

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

Scuola di dottorato in Antropologia ed Epistemologia della Complessità

Dottorato di ricerca in

ANTROPOLOGIA ED EPISTEMOLOGIA DELLA COMPLESSITÀ

Ciclo XXVI

**VERSO UNA TEORIA LOCALE DELL'APPROPRIAZIONE
NELL'INSEGNAMENTO/APPRENDIMENTO DELLA FISICA**

Relatore:

Ch.mo Prof. Enrico Giannetto

Correlatore

Dott. Olivia Levrini

Tesi di
Paola Fantini

Anno Accademico 2012/2013

INDICE

<i>Introduzione</i>	5
Capitolo 1	
<i>Insegnamento della termodinamica e letteratura di ricerca</i>	15
1.1. Analisi di concetti e leggi/principi di termodinamica particolarmente ostici per gli studenti	
1.2. Strategie di ragionamento degli studenti	
1.3. Un approccio linguistico per far chiarezza sul significato di concetti scientifici	
1.4. Osservazioni	
Capitolo 2	
<i>Ristrutturazione disciplinare</i>	43
2.1. Criteri e scelte di fondo per la progettazione	
2.2. Il percorso	
Capitolo 3	
<i>Ricerca Qualitativa: un dibattito ampio, articolato e difficile</i>	57
3.1. Quadro storico-filosofico	
3.2. Paradigmi epistemologici di riferimento e loro influenza sulla metodologia della ricerca	
3.3. Tradizioni metodologiche	
3.4. Valutazione della Ricerca Qualitativa	
3.5. Tecniche per la validità di una analisi qualitativa	

Capitolo 4	
<i>La sperimentazione del percorso di termodinamica</i>	85
4.1. Il punto di partenza della ricerca	
4.2. Metodologia di analisi e fasi del lavoro	
Capitolo 5	
<i>Appropriazione: come definirla e riconoscerla</i>	101
5.1. Analisi dei dati: i profili degli studenti	
5.2. Risultati dell'analisi per strutturare i profili	
5.3. Il termine appropriazione nella letteratura di ricerca in campo educativo	
5.4. Triangolazione tra i risultati dell'analisi e la letteratura di ricerca	
5.5. Definizione operativa di appropriazione	
5.6. Messa alla prova della definizione operativa	
5.7. Osservazioni	
Capitolo 6	
<i>Abilità metacognitive</i>	137
6.1. Analisi dei dati	
6.2. Le abilità metacognitive	
6.3. Relazione tra appropriazione e meta-cognizione	
6.4. Osservazioni	
Capitolo 7	
<i>L'orchestrazione dell'insegnante</i>	153
7.1. Le lezioni	
7.2. Analisi della dimensione collettiva	
7.3. Analisi della dimensione individuale	
7.4. Relazione con l'appropriazione	

Capitolo 8

L'appropriazione di un discorso scientifico: rilettura dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati **181**

Capitolo 9

Il percorso di termodinamica sperimentato da un altro insegnante **187**

9.1. Attività svolte prima di iniziare il percorso. Analisi delle condizioni iniziali

9.2. Attività significative svolte durante il percorso

9.3. Analisi della discussione finale in classe

9.4. La voce dell'insegnante

Conclusioni **213**

Bibliografia **219**

Ringraziamenti **235**

Introduzione

“È forse il fatto che per prima si insegni, da una parte, e dall'altra si impari la meccanica classica a dare un imprinting alla nostra concezione della natura, della scienza e della epistemologia, dalla quale è poi difficile liberarsi. Vi è un'epistemologia spontanea, meccanicista, cartesiana, che attraverso l'insegnamento e l'apprendimento della meccanica classica si insinua implicitamente e inconsapevolmente in ricercatori, docenti e discenti: è questo forse il più grande e il più grave problema didattico della scienza contemporanea.”
(Giannetto, 2005)

Oggi la scienza, e in particolare la fisica, viene generalmente proposta come una collezione di verità assolute e risposte corrette, sottendendo un preciso quadro epistemologico che sembra non avere risentito della rivoluzione scientifica del Novecento che ha, invece, così fortemente contribuito a cambiare il concetto di natura e di scienza. La stessa fisica del Novecento – la fisica del caos, la relatività, la meccanica quantistica – è ridotta a tecniche di calcolo e considerata come *“mera estensione analitica della meccanica newtoniana, nel mantenimento dei vecchi concetti meccanicistici di natura, di scienza, di epistemologia.”* (Giannetto, 2005) In modo più o meno implicito, quindi, lo schema epistemologico della scienza insegnata a scuola è quello legato al quadro concettuale della meccanica classica: una scienza “oggettiva”, che si costruisce *“secondo un processo asintotico di avvicinamento a un luogo fondamentale di spiegazione e di osservazione.”* (Ceruti, 2007)

In questo quadro, dove la conoscenza tende trionfalmente verso la conquista della verità assoluta, il discorso scientifico è alla ricerca della risposta certa, della spiegazione definitiva, della chiarezza, attraverso il linguaggio matematico formalizzato. È negativo, e soprattutto destabilizzante, introdurre concetti come incertezza, pluralità,

contraddizione che, per dirlo con Morin, fanno invece parte della problematica di fondo della complessità della conoscenza scientifica.

“Qual è l’errore del pensiero formalizzante o quantificatore che ha dominato le scienze? Non è certamente quello di essere un pensiero formalizzante o quantificatore, e non è nemmeno quello di mettere tra parentesi ciò che non è quantificabile e formalizzabile. Sta invece nel fatto che questo pensiero è arrivato a credere che ciò che non fosse quantificabile e formalizzabile non esistesse, o non fosse nient’altro che la schiuma del reale.” (E. Morin, 2007)

Il mettere tra parentesi ogni forma di complessità nell’insegnamento e nell’apprendimento delle discipline scientifiche, non ha solo origini epistemologiche, ma è legato anche alla convinzione diffusa che gli studenti faticino a gestire intellettualmente, e soprattutto emotivamente, la dimensione di complessità delle discipline stesse. La strada per evitare la loro demotivazione, e la loro conseguente disaffezione, sembra essere quella di presentare gli argomenti in modi sempre più semplici e lineari, con approcci procedurali che guidino “passo-passo”. Basta analizzare i libri di testo delle scuole superiori, nelle loro ultime versioni, per accorgersi che la parte argomentativa lascia sempre più il posto a tavole riassuntive, esempi di procedure, soluzioni di “esercizi tipo” che gli studenti debbono ripetere. Ma, al contempo, aumenta il numero dei temi trattati, relativi in particolare alla fisica del Novecento e, come si è detto, più l’argomento diventa complesso, più l’argomentazione si semplifica fino a trasformare l’oggetto della conoscenza in una collezione di nozioni, regole e formule che gli studenti imparano più o meno a memoria e velocemente dimenticano.

In questa ottica, secondo la quale la complessità di una disciplina scientifica è un fattore demotivante, e quindi da ridurre il più possibile, i contenuti vengono così semplificati fino alla perdita del significato complessivo della teoria. Essa viene presentata come vera in sé, impersonale, senza la possibilità di alcuna partecipazione emotiva: sterilizzata, piuttosto che rigorosa. Eppure, come afferma Sjøberg,

“Un aspetto chiave nella vita dei giovani è la ricerca di significato e di rilevanza. Piacciono quelle discipline in cui la loro voce è tenuta in seria considerazione, in cui le loro visioni contano. La scienza e la matematica hanno un’immagine di autorità, almeno come materie scolastiche. [...]. Il venir meno di un significato personale e l’idea che esistano verità eterne e risposte corrette allontanano molti più giovani oggi di ieri.” (S. Sjøberg, 2001)

Per ciò che si è detto, molti studenti, se non risuonano naturalmente con il linguaggio della scienza, perdono la “cornice di senso”, si disaffezionano o addirittura rifiutano le discipline scientifiche. Il più delle volte, però, la mancanza di quella che si può definire una “cornice di senso” non è da loro attribuita al modo in cui si fa scienza e all’idea di scienza che si trasmette, ma alla scienza stessa.

