errore non comprometteva l'osservazione, permettendo di visualizzare cosa avveniva nello spazio apparentemente "vuoto" tra gli oggetti che interagivano a distanza. Tuttavia, l'analisi metacognitiva a posteriori conferma la necessità di integrare il digitale senza mai lasciarlo predominare: l'apprendimento incarnato (*embodied cognition*), derivante dal contatto tattile con la materia, dall'attrattività che si percepisce con i magneti e dalla resistenza fisica dei fili di rame, possiede un valore esperienziale insostituibile. La simulazione ha agito come un potenziatore cognitivo e modellizzatore, ma è stata la manipolazione diretta a garantire la sedimentazione del concetto nel corpo e nella memoria del bambino: un apprendimento realmente incarnato! A queste considerazioni si aggiunge la consapevolezza del valore del tempo dell'attesa. Se inizialmente percepivo il rallentamento dovuto alle difficoltà linguistiche o alla lentezza nelle registrazioni come un ostacolo, la metariflessione mi ha permesso di capire che quei "tempi morti" erano in realtà spazi di maturazione. In quegli istanti, i bambini non stavano solo scrivendo o disegnando, ma stavano interiorizzando il passaggio dall'esperienza sensibile alla sua formalizzazione simbolica. Ho compreso che la qualità della didattica inclusiva non si misura sulla velocità di esecuzione, ma sulla capacità del docente di sostare nell'incertezza insieme agli alunni, legittimando ogni loro tentativo di dare un nome e una forma al dubbio. Questa postura di ascolto e facilitazione ha permesso di creare un ambiente sicuro, dove il legame umano è diventato il conduttore principale di ogni scoperta scientifica.

Operare una metariflessione su quanto svolto, mi ha permesso di riflettere anche sulla necessità di ripensare lo statuto della valutazione all'interno di una sperimentazione scientifica. In un contesto di ricerca-azione, la valutazione deve necessariamente spogliarsi della sua veste puramente sommativa, per configurarsi come un processo continuo e formativo. È emersa con forza la necessità pedagogica di scindere la performance (il risultato immediato dell'esperimento o la correttezza del termine tecnico utilizzato) dal processo cognitivo ed emotivo sotteso all'azione. Valutare il processo significa riconoscere il valore del dubbio, della riformulazione dell'ipotesi e della capacità di cooperazione, elementi che costituiscono, a mio avviso, il vero nucleo della competenza scientifica. In quest'ottica, la valutazione non può essere concepita come un atto calato dall'alto, ma deve necessariamente passare attraverso l'autovalutazione e la co-costruzione dei significati. Come evidenziato nell'ultimo incontro, il momento in cui i bambini sono stati chiamati a formalizzare le proprie scoperte (decidendo autonomamente come rappresentare le perturbazioni dello spazio) ha rappresentato la forma più alta di verifica: non si è trattato di misurare quanto avessero memorizzato, ma di osservare come avessero rielaborato l'esperienza vissuta. Inoltre, l'autovalutazione mediata dal "Diario di bordo" ha permesso a ogni alunno di prendere coscienza del proprio percorso, trasformando l'errore in una tappa necessaria della scoperta. Questa scelta di campo risponde alla volontà di promuovere una valutazione che valorizzi l'identità del discente, garantendo che il giudizio non diventi mai un'etichetta sulla persona, ma uno strumento di crescita: è stato molto bello operare un continuo ringraziamento per gli interventi dei bambini e offrire loro un orientamento nel pensiero perché ciò mi ha permesso di non creare mai un clima di chiusura o di "paura", ma di libera e apprezzata espressione di tutti. Operare una valutazione che includa la narrazione del sé e l'espressione creativa (attraverso il disegno o la metafora) significa riconoscere che la scienza, nella scuola primaria, è innanzitutto un'esperienza umana di incontro con il reale. In tale contesto, allora, il successo dell'intervento non risiede nella perfezione formale del dato raccolto, ma nella maturazione di una postura riflessiva: il bambino che si autovaluta, che corregge il compagno o che suggerisce una strada

alternativa nel circuito, sta esercitando la forma più autentica di cittadinanza scientifica, dimostrando che il valore del "sapere" è indissolubile dal "saper essere" all'interno di una comunità educante. In conclusione, questo intervento mi ha insegnato che l'anima della professionalità docente risiede nella capacità di accogliere lo stupore e la meraviglia dei bambini, creando un ambiente di facilitazione in cui si sentano al sicuro. Il collegamento costante tra la fisica e la vita reale ha permesso, inoltre, di "umanizzare" la scienza, di renderla tangibile, concreta. Vedere gli alunni appassionati, intenti a inseguire la propagazione di un'onda con una molla o a svelare i segreti dell'elettromagnetismo, mi ha confermato che una progettazione democratica e laboratoriale è quella che non teme di essere messa in discussione dai propri studenti, ma che trae forza proprio dalla loro partecipazione attiva e dalla loro inesauribile curiosità, valorizzando la scoperta ed esercitando ad una postura attenta e critica nei confronti del mondo.

4.7 Formazione dei docenti

L'intero percorso di ricerca-azione documentato in questo lavoro di Tesi non esaurisce il suo valore nell'analisi dei risultati ottenuti con gli alunni, ma intende proiettarsi verso una dimensione più ampia: quella della formazione continua dei docenti. Infatti, questo lavoro vuole collocarsi come un materiale aperto e disponibile per la riflessione professionale, offrendo una testimonianza diretta di come la postura del docente possa determinare la qualità dell'inclusione e dell'apprendimento degli alunni. Nella scuola contemporanea, la necessità di una formazione che superi il mero aggiornamento contenutistico per approdare a una revisione della propria "postura professionale", appare oggi più che mai urgente. La mia progettualità vuole suggerire un esempio di insegnante scardinatore di certezze e di staticità, facilitatore di processi, stimolante e motivatore, capace di abitare l'incertezza insieme ai propri studenti e di riflettere ricorsivamente sulla propria pratica, mai già data, ma in continuo divenire. Il valore aggiunto di questo approccio risiede nella capacità di coniugare

la laboratorialità (intesa non come semplice manipolazione di oggetti, ma come *habitus mentale*) con un ascolto non giudicante. Un docente che accoglie l'errore come una variabile del sistema e che valorizza il pensiero divergente crea uno spazio di sicurezza psicologica dove ogni bambino, indipendentemente dalle proprie barriere linguistiche o sensoriali, si sente legittimato a partecipare. L'augurio sotteso a questo lavoro è che possa ispirare un nuovo orizzonte valoriale nella formazione dei docenti, basato su tre pilastri fondamentali: la flessibilità progettuale, la collaborazione tra pari e la centralità della relazione, in un'ottica in cui i saperi diventano i contenuti di una pratica umana molto più alta e sofisticata. La ricerca-azione descritta nella documentazione della progettualità didattica attuata, dimostra che la flessibilità non è mancanza di rigore, ma è l'unica risposta possibile alla complessità della classe multietnica e inclusiva. Allo stesso tempo, la collaborazione, che abbiamo visto fiorire tra i bambini, deve diventare la prassi nel team docente: un confronto costante che permetta di riprogettare le attività in base alle risposte reali del gruppo classe. Infine, questo lavoro di tesi si propone come uno stimolo a riscoprire la bellezza di una didattica "lenta" e profonda, dove il tempo speso a interrogarsi sull'ignoto diventa il tempo guadagnato nella costruzione di una cittadinanza attiva e consapevole e il motore della conoscenza. Mettere a disposizione questi materiali significa credere in una scuola che sia il primo spazio di democrazia necessario per la nostra società, dove la formazione del docente passa necessariamente attraverso la riscoperta dello stupore e la volontà di essere insieme agli studenti, prima di tutto, parte integrante di una comunità di ricerca che apprende costantemente dalla propria pratica.

CONCLUSIONI

L'adozione di un modello di ricerca-azione, che coniuga intrinsecamente la teoria dell'apprendimento e la pratica didattica in un processo ricorsivo di miglioramento in questo progetto di Tesi, si è basata su una convinzione che è si instaura alla base della mia identità professionale: affinché l'insegnamento scientifico nei contesti scolastici non si riduca a una sterile e mnemonica trasmissione di formule, ma si trasformi in un'esperienza significativa, è indispensabile che il docente agisca come un ricercatore in campo. L'assunto secondo cui il docente debba agire come un ricercatore in campo ha spostato il baricentro della mia azione didattica dalla "trasmissione" alla "generazione" di conoscenza. La densità delle variabili umane, sociali e cognitive in gioco nel contesto in cui ho operato, ha richiesto un'attività costante di indagine, ascolto e adattamento: qui, agire come ricercatore ha significato, per me, adottare quello "sguardo clinico" capace di osservare i processi di apprendimento nel loro farsi, cogliendo le sfumature di senso che sfuggono a una valutazione puramente quantitativa. In questa cornice, le tesi di Donald Schön sul *“professionista riflessivo”* hanno trovato una conferma empirica: sono stata chiamata a compiere una riflessione continua *nel corso dell'azione e sull'azione*, imparando a considerare l'imprevisto, il dubbio o l'errore dei bambini non come un fallimento di un progetto precostituito, ma come un dato scientifico prezioso da analizzare per ricalibrare istantaneamente la traiettoria educativa. E fare ciò è stato il lavoro che maggiormente mi ha permesso di costruire un percorso didattico realmente inclusivo, accogliente e rispettoso di tutti e di ciascuno: nel corso dei vari incontri, potendo conoscere sempre più profondamente le naturali inclinazioni e gradimenti dei bambini, ho potuto ricalibrare la mia postura nei loro confronti durante ciascuna attività, impegnandomi così ad offrire la migliore strada per garantire il successo formativo individuale e collettivo. Inoltre, abbracciare i principi del modello dei *Design Experiments* (Brown, 1992), mi ha portata ancor di più a focalizzare l'attenzione non solo sul verificare *se* l'intervento e l'architettura della didattica laboratoriale stessero funzionando, ma mi ha spinto a interrogarmi sul *come* e *perché* determinati argomenti del design didattico fossero particolarmente favorevoli allo sviluppo di competenze