Da parte dei docenti più avvertiti, si pone allora l’accento sugli aspetti metodologici e soprattutto su quelli comunicativi: si riconosce che gli adulti non sono più in grado di parlare il linguaggio dei giovani e si auspica che una soluzione possibile venga dalle sollecitazioni offerte dalle nuove tecnologie. La realtà scolastica presta allora sempre più attenzione all’ampliarsi dell’accesso alle tecnologie multimediali, attraverso progetti ministeriali volti ad incentivarne l’uso con l’introduzione nelle classi di computer e lavagne digitali. Si ritiene infatti che questi strumenti permettano di mettere in campo diversi registri comunicativi – video, immagini, ecc. – più congeniali ai giovani e più accattivanti.

Tutto questo è certamente importante, ma non basta, se non si pensa anche contemporaneamente – attraverso una adeguata ristrutturazione disciplinare che favorisca la ricerca di un significato personale – a promuovere una crescita culturale che possa aiutare i giovani a muoversi nell’universo cognitivo delle nuove tecnologie, a gestire consapevolmente i potenti modi per archiviare, commentare, appropriarsi e rimettere in circolo i contenuti, in un flusso multidirezionale di tutti con tutti, creando una nuova, più vasta e complessa dimensione della società umana.

Sta emergendo infatti una nuova forma di cultura che Jenkins chiama “*cultura partecipativa*”: una cultura per la quale non sono più sufficienti abilità e competenze tipiche di un apprendimento trasmissivo, lineare, “uno a uno”. Ma è importante sottolineare, in questa prospettiva, che sono necessarie nuove conoscenze culturali, nuove competenze e capacità critiche che aiutino i giovani ad essere protagonisti attivi del proprio apprendimento, così da divenire capaci di ricercare selettivamente e in modo critico le informazioni disponibili, lavorare con gli altri, porre e porsi domande, scambiare idee.

“In questo contesto i docenti sono sempre meno le antenne trasmettenti del sapere, ma debbono imparare a trasformarsi in architetti e interpreti degli ambienti e delle occasioni di formazione, operando un lavoro di raccordo tra le esperienze di valutazione critica del loro contributo al progetto di crescita delle competenze, di sostegno e di indirizzo del lavoro individuale, di inquadramento entro ambiti metodologicamente appropriati degli stimoli spesso eccentrici e non coordinati apportati dai singoli.” (Jenkins, 2010)

Con Pietro Greco, diventa quasi naturale chiedersi:

“Come, in questo nuovo e promettente e paradossale universo cognitivo nel quale ci troviamo, può e deve avvenire la trasmissione dei caratteri culturali acquisiti (il sapere, i valori)? O, detta in altro modo, che tipo di scuola dobbiamo organizzare per i nostri figli?” (Greco, 2011)

Ma in questo “nuovo, promettente e paradossale universo cognitivo” qual è il ruolo culturale ed educativo delle discipline scientifiche? E’ possibile realizzare degli ambienti di apprendimento – in cui le tecnologie sono utilissimi strumenti – che permettano ad ogni studente di farsi carico del proprio apprendimento situandolo in una più ampia prospettiva di crescita personale, sia emotiva sia intellettuale? Come vanno pensati e progettati i percorsi disciplinari perché permettano un approccio personale alla conoscenza, un autentico processo di interiorizzazione in grado di dare forma ad un nuovo e personale schema di significato?

Il presente lavoro di ricerca ha alla base queste riflessioni di carattere generale stimulate dalla mia professione di insegnante di materie scientifiche, e dunque dall'essere quotidianamente sul "campo", ma anche dalla lunga collaborazione con il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Bologna.

A partire dal presupposto che la complessità sia una caratteristica intrinseca del pensiero, e che compito dell'insegnamento sia "insegnare a pensare" oltre che trasmettere contenuti, ho cominciato a riflettere, insieme al gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Bologna, su come sia possibile, a livello didattico, fare i conti con aspetti di complessità ineliminabili, e soprattutto come sia possibile farli diventare produttivi in modo che, da fattori demotivanti, diventino ciò che fa emergere il significato dei concetti aiutando a sviluppare, invece che inibire, quelle abilità che sono richieste per le nuove sfide della società del XXI secolo.

Abbiamo avviato così, ormai da alcuni anni, un programma di ricerca per definire, nel concreto della realtà scolastica, cosa significa costruire un ambiente di apprendimento abbastanza ricco da far sì che ogni studente possa esplorare il proprio potenziale cognitivo e "costruire conoscenza" nel modo più congeniale al suo stile di apprendimento, all'interno di un progetto più ampio di crescita personale, intellettuale ed emotiva.

Per sviluppare queste affermazioni, abbiamo pensato, costruito e sperimentato percorsi di fisica moderna con l'obiettivo di guardare la "complessità della fisica e della natura" da una prospettiva culturale e didattica: si è progettato e sperimentato prima un percorso di relatività, poi, alla luce dei risultati ottenuti, un percorso di meccanica quantistica, individuando alcuni criteri ed elevandoli a principi di progettazione.

- Organizzare il percorso seguendo un filo conduttore forte, esplicito e orientante, ma problematico e ancorato a domande primarie di conoscenza (ad es.: quale contributo fornisce la relatività al dibattito sui concetti di spazio e tempo? come cambiano i concetti fisici nel passaggio dalla fisica classica alla fisica quantistica?);

- sottolineare la portata dirompente di principi a volte ingannevolmente semplici da enunciare (ad es. la costanza della velocità della luce nel vuoto o il "principio di indeterminazione", che implicano la crisi dei concetti fondanti della fisica classica);
- favorire un ambiente di apprendimento in cui i significati dei concetti emergano da un'interazione tra aspetti fenomenologici, logico-formali e storico-epistemologici;
- analizzare i dibattiti storici che hanno contribuito allo sviluppo delle idee (ad es. il dibattito Einstein – Minkowski o i dibattiti Heisenberg – Bohr, Bohr – Einstein, Heisenberg – Schrödinger), sottolineandone le potenzialità didattiche e culturali, affrontando i nodi concettuali da diverse prospettive, educando alla "controversia scientifica", mostrando la fisica come disciplina polifonica;
- sottolineare aspetti culturali della conoscenza fisica (ad es., la problematica ricerca di significato tra discussioni epistemologiche, dinamiche accademiche e diatribe etiche; la fisica tra pregiudizi e libertà di pensiero; l'atto creativo in fisica e il ruolo dei vincoli per costruire e immaginare mondi; la responsabilità di pensare; il rapporto scienza-tecnologia).

I risultati di queste precedenti sperimentazioni hanno mostrato che il livello di complessità dei contenuti che gli studenti sono disposti ad accettare aumenta con l'aumentare del grado di ampiezza e significatività del contesto culturale in cui i contenuti disciplinari sono collocati (Levrini, Fantini, 2013). Questo ha spinto il gruppo di ricerca a progettare un preciso percorso didattico per individuare e "mettere a punto" forme di complessità che si rivelino produttive perché ogni studente possa trovare un proprio modo per accedere alla conoscenza.