specifiche e altri meno. Muoversi secondo questa direzione ha significato, per me, trasformare la programmazione scolastica in una progettualità flessibile e iterativa in cui si è resa necessaria la mia analisi dei dati raccolti (attraverso diari di bordo, osservazioni, produzioni icono-grafiche dei bambini), la riflessione e il confronto con i docenti di classe e il ritorno in campo, in ogni incontro, con un design didattico affinato e arricchito, al fine di elevare la qualità dell'apprendimento. In questa cornice, dunque, la progettazione del mio intervento didattico non è stata un atto estemporaneo, ma è stato un processo continuo, orientato dai quattro pilastri fondamentali dell'ambiente di apprendimento delineati dalla ricerca cognitiva, ma allo stesso tempo aperto a ricorsiva revisione. La ricerca di un equilibrio tra questi pilastri è rivolta a garantire che il laboratorio non si configuri solo come un luogo dove "si fa", ma soprattutto come un luogo dove "si pensa sul fare"; e ciò ha consentito anche ai bambini di operare una metariflessione su scelte strutturali, metodologiche e organizzative, che avrebbero potuto migliorare le successive situazioni di apprendimento. L'acquisizione di una postura professionale riflessiva di questo calibro, nell'ottica di un modello di formazione dinamico e coerente con l'impianto metodologico, etico e strutturale proposto in questa trattazione, credo sia di fondamentale importanza nella prospettiva di una formazione continua della professionalità docente. Attraverso l'esperienza vissuta nell'attuazione di questa progettualità, praticando iterativamente processi autovalutativi e metacognitivi, ponendomi domande sul mio operato e mettendo in discussione le mie certezze, ho compreso sempre più il valore della figura dell'insegnante quale esempio etico e valoriale per i bambini, affinché essi possano capire di non essere mai già dati, ma delle persone in divenire, capaci di acquisire la forma che più gli si addice, non preconfezionati, ma capaci di poter diventare chiunque essi vogliono se solo diventano abili nel mettere in discussione il proprio modo di pensare e di agire consueto, uscendo dai propri schemi. Agire come ricercatore in campo ha, in questa declinazione, una profonda valenza etica e politica e richiama ad una seria responsabilità. L'augurio sotteso a questo lavoro è che possa ispirare un nuovo orizzonte valoriale nella formazione dei docenti, basato su tre pilastri fondamentali: la flessibilità progettuale, la collaborazione tra pari e

la centralità della relazione, in un'ottica in cui i saperi diventano i contenuti di una pratica umana molto più alta e sofisticata. Operare in contesti segnati dalla fragilità educativa, anche nell'esperienza MusEdu, ha rafforzato ancor di più, altresì grazie agli esemplari docenti di classe che ho avuto la fortuna di incontrare, che il professionista che fa ricerca durante la pratica dimostra di essere consapevole che la conoscenza sia un processo aperto, continuo e democratico a cui tutti possono partecipare: il docente-ricercatore accoglie, così, l'incertezza e il dubbio come motori della scoperta. In questo modo, la didattica della fisica mi ha dato l'opportunità di scoprire e di vivere un itinerario riflessivo capace di coinvolgere non solo "piccoli scienziati" in formazione, ma cittadini consapevoli del valore dell'indagine e del rigore metodologico, che acquisiscono la capacità di ragionare e esprimono la libertà di pensiero.

BIBLIOGRAFIA

- Barsalou, L. W. (2008). *Grounded cognition. Annual Review of Psychology*, 59, 617-645.
- Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (2000). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School. Washington, DC: National Academy Press.*
- Brown, A. L. (1992). *Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. The Journal of the Learning Sciences*, 2(2), 141-178.
- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R., & Schauble, L. (2003). *Design experiments in educational research. Educational Researcher*, 32(1), 9-13.
- Gagliardi, M., Gallina, G., Guidoni, P., Piscitelli, S. (n.d.). *Forze, deformazioni, movimento. (Verificare anno/editore).*
- Gomez Paloma, F. (2016). *Embodied Cognition e Didattica. In: u-pad.unimc.it.*
- Johnson, D. W., & Johnson, R. T. (1994). *An Overview of Cooperative Learning. In: J. Thousand, A. Villa and N. Nevin (Eds), Creativity and Collaborative Learning. Baltimore: Brookes Press.*
- National Research Council (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas. Washington, DC: The National Academies Press.*
- Nicotra, L. (2023), *Un itinerario storicistico-didattico per l'introduzione del concetto di campo in fisica.*
- Ogborn, J. (1997). *Scienza e senso comune.*
(Trad. it. di "Common sense and science").
- Wallace, R. *Rivista Internazionale. (2025) Legacy of the angels. Aeon Magazine.*
- Wilson, M. (2002). *Six views of embodied cognition. Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625-636.
- Wood, D., Bruner, J. S., & Ross, G. (1976). *The role of tutoring in problem solving. Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 17(2), 89-100.