Il percorso didattico progettato e sperimentato¹ in una classe quarta di liceo scientifico è un percorso di termodinamica; la scelta della termodinamica è stata dettata dall'esigenza di sciogliere alcuni nodi concettuali e fare chiarezza, da un punto di vista didattico, su una parte della fisica che ricopre un ruolo importante e delicato nel passaggio dalla fisica classica alla fisica moderna.

Durante la sperimentazione è stata effettuata una metodica raccolta di dati e la loro analisi sistematica e rigorosa è parte centrale di questo lavoro di tesi.

¹ La sperimentazione è stata effettuata la prima volta in una mia classe nell'anno 2009.

Già dalle prime analisi era emerso il modo *personale* con cui gli studenti sembravano affrontare la conoscenza e acquisire i concetti di termodinamica (Scarongella, 2009; Levrini, Fantini *et al.* 2010). Il modo personale con cui gli studenti sembravano affrontare la conoscenza è diventato il *concetto sensibilizzante* che ha orientato l'analisi e a cui si è cercato di dare "un nome" che potesse catturare quel particolare significato dell'apprendimento e enfatizzare due aspetti per noi importanti: l'autenticità del processo di apprendimento e la responsabilità dello studente nel farsi carico e prendersi cura del proprio apprendimento. Si è scelta per questo la parola *appropriazione*.

Il lavoro di analisi si è svolto con l'obiettivo di trasformare questo concetto sensibilizzante in un costrutto teorico, così da poter definire e rendere operativo il termine appropriazione e passare poi ad un livello più interpretativo cercando di capire *come, quando e perché* avviene l'appropriazione.

Per valutare l'esportabilità di questo percorso didattico, si è ripetuta la sperimentazione in un'altra classe quarta di liceo scientifico con un altro insegnante, che ha condiviso la filosofia di fondo della progettazione del percorso².

Struttura della tesi

La prima parte della tesi analizza, nel capitolo 1, la letteratura di ricerca che, in vario modo, ha affrontato il problema dell'insegnamento della termodinamica, così da costruire una cornice teorica di riferimento in cui inserire il percorso che è descritto nel capitolo 2.

La seconda parte della tesi riguarda l'analisi della sperimentazione del percorso di termodinamica effettuata in una classe quarta di liceo scientifico (classe in cui ero docente).

Nel capitolo 3 si fa un'attenta rassegna della letteratura di ricerca circa le metodologie di analisi qualitativa: l'obiettivo è quello di ricostruire un quadro di riferimento anche a

² La sperimentazione è stata effettuata nell'anno 2012.

livello storico/filosofico che permetta di orientarsi nell'ampio dibattito su cosa significa fare Ricerca Qualitativa così da poterla applicare in campo educativo.

Nel capitolo 4 vengono illustrati: il contesto in cui è avvenuta la sperimentazione; le tipologie di attività di classe che hanno permesso di raccogliere i dati su cui si è effettuata l'analisi; i primi risultati ottenuti che hanno portato alla scelta della parola *appropriazione* e alla necessità di effettuare un'analisi più sistematica e rigorosa; le scelte metodologiche effettuate.

Nel capitolo 5 si definisce operativamente il termine *appropriazione* e lo si mette alla prova su un corpo più vasto di dati.

Nei capitoli 6 e 7 l'analisi si muove verso la costruzione di una "teoria locale" dell'appropriazione (*come, quando e perché* avviene l'appropriazione), analizzando le dinamiche individuali e collettive ma anche il loro intreccio.

Nello specifico, nel capitolo 6 l'analisi dati è ancora a livello dei singoli studenti, con l'obiettivo di rispondere alla domanda: *Quali abilità metacognitive si possono individuare in quegli studenti che si sono appropriati della termodinamica? E più in generale quale è la relazione tra appropriazione e meta-cognizione?*

Nel capitolo 7 l'analisi si sposta invece sulla dimensione collettiva, prendendo in considerazione il ruolo di mediazione dell'insegnante per rispondere alla domanda: *Quali modalità di interazione con la classe favoriscono e sostengono processi individuali di appropriazione?*

Nel capitolo 8 si rileggono i risultati ottenuti dall'analisi dei dati, con l'obiettivo di effettuare alcune riflessioni circa le possibili relazioni tra appropriazione, materiali didattici, forme di complessità produttiva, dinamiche individuali e collettive, così da andare oltre il caso specifico della sperimentazione in esame.

La terza parte della tesi riguarda la replicabilità della sperimentazione.

Nel capitolo 9 si analizza la sperimentazione dello stesso percorso di termodinamica effettuata, sempre in una classe quarta di liceo scientifico, da un altro insegnante. La sperimentazione è stata ripetuta con il duplice obiettivo sia di mettere alla prova e rivalutare quanto emerso dall'analisi dei dati della prima sperimentazione, sia di riflettere sulla trasferibilità della proposta didattica. I due obiettivi sono strettamente legati tra loro in quanto non si può mettere alla prova quanto emerso dalla prima sperimentazione senza fare considerazioni sulla trasferibilità del percorso e viceversa.

CAPITOLO 1

L'insegnamento della Termodinamica e la letteratura di ricerca

“L'analisi didattica di un campo di conoscenze deve interpretare e “tradurre” in un altro contesto elementi di logica scientifica, di metodo, di un linguaggio creato in particolari altri contesti, soggetti a continui riarrangiamenti. Nel fare così, si devono analizzare non solo gli “schemi di conoscenza” degli scienziati, che proposero prima ed elaborarono poi i concetti scientifici, ma anche le analogie, le metafore e i modelli che essi usarono nello sforzo di comunicare i loro pensieri (ai “profani”, ma anche agli altri scienziati). Inoltre, si devono analizzare gli schemi di conoscenza “ingenui” degli studenti, e così torniamo alla necessità di “negoziare” tra differenti rappresentazioni mentali per avere una comunicazione didattica efficace.”

(Giannetto 1992)

L'esigenza di ripensare ad un percorso di Termodinamica nasce dalla convinzione, maturata anche negli anni di insegnamento, che se da una parte la termodinamica è un anello importante nel passaggio dalla fisica classica alla fisica moderna, un terreno fertile per riflessioni epistemologiche che vanno al di là della semplice comprensione dei concetti, dall'altra il suo insegnamento è spesso frammentario, e passa con disinvoltura da equivalenze sul piano logico a percorsi storici, ad applicazioni ingegneristiche, con una coerenza che è solo locale. Condivido con Tarsitani l'idea che manca un linguaggio chiaro, corretto e unificatore, che manca chiarezza attorno ad alcuni concetti fondamentali che possono diventare importanti chiavi interpretative di un percorso più ampio (Tarsitani 2005).

In questo capitolo viene analizzata la letteratura di ricerca che, in vario modo, ha affrontato il problema dell'insegnamento della termodinamica, e in particolare del significato e della comprensione di concetti e leggi. L'analisi ha l'obiettivo di costruire un quadro teorico di riferimento che aiuti a collocare all'interno di un dibattito più ampio la ristrutturazione disciplinare proposta.

Facendo una rassegna della letteratura di ricerca si sono individuate diverse chiavi di lettura per condurre l'analisi.

Un primo tipo di analisi ha posto l'attenzione sui lavori che hanno esaminato singoli concetti, leggi e/o principi termodinamici, nonché strategie di ragionamento messe in atto per risolvere problemi. Questi lavori pongono l'accento principalmente sulle difficoltà degli studenti in relazione alle loro conoscenze di senso comune e hanno come obiettivo quello di indagare se e come è possibile, in casi specifici e con interventi mirati, mettere in atto quel *cambiamento concettuale* che porta gli studenti verso una conoscenza scientificamente accreditata.