SITOGRAFIA

- Enciclopedia Treccani. *Faraday e la genesi del concetto di campo*. *Storia della Scienza*, in https://www.treccani.it/enciclopedia/l-ottocento-fisica-faraday-e-la-genesi-del-concetto-di-campo_%28Storia-della-Scienza%29/
- Enciclopedia Treccani. *La rivoluzione scientifica: i domini della conoscenza: La sintesi newtoniana*, in [https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_\(Storia-della-Scienza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/la-rivoluzione-scientifica-i-domini-della-conoscenza-la-sintesi-newtoniana_(Storia-della-Scienza)/)
- Enciclopedia Treccani. *Teoria della relatività. Enciclopedia dei ragazzi*, in [https://www.treccani.it/enciclopedia/teoria-della-relativita_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/teoria-della-relativita_(Enciclopedia-dei-ragazzi)/)
- Martini, B. (2019). *La ricerca azione*, in http://www.marche.istruzione.it/allegati/2019/BertaMartini_30gen19.pdf
- MIUR (2012/2018). *Indicazioni Nazionali per il curricolo*, in https://www.mim.gov.it/documents/20182/51310/DM+254_2012.pdf
- Saperescienza.it (2021). *Newton, l'etere e il concetto di campo*, in <https://www.saperescienza.it/rubriche/fisica-e-tecnologia/newton-l-etere-e-il-concetto-di-campo-20-9-2021/#:~:text=Una%20rappresentazione%2C%20questa%2C%20che%20non%20persuase%20Newton,se%20ciò%20implicava%20l'ostilità%20del%20mondo%20scientifico>
- Università Ca' Foscari. *La didattica laboratoriale*, in <https://iris.unive.it/retrieve/e4239ddb-f2db-7180-e053-3705fe0a3322/La%20didattica%20laboratoriale.pdf>
- Università degli Studi di Salerno-Università degli Studi di Napoli “Parthenope”. *Embodied Cognition: il ruolo del corpo nella didattica*, in https://u-pad.unimc.it/retrieve/de3e5027-818c-83cd-e053-3a05fe0a1d44/GomezPaloma_Embodied-Cognition-Didattica_2016.pdf

- Università La Sapienza. *La ricerca-azione: quadro di riferimento per l'autovalutazione*, in
https://elearning.uniroma1.it/pluginfile.php/129186/mod_resource/content/1/La%20ricerca.azione%20un%20quadro%20di%20riferimento%20oper%20l.autovalutazione%20nelle%20scuole.pdf

RINGRAZIAMENTI

Al mio papà,

Alla tua visione della vita, che rispecchia un po' anche la mia, alla tua forza silenziosa e alle tue spalle robuste alle quali ho sempre potuto appoggiarmi senza chiedere il permesso.

Ti ricordi quando mi accompagnavi tutti i giorni a scuola? Io sì, proprio come se fosse ieri, e lo ricordo gelosamente come un momento bellissimo della giornata dove mi sentivo una vera principessa che non doveva mai portare pesi o fare passi senza la scorta, perché tu sempre così mi hai fatta sentire: importante e unica.

Sei sempre stato, per me, presenza sempre viva ma mai invadente. Grazie per il tuo tempo d'amore, non è scontato, spero un giorno di riuscire ad amare proprio come ami tu in modo silenzioso e gratuito, ma così profondo e vero.

Con te sono al sicuro, con te tutto si mette a posto, prende significato, assume una forma, perché sei tu che mi fai vedere la forma delle cose, soprattutto quando io non riesco proprio a darle un nome. Mi hai insegnato la costanza e il sacrificio, il rispetto e la libertà, mi hai fatto domande su di me, portandomi a riflettere, scegliere, lasciandomi sempre la strada aperta anche quando sapevi non fosse quella giusta per me.

Il valore di un padre come te è inestimabile nella mia vita... tu mi hai dimostrato da sempre che sono davvero per me il miele e la farina,

che è per me il sabato nel centro,

le otto di mattina,

è per me la chiave dei segreti,

è per me che il mare sa di sale,

è per me il dubbio e la certezza,

la forza e la dolcezza,

è per me ogni cosa che c'è, come diceva Jova.

Grazie scritto in tutte le lingue del mondo non basterebbe per esprimerti la mia gratitudine e il bene profondo che ti voglio. All'immensità dell'amore che ci unisce e ci unirà per sempre, ti voglio bene.

Alla mia mamma,

tu che mi hai messo al mondo e mi ci rimetti ogni giorno in cui sono un passo per crollare, grazie perché non te lo dico mai, ma senza di te nulla sarebbe stato possibile.

Ogni giorno mi chiedo cosa io abbia fatto di buono in qualche altra vita per meritare un'anima così meravigliosa come madre... tu non sei solo bellissima, ma sei tutte le cose più belle per me, emozioni condivise, presenza costate, guida spregiudicante, luce confortante e abbraccio sincero.