Un secondo tipo di analisi ha posto l'attenzione sui lavori che, facendo riferimento alla linguistica cognitiva, hanno focalizzato l'attenzione sul ruolo degli strumenti linguistici per la comprensione dei concetti anche nel senso di determinare i diversi significati – e le loro relazioni – di termini polisemici, come ad esempio il termine entropia.

1.1. Analisi di concetti e leggi/principi di termodinamica particolarmente ostici per gli studenti

I numerosi lavori di ricerca che hanno indagato le difficoltà degli studenti nel comprendere i concetti e le leggi della termodinamica seguono, in linea di principio, una metodologia di ricerca comune, pre-test/post-test: ad un grande numero di studenti viene somministrato un test iniziale riguardante specifici concetti, vengono progettate e svolte attività mirate, viene ri-somministrato il test.

L'esito di queste ricerche sembra mostrare che gli studenti riescono a modificare le loro idee spontanee – anche se, in diversi casi, con molta difficoltà – purché l'insegnamento sia progettato in modo da prevedere esplicitamente attività mirate che vengono costruite a partire dai risultati della ricerca, in una sorta di iterazione in base ai risultati precedentemente ottenuti.

In particolare, c'è una lunga tradizione di ricerca che ha studiato le difficoltà degli studenti nella comprensione dei concetti di temperatura e di calore e della loro relazione; alcuni risultati interessanti provengono dagli studi effettuati da Erickson e Tiberghien, e da Viennot. (Erickson, Tiberghien, 1985; Viennot, 1997).

Dall'analisi delle risposte degli studenti è emerso che vi sono alcune idee di senso comune molto diffuse e resistenti al cambiamento:

- il concetto di temperatura è usato per descrivere le sensazioni di caldo e freddo piuttosto che per descrivere quantitativamente una proprietà di un oggetto;
- il concetto di calore sembra riferito a un corpo o una sorgente di qualsiasi tipo (“qualcosa di caldo che riscalda un altro corpo”): si può riconoscere qui l'idea di calore come “sostanza”;
- il concetto di calore si sovrappone/confonde con quello di temperatura: “la temperatura misura la quantità di calore posseduta da un corpo”;
- il concetto di conducibilità di un materiale si sovrappone/confonde con quello di equilibrio termico: “due corpi a contatto prolungato possono o no raggiungere la stessa temperatura a seconda del materiale di cui sono fatti”.

Le difficoltà degli studenti universitari inerenti alla prima legge della termodinamica sono state oggetto degli studi di Loverude e Meltzer ((Loverude *et al.*, 2002; Meltzer, 2004). In particolare, Meltzer ha indagato le difficoltà degli studenti nella comprensione dei concetti di calore e di lavoro e della loro stretta relazione nella formulazione della prima legge della termodinamica³. Le difficoltà che presentavano gli studenti

³ Lo studio è stato condotto da Meltzer su studenti universitari di un corso introduttivo di Fisica. E' stato proposto un Test su 653 studenti di tre diversi corsi per tre anni. Due corsi avevano lo stesso insegnante e diverso libro di testo, mentre il terzo corso aveva un diverso insegnante ma lo stesso libro di uno degli altri due.

frequentanti corsi introduttivi di fisica sono state confermate anche per gli studenti dei corsi avanzati⁴ e sono inerenti soprattutto alla distinzione tra variabili di stato e variabili di processo.

Dall'analisi delle risposte degli studenti è emerso che c'è:

- una certa difficoltà ad interpretare il lavoro come area sotto la curva nel diagramma Pressione-Volume (P-V). Sebbene molti studenti abbiano risposto correttamente ai quesiti proposti, solo il 50% degli studenti è stato in grado di fornire una spiegazione accettabile;
- la convinzione che il lavoro compiuto sia indipendente dal processo. Un numero considerevole di studenti (15% - 25%) è convinto che il lavoro è, o si comporta come, una funzione di stato, e che il lavoro durante un processo dipende solo dallo stato iniziale e dallo stato finale;
- la convinzione che il calore assorbito sia indipendente dal processo. Circa il 20-25% dice esplicitamente che il calore assorbito dipende solo dallo stato iniziale e finale;
- la convinzione che si abbia un maggiore assorbimento di calore (Q) nei processi in cui sono coinvolte pressioni maggiori. La spiegazione che ricorre più frequentemente quando si deve giustificare un $Q_1 > Q_2$ è che nel processo in cui si scambia la quantità di calore Q_1 è in gioco una pressione maggiore;
- l'uso dell'argomentazione della "compensazione": maggiore lavoro (o calore) implica minore calore (o lavoro);
- la difficoltà ad usare la prima legge della termodinamica: solo il 15% dei 653 studenti è stato in grado di spiegare correttamente quando è necessario utilizzare, oltre alla legge di stato dei gas perfetti, anche la prima legge della termodinamica;
- la convinzione che il lavoro netto compiuto e il calore netto assorbito in un processo ciclico debba essere zero. Solo un 20% è in grado di applicare la prima legge della termodinamica anche dopo averla studiata. Le difficoltà degli studenti sembrano in parte dovute al fatto che calore, lavoro, energia interna hanno le stesse unità di misura.

⁴ Gli studenti frequentavano il quarto anno di corso di Ingegneria, Fisica e Chimica. Sono state effettuate 32 interviste su un periodo di tre anni. Gli studenti avevano differenti insegnanti e libri di testo.

Non è detto che chi risponde correttamente che il lavoro dipende dal percorso non pensi poi, in altre situazioni, che il calore sia indipendente dal percorso o viceversa. Questo si può imputare anche al fatto che molti studenti sembrano acquisire una ragionevole padronanza del concetto di funzione di stato, che tendono però a generalizzare e applicare anche a variabili di processo, come il calore e il lavoro. Ciò comporta una certa difficoltà a definire e dare significato al lavoro termodinamico e riconoscere la natura del calore come dipendente dal processo.

Le difficoltà degli studenti universitari a interpretare e applicare la legge di stato dei gas perfetti sono state oggetto di un progetto di ricerca a lungo termine del gruppo statunitense di Educazione in Fisica dell'Università di Washington (Kautz et al., 2005a; 2005b). La ricerca, che coinvolge un gran numero di studenti⁵, è stata articolata in tre fasi: i) rilevazione delle rappresentazioni mentali degli studenti e analisi degli errori; ii) messa a punto di una strategia di insegnamento perché avvenga un cambiamento concettuale, iii) verifica dell'efficacia della strategia utilizzata.

I concetti oggetto di indagine sono i concetti macroscopici e microscopici di pressione (p), temperatura (T) e volume (V), il concetto di numero di moli (n) e il loro legame nella legge dei gas perfetti.

Dall'analisi delle risposte non corrette ai problemi proposti è emerso quanto segue.

Per quanto riguarda la interdipendenza tra le variabili:

- p è ritenuta sempre proporzionale a $1/V$, ovvero gli studenti non pongono attenzione al fatto che la quantità di gas può cambiare;
- p è ritenuta sempre proporzionale a T , ovvero gli studenti non pongono attenzione al fatto che il volume nello stato iniziale e in quello finale può non essere lo stesso.

Per quanto riguarda la grandezza pressione:

⁵ Campione di ~1000 studenti iscritti a corsi di laurea in Fisica, Chimica e Ingegneria, ai corsi introduttivi di Fisica basati su algebra o analisi, e ad un corso più avanzato di Fisica Termica. La maggior parte degli studenti, prima di frequentare i corsi, era già a conoscenza della natura microscopica della materia.