Sei l'unica che, con un solo sguardo riesce a capire quello che provo, con te non si mente perché come dici tu "non puoi dire bugie, sei uscita da qua e lo sento prima io di te", ma menomale mamma che ci sei, che con te posso essere realmente me stessa sapendo che non ti aspetti mai nulla da me, ma ti lasci stupire ogni volta da quello che creo in tutte le situazioni della mia vita, sempre pronta a guardarmi con quello sguardo fiero, mentre pensi "questa è pazza", ma sempre pronta a stare dalla mia parte. Oggi è solo l'inizio di una vita di gioie che divideremo, e anche se questi anni sono stati molto lunghi, sappi che farti una testa tanta di parole sconnesse ogni giorno per 6 mesi all'anno sarà la cosa che rimpiangerai di più, insieme al sentire tutto il mio programma settimanale di impegni la domenica sera quando già sai che dieci minuti dopo non ricorderai più nemmeno una parola...

Grazie mamma, sei stata la struttura invisibile ma portante di questo mio successo e mi insegni ogni giorno il valore della costanza e dei piccoli semi quotidiani che, se piantati e curati con amore, daranno sempre frutto a loro tempo.

Ti voglio bene.

A Luca,

presenza indispensabile della mia vita, con il tuo silenzioso rispetto, mi hai sempre fatta sentire sostenuta e invincibile. Mi piace pensare al nostro amore come un insieme di forme e colori di ogni tipo, come qualcosa che si declina in milioni di forme in base alla giornata che viviamo e in base alla situazione in cui ci troviamo.

Sei la persona che più odiosa e allo stesso tempo più amabile che conosco, mi dispiace non riuscire a dimostrarti il mio bene come forse vorresti, ma sai che io sarò sempre, fastidiosamente presente nella tua vita. Sei il mio punto di riferimento, sei l'unica persona che cerco quando non c'è e ti posso assicurare che mi importerà sempre di te, molto più di quanto credi. Negli ultimi anni hai dimostrato a tutti, con forza, quanto vali e la persona buona e gentile che sei, distinguendoti ovunque, anche se io l'ho sempre saputo quanto vali, perciò devi stare sempre con me! Sono estremamente fiera di te e dell'uomo che stai diventando. Non cambiare mai e promettimi che mi dirai sempre quei no al sapore di sì ogni volta che ti chiederò di farmi un

favore o di accompagnarmi da qualche parte... sapere che mi aiuterai sempre è una delle poche certezze della mia vita.

Grazie, ti voglio bene.

Ai miei nonni,

Coloro che mi hanno sempre insegnato che la libertà viene dalla conoscenza, per tutti coloro che questa libertà non l'hanno potuta conoscere. Se è vero che l'amore incondizionato dei nonni è un amore che non si spiega a parole e che non vuole nulla in cambio, è vero che con voi ne ho avuto la più grande dimostrazione.

Nonna Gabry, si può dire che sono la tua ombra da quando sono nata, tu mi hai insegnato a stendere il bucato e la pasta fresca, tu mi hai portata in braccio e adesso ti appoggi a me per camminare, tu mi hai fatto vedere come si prepara il sugo e oggi chiedi a me di prepararlo per te, tu mi hai coccolata e amata più di quanto umanamente si possa pensare, mi hai accolta ogni giorno con un piatto a tavola e con un sorriso di gratitudine ogni volta che mi vedi entrare dalla porta, anche se resto per soli 5 minuti. Sei l'esempio che non servono titoli per essere persone di valore, tu lo sei sempre stata e spero di aver imparato qualche briciola dalla tua saggezza, dal tuo pudore, dal tuo rispetto, dalla tua resilienza e dalla tua eleganza. Sei una donna meravigliosa e ti voglio un bene che non puoi immaginare, le tue preghierine ad ogni esame sono servite a qualcosa...

Nonno Alvino, che dire di te? Ci saranno mai parole per descrivere tutto quello che sei? E soprattutto quello che sei per me? Non credo, ma una cosa è certa... Tra noi non sono mai servite molte parole, solo sguardi, sorrisi e presenza quotidiana. Tu, più di tutti, sei la persona che devo ringraziare non solo per i miei anni scolastici, ma per tutto quello che mi hai insegnato dall'alto della tua bontà. Come dimenticare la fettina di pane sul cruscotto ogni giorno dopo scuola? E come dimenticare le lunghe attese che hai fatto per me e per tutti i tuoi nipoti? Come dimenticare i tuoi "e manco la lode?", ogni volta che tornando a casa ti dicevo il voto di un esame, e puntualmente dovevo spiegarti che non era così facile come immaginavi prendere una lode. Ma tu in realtà lo hai detto sempre solo perché per te sono sempre la migliore, per te valgo tanto, e lo so. Con la tua gentilezza e la tua gioia mi insegni ogni giorno a sorridere alla vita, a vedere il buono in tutto e a non arrendermi mai. Grazie dal profondo del mio cuore perché sono la gioia dei tuoi occhi quando entro ogni mattina a casa tua e mi accogli con il tuo solito "bellezza buongiorno!", grazie perché con te qualsiasi preoccupazione è superabile perché tanto

come dici tu “e che problema c’è, ci sono io!”, grazie per i sacrifici, per le rinunce, per tutti i ricordi felici che ho con te, tu e nonna siete le fondamenta della nostra famiglia, siete riparo quando voglio tornare e siete fonte di coraggio quando voglio andare.

Nonna Anna, la mia sarta personale e non solo... grazie per tutti i ricordi felici, grazie per la pasta e patate, per le partite a burraco, grazie per il fazzoletto bianco ogni volta che andavamo via dalla villetta e grazie per le confessioni amorose, ma soprattutto per i tuoi soliti “ma secondo me è troppo corta questa gonna, tuo padre non dice niente?”. A volte penso a quanto la vita sia stata dura con te, non ti abbia dato sempre gioie, però poi penso anche alle nostre famiglie, a me, al tuo amato Luca, a Simone, a Lorenzo, Andrea, i tuoi nipoti, e penso che avrai sempre una certezza: che noi ti vogliamo bene e ti vogliamo veder stare bene come una volta. Non ti arrendere mai e continua a dimostrarci quanto, anche quando sembra impossibile, bisogna sempre rialzarsi.

A Simona,

Mia unica e possibile collega-sorella universitaria che potessi avere, in questa vita e anche tutte le altre. La fortuna di averti incontrata non si può spiegare a parole e forse spesso non ti ho dimostrato quanto sentissi di esserlo ad avere te... hai accolto sempre ogni mio peso o preoccupazione, dividendola con me come se fosse sempre anche un po’ tua. Non hai mai dimenticato di mandarmi un buongiorno la mattina o di chiedermi come fosse andata la giornata o di commentare con me qualcosa che succedeva esordendo con un tuo solito: “amo so già cosa stai pensando”, perché è vero tu mi hai sempre saputa, hai sempre saputo di me tutto anche se ci conosciamo solo da 5 anni. Ma ti posso confidare che sono stati i 5 anni di amicizia più veri e sinceri che abbia mai provato, ho sempre pensato per due in questo percorso perché tu sei sempre stata un po’ anche me e viceversa, due opposti con un cuore uguale; ci siamo completate sempre dando all’altra quella parte necessaria a fare passi avanti. Sono certa che continueremo a sostenerci a vicenda, condividendo tutto quello che la vita ci riserva, io sono pronta a stare sempre qui a ricordata che sei destinata a fare cose grandi. Ti voglio bene.

A Sara, Terry, Giulia e Kekka,

siete state le pazze e uniche compagne di questa meravigliosa avventura, senza di voi nulla sarebbe stato uguale.

Giulia, dal primo giorno che ti conosco, non solo di università, sei diventata famosa per i

lamenti e la stanchezza perenne, ma nessuno sa il cuore meraviglioso che nascondi e forse qualche volta non ti merito quando ti avvicini con quella voce quasi fastidiosa a chiedere “ti posso dare un abbraccio?”, ma sei già pronta a prenderti l’ennesimo no categorico;

Terry, con la tua ansia già dal giorno del test d’ingresso, sei stata una presenza costante, un punto fermo sul quale contare in qualsiasi momento del percorso, grazie.

Sara, compagna nell’ultimo anno, di tutti i giovedì, e non solo... sei la leggerezza in persona, sei quella risata necessaria contro l’abbiccio pomeridiano e quell’aneddoto assurdo che puntualmente faceva girare tutti, ma sei anche la ragazza più amorevole e generosa che conosca. Grazie per avermi supportata e sopportata ogni giorno.

Kekka, sempre pronta a tendermi una mano in qualsiasi situazione, non dimenticherò mai le ore accovacciate a terra a costruire la mappa per l’esame di pedagogia sociale nel cercare di capirci qualcosa insieme, sei una ragazza veramente in gamba e ti auguro tutte le cose migliori del mondo.

A Gaia,

grazie per tutti i pranzi insieme, grazie per la tua presenza, grazie per la fiducia, grazie per il sostegno, grazie per avermi sopportata, grazie per avermi donato dei pezzettini nascosti di te. Nell’ultimo anno siamo diventate da sconosciute a coppia e proprio come in ogni coppia che si rispetti, ci siamo completate a vicenda, grazie ad un’esperienza a tratti assurda, folle, ma indimenticabile che abbiamo condiviso. Ci siamo spalleggiate e tenute la mano ogni volta che entravamo in una nuova classe, con un buongiorno che iniziava puntualmente sotto la pioggia... però che bello ora raccontarlo e che bello averlo vissuto con te. Sei molto di più di ciò che credi, hai la forza di spaccare tutto e il coraggio per poterlo fare, se qualche volta ti manca, te lo ricordo io basta che mi chiami... io sarò sempre pronta con un mio: “dai Gaia vai, ma che te ne importa, non puoi pre-occuparti delle cose prima che accadano!”