- correlazione non corretta tra pressione ed equilibrio meccanico. Molti studenti sembrano non essere in grado di correlare l'equilibrio meccanico di un pistone alla forza esercitata su esso dal gas dentro al pistone e quindi alla pressione;
- difficoltà a mettere in relazione la pressione con il modello microscopico. Una frazione tra il 15 e il 25% degli studenti del corso introduttivo di Fisica ha predetto, facendo riferimento esplicito al moto delle particelle, che la pressione all'interno di una siringa contenente gas e posta in posizione verticale sarebbe aumentata quando questa veniva posta in acqua bollente.

Per quanto riguarda la grandezza temperatura:

- idea che la temperatura non cambia in un processo adiabatico. Qui riemergono le difficoltà di distinguere tra calore e temperatura già individuate da Tiberghien;
- difficoltà ad interpretare la temperatura a livello microscopico.

Per quanto riguarda la grandezza volume:

- difficoltà a distinguere tra volume occupato dal gas, che coincide con il volume del recipiente, e quantità di gas, cioè numero di moli.

Per quanto riguarda la seconda legge della termodinamica, gli studi di ricerca hanno sottolineato le difficoltà degli studenti nel:

- comprendere l'irreversibilità così come espressa dalla seconda legge (Kesidou, Duit, 1993);
- comprendere e manipolare la relazione tra entropia, seconda legge e processi spontanei (Christensen *et al.*, 2009);
- riconoscere l'importanza della seconda legge nel risolvere problemi che riguardano dispositivi ciclici (macchine termiche e macchine frigorifere) (Cochran, Heron, 2006);
- comprendere i concetti di base di probabilità necessari per comprendere la seconda legge da un punto di vista microscopico (Loverude, 2009).

Come osservazione complessiva si può dire che alla base delle difficoltà degli studenti ci sono sia ragioni che non sembrano dipendere dal particolare tipo di approccio seguito

– come la difficoltà ad esempio a prendere in considerazione più di due parametri nella legge di stato dei gas perfetti o nella relazione che fornisce, dal punto di vista microscopico, il legame tra pressione e velocità quadratica media delle particelle – sia ragioni che sembrano invece essere strettamente correlate all’approccio seguito.

Per quanto riguarda l’approccio microscopico, si può fare riferimento, ad esempio, a precedenti difficoltà in meccanica classica che possono impedire agli studenti di interpretare correttamente il modello microscopico e utilizzarlo per spiegare grandezze macroscopiche, mentre per quanto riguarda l’approccio macroscopico si può fare riferimento, ad esempio, alla confusione tra i concetti di calore, temperatura ed energia interna.

1.2. Strategie di ragionamento degli studenti

I risultati di un progetto di ricerca a lungo termine del gruppo francese dell’Università Parigi 7 mostrano come le strategie di ragionamento messe in atto dagli studenti tendano a ridurre la intrinseca complessità dei problemi applicando un “ragionamento lineare causale” e/o riducendo il numero delle variabili (Rozier, Viennot, 1991)⁶.

Il gruppo di ricerca francese ha posto agli studenti alcuni problemi di termodinamica chiedendo loro di risolverli formulando esplicitamente una spiegazione. A quesiti del tipo: “In una compressione adiabatica di un gas perfetto pressione e temperatura aumentano. Puoi spiegarlo in termini di particelle?”, il 50% degli studenti ha risposto, anche se in modi diversi, associando l’aumento di pressione ad un aumento del “numero” o della “densità” delle particelle senza prendere in considerazione altri aspetti quali, ad esempio, la velocità media delle particelle.

I ragionamenti si possono ricondurre al seguente: “ V diminuisce $\rightarrow n$ aumenta $\rightarrow p$ aumenta” e, analogamente, per l’aumento della temperatura: “ V diminuisce \rightarrow il numero di collisioni aumenta \rightarrow si produce calore $\rightarrow T$ aumenta”. La tendenza a legare

⁶ Lo studio coinvolge studenti universitari dell’Università di Parigi 7 (circa 2000 studenti).

la pressione al numero di particelle è confermata anche dalle risposte ad altre domande e, più o meno implicitamente, si trova anche su diversi libri di testo. Va osservato poi che l'implicazione comunemente utilizzata, "V diminuisce \rightarrow p aumenta", raramente è applicata in senso contrario cioè "p aumenta \rightarrow V diminuisce" mettendo in evidenza che, per gli studenti, le due implicazioni non sono simmetriche.

A quesiti quali, ad esempio: "Un gas perfetto è riscaldato a pressione costante e aumentano la Temperatura e il Volume. Come puoi spiegarlo?", gli studenti hanno risposto con ragionamenti del tipo: "La temperatura aumenta e conoscendo la legge dei gas perfetti $PV = nRT$ si può dire che con il volume costante la pressione aumenta, ma il pistone è libero di muoversi allora il volume aumenta", ragionamento che si può ricondurre al seguente: "fornendo calore \rightarrow T aumenta \rightarrow p aumenta \rightarrow V aumenta", senza valutare che il fatto che "p aumenta" contraddice i dati del problema (la pressione rimane costante). La contraddizione però scompare se si interpreta questa argomentazione cronologicamente. La freccia può significare non solo "allora" ma anche "più tardi" attribuendo, in questo modo, nel ragionamento $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow \dots$, una diversa valenza all'implicazione " \rightarrow ": anziché essere considerato come un connettore che ha un significato strettamente logico-matematico (se si verifica la condizione che precede la freccia questo implica il verificarsi della condizione che segue la freccia ad un determinato istante t, tenendo costanti alcune grandezze), " \rightarrow " assume una connotazione di successione temporale-cronologica delle grandezze in esame. L'ipotesi che l'implicazione abbia una connotazione temporale può dare anche conto della mancanza di simmetria delle implicazioni stesse di cui si è accennato sopra (gli studenti non usano l'implicazione inversa).

Il ragionamento di tipo causale lineare è applicato anche quando si prendono in considerazione stati di equilibrio. Se si considera il problema relativo a una compressione adiabatica, visto precedentemente, alla richiesta di spiegare in termini molecolari perché una compressione adiabatica di un gas perfetto porta ad un aumento di temperatura, i ragionamenti sono del tipo: "V diminuisce \rightarrow n aumenta \rightarrow il numero di collisioni aumenta \rightarrow si produce calore Q \rightarrow T aumenta". Questo è giustificato dal fatto che "le collisioni producono calore", in conformità all'associazione ben conosciuta calore-temperatura, ma anche dal fatto che le proprietà macroscopiche dei corpi sono

dovute ai comportamenti delle particelle a livello microscopico (che collidono tra loro e con le pareti). Non è riconosciuta l'incompatibilità tra l'affermazione "le collisioni producono calore" e l'idea di "stato stazionario". Ancora una volta, però, se l'implicazione è vista come connessione cronologica riferita a un fenomeno temporaneo – molti studenti hanno infatti sottolineato "durante la trasformazione" –, l'incompatibilità con lo stato stazionario scompare.

A partire dai risultati del gruppo di ricerca francese si può dire che quando il problema implica due variabili, il ragionamento è caratterizzato da implicazioni lineari del tipo $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2$ (dove Φ si riferisce ad un fenomeno specificato con una sola variabile), ma questo tipo di ragionamento lineare permane anche quando il numero delle variabili aumenta ($\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow \dots$). L'implicazione lineare, tuttavia, non sempre va considerata come una connessione logico-matematica, ma anche come successione temporale-cronologica delle grandezze in esame. Anche nel linguaggio comune, così come in alcuni libri di testo, la distinzione tra successione temporale e consequenzialità logica non è sempre chiara.