A Ethel,

gentile e sincera compagna di questa ultima parte del cammino.

Grazie per il tuo sorriso, la tua calma, la tua bellezza, la tua serenità... anche se per poco, sei stata una spalla molto importante per me!

Alla 4A, mio tesoro inestimabile di questo percorso.

Si dice che nella vita ci sono incontri che non fanno rumore, ma cambiano tutto, e voi per me avete davvero cambiato tutto!

Grazie per il tempo trascorso insieme, grazie per avermi attesa ogni giorno con un sorriso, grazie per avermi accolta, per avermi fatta sentire importante, grazie per esservi messi in gioco con me, grazie per esservi fidati e affidati e grazie per avermi dato la possibilità di esprimermi nella migliore forma di me stessa, spero, senza mai chiedermi nulla in cambio. Grazie ad un gruppo docenti che ha ravvivato in me la speranza di incontrare cuori buoni sulla mia strada, mi avete riempita, regalandomi la parte buona della scuola, quella per la quale io spero di lavorare, quella per la quale investo tempo, passione e sogni. Voi mi avete dimostrato con i fatti che essere le prime che “sognano in grande i propri alunni” è la chiave per operare nei contesti educativi, anche quelli più complessi, agendo sempre nell’ottica di quei valori etici, civici, e d’amore che vi contraddistinguono.

Se oggi sono qui, è perché prima siete stati voi a insegnarmi cosa significa restare.

Non siete stati solo parte del mio lavoro, ma la parte più vera della mia vita.

A tutti gli insegnanti incontrati sul mio cammino, in particolare al Professore Balzano.

Mi piace pensare che aver affrontato alcune difficoltà nei primi anni scolastici che hanno portato una bambina di soli 7 anni a chiedere ai genitori con determinazione di cambiare scuola, era la strada giusta per incontrare gli angeli che ho poi incontrato sul mio cammino. Dalle elementari al liceo mi sono sempre lasciata toccare in profondità dalle anime, dalle persone, che sedevano dietro le cattedre mentre io ero nel banco... forse perché affascinata già da questo mondo, forse perché alcuni mi piacevano così tanto e mi facevano stare così tanto bene che guardarli e stare con loro era per me motivo di gioia.

Poi negli anni dell’università, nonostante il diverso approccio, non ho mai smesso di cercare quel rapporto umano con i professori, perché io volevo sempre capire più in profondità chi avevo di fronte, soprattutto quando mi piaceva o condividevo quello che insegnavano. Poi ho incontrato il professor Balzano e mai avrei potuto immaginare una tale quantità di umanità e gentilezza tutta concentrata in una persona.

Grazie professore per la Sua professionalità, per la sua attenzione, per il suo ricordarsi ogni cosa di noi, per la sua accortezza alla vita degli studenti, non è scontato. È stato per me un esempio professionale e umano senza paragoni, oltre ad appassionare alla materia mi ha

trasmesso la sua vocazione per la ricerca, per la scoperta, per il sapere. E aver avuto questo esempio è l'eredità più grande che porto con me da questo percorso. Spero di riuscire a conservare la capacità di emozionarmi ancora e ancora di fronte a un esperimento riuscito, di entusiasarmi per le intuizioni sorprendenti dei bambini e di gioire per la creazione di nuovi legami umani e professionali, proprio come riesce a fare Lei ogni giorno.

Fede,

Quel filo invisibile che univa i nostri banchi del liceo ha indissolubilmente legato anche i nostri cuori. Da quando ci siamo conosciute, nessuna distanza ha mai potuto separarci e nonostante le nostre vite stiano sbocciando verso le nostre reciproche ambizioni, noi non smettiamo mai di tenerci la mano, di essere qui, sempre, l'una per l'altra. Così uguali eppure così diverse, ma sempre necessarie. Grazie per la tua presenza, grazie per l'esempio di determinazione che sei per me, grazie per gli innumerevoli aperitivi-ascolto, per le serate spensierate, grazie per la te più vera. So che sarai sempre qui, so che saremo sempre noi e sono pronta a risponderti alle tue paranoie con il mio solito: "Fede, ma ti stai facendo un problema al quale non avevo nemmeno pensato", finché lo vorrai.

A Dorian,

L'unica che riesce a prendermi in giro senza subire teatrali scenate permalose in cambio.

Mi hai salvata molte più volte di quanto credi e non smetterò mai di ringraziarti per esserci oggi ed esserci sempre stata nel tuo fastidioso modo.