Per quanto riguarda la tendenza a ridurre il numero delle variabili, si può sottolineare che questo è spesso imputabile al fatto che due quantità fisiche vengono come "incollate insieme", legando indissolubilmente le loro proprietà e perdendo le peculiarità di ciascuna: ad esempio "incollando insieme" la distanza media tra le particelle (che dipende dal tipo di potenziale di interazione e dalla pressione) e l'energia cinetica media delle particelle (che dipende solo dalla temperatura) si lega l'aspetto geometrico a quello cinetico e il termine "movimento termico" all'idea di disordine. Questo tipo di ragionamento viene indotto, a volte, anche dai libri di testo.

Ancora sulle strategie di ragionamento si concentra il gruppo di ricerca dell'Università di Washington (Robertson, Shaffer, 2012), che indaga sul modo in cui gli studenti mettono in relazione le variabili macroscopiche con grandezze microscopiche. Il lavoro a cui si fa riferimento è solo la prima parte di un progetto a lungo termine e, nello specifico, viene indagato come il concetto di volume sia messo in relazione con la teoria cinetica dei gas.

È emerso che non solo gli studenti universitari, ma anche molti insegnanti⁷ considerano il volume di un gas diverso dal volume del contenitore e, per giustificare ad esempio la loro predizione su come cambia di volume in seguito al cambiamento di temperatura, usano in modo non corretto la teoria cinetica dei gas. Non applicano l'idea che le molecole di un gas continuano a muoversi in linea retta e in modo casuale anche quando il gas è raffreddato e affermano, ad esempio, che particelle meno energetiche prendono meno spazio facendo riferimento al modo in cui le particelle interagiscono. Le particelle sono pensate localizzate al centro o in fondo al contenitore perché viene sovrastimata l'attrazione gravitazionale della Terra e vengono generalizzate esperienze concrete come, ad esempio, quella sperimentata per cui un pallone, se raffreddato, si contrae. Ancora una volta si evidenzia che la difficoltà principale è quella di mettere in relazione, in un ragionamento coerente, il modello macroscopico e quello microscopico.

1.3. Un approccio linguistico per far chiarezza sul significato di concetti scientifici

È possibile individuare un altro filone di ricerca, che ha come obiettivo far luce su alcuni concetti fisici focalizzando l'attenzione sull'aspetto linguistico: la linguistica cognitiva, un utile strumento per chiarire il significato dei concetti sciogliendo nodi e/o ambiguità. L'obiettivo di questi lavori è certamente fornire un contributo per migliorare l'insegnamento/apprendimento, ma, a differenza degli articoli analizzati precedentemente, lo sguardo non è tanto rivolto ad indagare i modi di guardare, esprimersi e ragionare degli studenti quanto piuttosto ad entrare nel merito del significato dei concetti.

Alcuni lavori di ricerca analizzano testi scientifici o materiali divulgativi per capire come sono utilizzati strumenti linguistici – come la metafora – al fine di spiegare concetti scientifici (cfr. 1.3.1.). I lavori si basano sull'assunto che sia tipico del ragionamento scientifico l'uso dell'analogia verbalizzata attraverso l'uso della metafora (Brookes, Etkina, 2007), ma viene mostrato come a volte queste metafore, invece di

⁷ Studenti di corsi di base di Fisica in Scienze Biologiche; studenti di Ingegneria e di Chimica e insegnanti in servizio.

chiarire, rendano ambiguo e/o nascondano il significato. La termodinamica si presta particolarmente bene a questo tipo di analisi, in quanto presenta alcuni concetti, in particolare l'entropia, che hanno – per come sono nati e si sono sviluppati storicamente – un carattere intrinsecamente polisemico. Come sarà discusso più approfonditamente nel paragrafo successivo, alla parola entropia, infatti, proprio a causa delle diverse sfumature di significato che le si attribuiscono, si associano diverse metafore. La metafora a volte è usata semplicemente perché evocativa, a volte con un intento prettamente pedagogico, a volte per tradizione storica, a volte per “tradurre” particolari aspetti del concetto, cioè rifacendosi alle metafore concettuali non tanto come uno strumento linguistico quanto piuttosto come uno strumento di conoscenza.⁸

Altri ricercatori (Haglund *et al.*, 2010) “usano” la linguistica per individuare i diversi significati di un concetto scientifico e stabilire come questi siano logicamente e storicamente collegati. (cfr. 1.3.2.).

Altri ancora (Amin *et al.*, 2010) analizzano come, nei libri di testo e nei ragionamenti degli studenti, si faccia uso di metafore concettuali che si possono ricondurre a quelle di base individuate da Lakoff⁹ (cfr. 1.3.3.).

Secondo Lakoff (1992), i principi generali che governano la metafora non vanno ricercati solo nel linguaggio, ma anche nella corrispondenza tra domini concettuali diversi: nella mente si realizza un legame (*mapping*) tra un dominio sorgente più concreto (*source*) ed un dominio (*target*) più astratto, che non è semplicemente una analogia o una similitudine. La corrispondenza tra i due domini è intesa come una corrispondenza ontologica che permette di “mettere a terra” concetti più astratti. I domini sorgente, che rappresentano i concetti dei quali si fa concretamente e

⁸ La metafora, classicamente intesa come figura retorica, è un efficace strumento linguistico con un ruolo preminentemente comunicativo, in grado di creare immagini di forte impatto espressivo ed emotivo. Tuttavia, negli ultimi trenta anni, la metafora diventa *metafora concettuale* e assume ruoli diversi: da strumento linguistico diventa, per le scienze cognitive, strumento di conoscenza che contribuisce a rappresentare, interpretare e organizzare il mondo.

⁹ Lakoff è considerato il padre della Teoria della Metafora Concettuale. La sua tesi fu espressa nel 1980 nel libro *Metaphors we live by* scritto in collaborazione con Mark Johnson.

fisicamente esperienza nella vita quotidiana, contribuiscono in modo determinante a costruire concetti astratti e intangibili¹⁰.

1.3.1. Le metafore associate al concetto di entropia

La metafora più utilizzata, la cui origine si deve a Boltzmann, è quella che associa l'entropia al *disordine*, ma “[...] *there is no clear correlation between propositions about entropy and anything intuitively obvious about disorder*” (Wright, 1970). Molti, ormai da molti anni, concordano nel ritenere che, se usata da sola, questa metafora non solo non chiarisce il concetto ma, in taluni casi, introducendo sbagliate forme di visualizzazione, è addirittura fuorviante “*has probably done much more harm than good.*”(Dingle)¹¹.

Applicando la metafora del disordine in modo letterale, gli studenti comprendono solo il contributo della configurazione spaziale all'entropia e non ne vedono il contributo energetico; si associa sempre l'aumento di volume ad un aumento di disordine e quindi di entropia e non si comprende, ad esempio, che durante una trasformazione reversibile adiabatica di un gas ideale l'entropia resta costante (Brosseau, Viard, 1992).¹²

In tempi più recenti anche Styer torna a mettere in evidenza che occorre porre attenzione, in generale, ai pericoli cognitivi dell'uso di immagini metaforiche. In particolare, nella metafora “disordine” individua il fatto che si fa riferimento ad un termine vago, un termine che porta con sé una carica evocativa ed emotiva che può essere anche negativa. Ma soprattutto, l'uso di questa metafora non mette in luce che l'entropia si riferisce *a una classe* di molti microstati e non *a un singolo* microstato. Egli propone allora di introdurre un'altra metafora, quella di “libertà” (“freedom”), la libertà di scegliere tra parecchi microstati. Riconosce che anche questa porta con sé un

¹⁰ Come ad esempio “L'amore è un viaggio”. Per i concetti astratti più complessi poi (ad esempio vita, morte, tempo) si fa ricorso, per poterne cogliere le diverse sfaccettature, a più metafore concettuali di tipo diverso.

¹¹ In Dingle (1959) riportato da Wright in *Entropy and disorder* (1970).

¹² Brosseau e Viard hanno condotto interviste a studenti universitari di fisica e hanno trovato che su 10 studenti intervistati solo 1 aveva compreso che l'entropia è costante durante una espansione reversibile adiabatica di un gas ideale.

bagaglio emozionale e di vaghezza confrontabile con la metafora “disordine”, ma sostiene che le due metafore, usate insieme, possono permettere associazioni diverse:

“... the advantage of the ‘entropy as freedom’ analogy is that it focuses attention on the variety of microstates corresponding to a macrostate whereas the ‘entropy as disorder’ analogy invites focus on a single microstate.” (Styer, 2000).

Leff individua altre metafore utilizzate per assegnare significato al concetto di entropia come “mancanza di informazione” e “molteplicità” e, anche lui come Styer, si chiede, più in generale, se l’uso di metafore aiuti a comprenderne il significato o piuttosto non lo nasconda. Secondo Leff, ogni metafora, anche se ben utilizzata, è incompleta e/o inadeguata e permette di cogliere solo alcuni aspetti del concetto, facendone perdere altri (Leff, 2007).

La metafora “disordine” è ad esempio inadeguata, secondo Leff, perché il termine stesso di “disordine” può cambiare significato a seconda del contesto: può avere una connotazione spaziale ed essere associato a irregolarità spaziali delle particelle, o essere interpretato in termini di “confusione” e associato alle alte temperature e all’agitazione termica. Il rischio è quello di portare l’attenzione a focalizzarsi solo su un tipo di disordine – quello più ovvio – perdendo di vista gli altri significati.

“For example, this is tempting in the discussion of spontaneous crystal formation in an isolated, metastable super-saturated solution. Here a dissolved solid’s concentration exceeds its maximum equilibrium value and a slight perturbation can trigger crystal formation. From a spatial viewpoint, there is more order after crystallization, yet the system’s entropy (including liquid, solid crystals, and container walls) must increase. The tempting misleading interpretation that entropy decreases, based on increased spatial order is exacerbated by the fact that it is possible that temperature has also decreased. To be sure, the physical phenomena here are not transparent, but the ease of misinterpretation using the disorder metaphor is noteworthy.”

Meno ambiguo, soprattutto nella descrizione di un sistema da un punto di vista macroscopico è, secondo Leff, il termine “mancanza di informazione”, e quindi la metafora “mancanza di informazione” è senz’altro da preferire alla metafora “disordine”. Tuttavia, nemmeno questa metafora prende in considerazione spazio, tempo e energia in un modo qualitativamente utile.

“The missing information metaphor is well defined and can be quite useful, especially in understanding that descriptions of macroscopic matter necessarily discard enormous amounts of information about system details, working ultimately with a small number of macroscopic variables such as pressure, volume, and temperature. It does not, however, use space, time, and energy in a qualitatively useful way.”

La metafora “molteplicità” fa riferimento, nella descrizione di un sistema da un punto di vista microscopico, al numero di microstati che corrispondono ad un solo macrostato. In questo modo, l’entropia (S) viene definita in termini della relazione di Boltzmann $S=k*\ln(\text{molteplicità})$ e la seconda legge può allora essere così formulata:

“If an isolated macroscopic system is permitted to change, it will evolve to the macrostate of largest multiplicity (or optiony) and will remain in that macrostate.”

La metafora “libertà”, proposta da Styer, può, secondo Leff, avere un utilizzo positivo se correlata alla molteplicità e alla mancanza di informazione. Leff conclude così la sua analisi sulle metafore:

“Finally, there exists a common metaphor that entropy is a measure of the unavailability of energy that can be converted to work in some processes. Because the energy alluded to is macroscopic energy in this engineering-oriented definition, it cannot help us understand why, for example, 2 kg of copper has twice the entropy of 1 kg of copper. Although the above terms can all be helpful, they do not convey the notions that thermodynamic

processes entail energy spreading and that thermodynamic equilibrium is a dynamic equilibrium at a microscopic level.”

Egli propone quindi l'uso di una nuova metafora - “*spreading*” - che fa riferimento esplicito a spazio, tempo ed energia. L'uso dell'espressione “*spreading*” mostra il carattere fluttuante dell'equilibrio termico, catturando la dinamica dei sistemi termodinamici.

1.3.2. La linguistica usata per individuare i diversi significati associati ad un concetto.

Il carattere polisemico della parola entropia ha spinto alcuni ricercatori (Haglund et al., 2010) ad utilizzare strumenti propriamente linguistici non solo per identificare e chiarire i diversi significati del termine, ma anche per individuare come questi siano logicamente e storicamente collegati. Per effettuare questo tipo di analisi su dati che provengono da fonti scientifiche e divulgative, gli autori hanno seguito l'approccio conosciuto come *Principle Polysemy* (PP) proposto da Evans e Tyler (Evans, Tyler, 2003)¹³, e lo schema *2 Dimensional Semiotic/Semantic Analysing Schema* (2-D SAS)¹⁴

¹³ Secondo l'approccio Principle Polysemy i diversi significati di un termine vengono identificati applicando i seguenti tre criteri:

1. *meaning criterion*: differente significato (“meaning”) non presente in altra accezione (“sense”)
2. *concept elaboration criterion*: schemi linguistici – che possono riferirsi ad aggettivi o verbi – usati nei diversi contesti in modo unico e molto diverso gli uni dagli altri. Gli schemi modificano il significato della parola (ad esempio per quanto riguarda il significato da attribuire alla parola “time”, gli schemi: “a short time”, “the time sped by”)
3. *grammatical criterion*: costrutti grammaticali usati nei diversi contesti in modo unico (ad es. distinguere il sostantivo “time” come “count noun”, “mass noun” o “proper noun”).

Al termine viene attribuito un nuovo significato quando, oltre al primo criterio, è soddisfatto almeno uno degli altri due; i diversi significati, in diversi contesti, che un sostantivo può assumere ma senza soddisfare i criteri due e tre, possono essere considerati come sotto-significati – “sub-senses” – e non veri e propri nuovi significati.

¹⁴ Lo schema 2-D SAS è rappresentato da un diagramma in cui sull'asse verticale sono riportati i “diversi tipi di significato” del termine e sull'asse orizzontale parole, concetti, referenti. Nel caso specifico il termine in esame è “entropia”; i diversi tipi di significati sono significati non formali, significati legati a modelli fisici qualitativi, significati legati a quantità fisiche, significati legati a misure operazionali ed empiriche. I concetti sono concetti non formali, concetti scientifici qualitativi, concetti legati a modellizzazione quantitativa, concetti legati a quantificazione empirica delle quantità fisiche. I referenti sono organizzati in referenti per concetti non formali, referenti per concetti qualitativi e quantitativi, referenti per la quantificazione di quantità fisiche.

I referenti sono entità, tipicamente non linguistiche, percepite nel mondo che la lingua descrive – per esempio il concetto di temperatura ha una definizione formale nella meccanica statistica classica dove il referente è un aspetto del movimento delle particelle in una scatola; questo modello qualitativo è

introdotto da Stromdahl – uno degli autori – con lo scopo specifico di analizzare il significato delle parole usate in ambito scientifico.

L'analisi effettuata dal gruppo di ricerca svedese ha individuato, per la parola entropia, cinque significati e precisamente *significato termodinamico*, *significato statistico*, *disordine*, *informazione*, *omogeneità*.