Grazie perché con te posso ridere fino al mal di pancia, posso piangere, emozionarmi, posso guardarti e sentirmi semplicemente capita e posso parlare delle mie cose più intime senza mai sentirmi giudicata. Sono molto felice di aver custodito negli anni il rapporto con te, nonostante non sia sempre stata un'amica perfetta nei tuoi confronti, ma tu mi hai sempre perdonata, sei sempre stata qui e oggi siamo la coppia più pazza che ci sia. Diciamo che, a volte, il canale pensare-agire risulta un po' interrotto quando siamo insieme, ma quanto mi fai divertire. La tua tomità mi sorprende e la tua bontà, a volte, mi sconvolge, sei un'anima speciale che merita tutte le cose più belle di questo mondo, non ti accontentare mai e non dimenticare mai quanto vali, ma sappi che quanto ti capiterà di farlo, io sarò sempre qui a ricordartelo. Ti voglio bene.

A Ele,

Sei sempre stata più di un'amica per me. Tra noi non c'è mai stato bisogno di parole, noi abbiamo saputo da subito che condividevamo qualcosa, forse per quelle questioni strane della pelle, della chimica, non so, ma oramai io non posso più immaginare di fare nessun passo nella mia vita senza di te. Tu c'eri ogni volta che ho fatto per la prima volta cose da adulta, tu c'eri nel mio pianto e c'eri nella mia gioia, c'eri nella mia lontananza e c'eri quando avevo semplicemente di presenza. Abbiamo condiviso tutto io e te, e forse per questo non abbiamo bisogno di dirci nulla ma solo di alzare il telefono o il bussare al citofono a qualsiasi ora per dirci anche solo "volevo sentirti". Grazie perché per te sono sempre la migliore, grazie perché ti fidi di me, grazie perché mi scegli per condividere i tuoi segreti e grazie perché ascolti i miei a ripetizione. Non smettere mai di chiamarmi nel bel mezzo di una mattinata per raccontarmi fatti assurdi di gente remota che hai scoperto per puro caso trovandoti in qualche situazione assurda delle tue o per farmi una cazziata al volo per qualcosa che non dovevo fare, concludendo serenamente con il tuo solito "ci sentiamo dopo ti voglio bene".

Scusa se non te lo dico mai, te ne voglio tanto anche io.

A zia Anto,

mia madrina, confidente, amica, complice, sostenitrice, compagna di shopping, rifugio notturno, cuoca e molto altro.

Non saprei definire il rapporto che ci lega, forse è la prima volta che sento di farlo, ma sento di dover ringraziare la vita per avermi donato te. Sei il valore aggiunto più indispensabile, grazie per la tua presenza, grazie per i tuoi consigli spregiudicati, grazie per i tuoi insegnamenti ma soprattutto grazie per le tue cazziate... so che infondo sono il tuo modo più autentico di amare. Sei per me un esempio di donna e di insegnante eccezionale, anche se parli sempre dei tuoi ragazzi, so che nel tuo cuore c'è tanta passione in quello che ogni giorno fai e dai nelle classi e in questo credo di assomigliarti un po'. Siamo testarde, siamo ricce, abbiamo lo stesso spazio tra i denti, e abbiamo sempre da dire... chi ci vede ci scambia sempre per mamma e figlia e sappi che per me questo è solo un vanto. Grazie per condividere la tua vita con me e grazie per esserci sempre, pronta ad accogliermi a qualsiasi ora, so che sarà per sempre così.

Tu e zio Enzo siete il mio porto sicuro e la mia certezza.

Ai miei zii,

Grazie per essere un punto di riferimento fisso della mia vita.

Ognuno di voi, a suo modo, con le sue attenzioni e i suoi consigli, mi fa sentire unica, speciale, coccolata, amata... sapere di poter contare sempre su di voi è quello che ci rende famiglia.

Ai miei cugini,

Presenza dolce dei miei ricordi e certezza del mio domani.

Gabry, io e te così diverse ma così uguali siamo le costanti una dell'altra che la vita ci ha donato. Ogni tuo consiglio, parola di conforto, abbraccio, ha un valore unico... quello delle parole sincere, dette sempre a fin di bene, senza giudizio né accusa. Sono certa che condivideremo insieme molti altri successi e che tu mi guarderai sempre con quello sguardo fiero che mi riservi. Davi, Simo e Lori, siete i miei ragazzi speciali. Con le vostre attenzioni e la vostra premura mi avete sempre fatta sentire una principessa, così come mi chiamate, senza chiedere mai nulla in cambio, dimostrandomi nei momenti difficili, che vedermi felice è quello che più vi interessa. Grazie perché sapere di avervi mi rassicura, mi dà serenità oggi e per sempre. Sappiate che qui avete un'amica e una confidente sempre pronta a stare dalla vostra parte, ad ascoltarvi e anche a sgridarvi quando serve. Vi voglio bene!

A ciascuno di voi presente qui oggi,

grazie per aver fatto parte di questo pezzo molto importante della mia vita. Avervi avuto qui con me è stato prezioso e ognuno di voi sa quanto, incontrarvi e aver condiviso un pezzo di strada insieme, abbia contribuito a quella che sono oggi. A tutti voi che siete qui, a condividere la mia gioia e a volermi bene, anche se a volte sono un po' respingente, sappiate che ve ne voglio tanto anche io. Grazie!