Facendo riferimento i) al primo significato storicamente attestato (significato originale), ii) alla predominanza nella rete semantica (maggiore frequenza), iii) alla prevedibilità riguardo ad altri significati, iv) alle esperienze a livello fenomenologico (esperienze vissute), il gruppo svedese ha determinato le relazioni logiche tra i diversi significati, costruendo la rete semantica riportata in Figura 1, in cui il nodo centrale (*Sanctioning Sense – SS*) non necessariamente è il primo significato storicamente attestato.

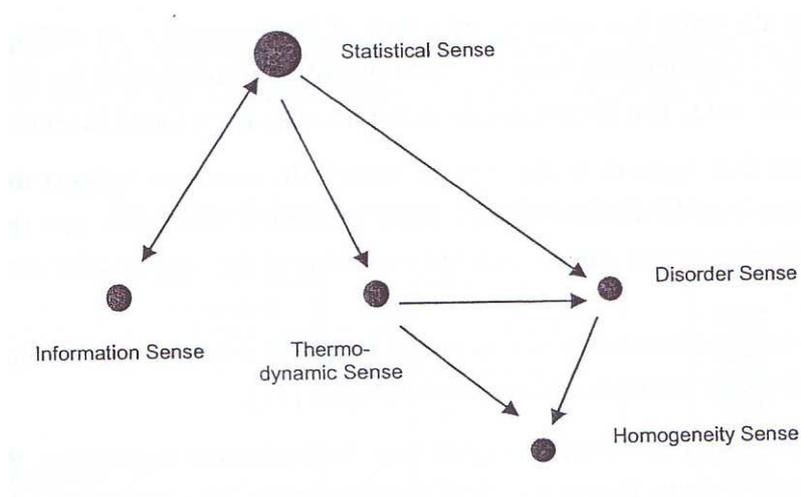


Figura 1. Rete semantica della parola entropia.

In base all'analisi, il nodo centrale è stato individuato nel significato statistico, dal quale vengono fatti derivare gli altri significati. Storicamente il significato termodinamico, introdotto da Clausius, è stato il primo, ma è ben documentata anche l'origine del "significato statistico" nella meccanica statistica, così come del "significato informazione" nella teoria dell'informazione e del "significato disordine", mentre non è

completato dalle relazioni matematiche con altre grandezze fisiche. La quantificazione empirica poi richiede la definizione di una unità e degli strumenti di misura. D'altra parte il concetto non formale quotidiano si riferisce ad esperienze della vita di tutti i giorni (una tazza calda, una giornata calda...).

ben documentata l'origine del "significato omogeneità", incontrato principalmente in ambito svedese e in contesti non scientifici.

La caratteristica peculiare del significato statistico – descrivere un sistema attraverso la relazione tra gli elementi che lo costituiscono – è una caratteristica condivisa con il significato "informazione" e "disordine", ma non con "significato termodinamico" e "omogeneità", in quanto questi ultimi non implicano direttamente l'analisi di una struttura interna.

Il carattere produttivo del "significato statistico" è visto anche nella relazione con il significato "informazione" e nel fatto che questi significati possono avere una funzione simile nell'analogia tra termodinamica ed economia.

Il "significato termodinamico" può derivare logicamente da quello "statistico", in quanto le proprietà macroscopiche dell'entropia possono essere derivate matematicamente dalla meccanica statistica, la quale è in grado di spiegare il meccanismo sottostante e dare conto di un'ampia varietà di fenomeni, mentre non è possibile il contrario.

La formulazione di Gibbs ($S = -k \sum p_i \ln p_i$), molto generale, può essere applicata a diversi tipi di sistemi termodinamici e la grandezza S, adottata nella teoria della informazione cambiando il valore e l'unità della costante k, ha dato luogo al significato "informazione".

Anche il significato "disordine", sia in campo scientifico sia in campo non scientifico, può derivare dal "significato statistico". I due significati condividono la struttura di sistema costituita di parti presenti a diversi livelli, e in questo senso hanno referenti identici o simili. L'analogia è fatta tra un sistema termodinamico e una stanza in disordine, una mappatura che si concentra su una configurazione spaziale delle parti. I microstati possono corrispondere ad una possibile configurazione di giocattoli o vestiti. La metafora disordine è nata solo dopo l'introduzione del significato statistico.

Non sarebbe invece possibile passare dal significato termodinamico a quello di disordine in quanto il primo non utilizza un modello sistema/parti. Tuttavia il significato

negativo di “disordine” collegato alla morte termica è un *sub-sense* del “significato termodinamico” opposto ad un più neutrale “significato statistico”.

Infine si può argomentare che il significato “omogeneità” è una estensione del “significato disordine” e del “significato termodinamico” correlato a trasformazioni di energia (tipico del significato termodinamico).

1.3.3. Le metafore concettuali in termodinamica e le metafore di Lakoff

Fa ancora riferimento alla linguistica cognitiva ma usando in modo esplicito, come strumento di analisi, le metafore concettuali di Lakoff, il lavoro di Amin e colleghi (2010). Il lavoro, che indaga se e come i libri di testo usino le metafore concettuali di base di Lakoff, si fonda sul presupposto che la base di conoscenza esperienziale di ciascuno costituisca il “dominio sorgente” da mettere in corrispondenza con il “dominio astratto” dei concetti scientifici, e che si abbia un buon apprendimento quando la corrispondenza tra i domini è quella messa in atto dagli scienziati nella costruzione della conoscenza scientificamente accreditata.

Questa linea di ricerca si inserisce all’interno dalla prospettiva secondo la quale ragionamenti scientifici astratti implicano l’applicazione di strutture di conoscenza e risorse di ragionamento che comprendono anche elementi che derivano da esperienze intuitive, non formali ed “*embodied*” (diSessa 1993). Una assunzione di base in questa prospettiva è la “continuità” nel ragionamento e nella concettualizzazione tra il “novizio” e l’“esperto” (Smith 1993), cioè una continuità tra il pensiero comune e quello scientificamente accreditato. L’apprendimento può allora essere visto come un’applicazione strategica, da parte di chi impara, di risorse già disponibili.¹⁵

¹⁵ Alcuni ricercatori sostengono, al contrario, che passare da una conoscenza di senso comune ad una scientificamente accreditata implichi una discontinuità cognitiva. Enfatizzare la discontinuità tra la concettualizzazione prima e dopo l’istruzione pone l’enfasi sulle misconcezioni degli studenti e sull’uso di “framework” alternativi. Chi (2005), ad esempio, vede l’acquisizione di concetti scientifici come un passaggio dal concreto all’astratto: gli studenti tendono a categorizzare i problemi concretamente in termini di comportamento degli oggetti del problema stesso, mentre gli esperti usano, come criteri di ordinamento, principi fisici astratti. Chi ha applicato al cambiamento concettuale la nozione di classi ontologiche distinte di concetti, focalizzandosi su due categorie ontologiche dette rispettivamente “material substances” and “processes”. Secondo questa visione i novizi classificano molti concetti scientifici – ad esempio calore, energia e corrente elettrica – erroneamente nella categoria “material substances”, mentre per gli scienziati questi concetti sono classificati più astrattamente nella categoria “processes”. Si ha apprendimento quando il novizio è in grado di costruire la categoria astratta –

Il lavoro del gruppo svedese si concentra nell'individuare le metafore utilizzate nei libri di testo per costruire, in particolare, il concetto di entropia e la seconda legge della termodinamica, sia da un punto di vista macroscopico che microscopico. Le metafore individuate nei testi¹⁶ da loro analizzati sono metafore che ricorrono anche nei libri di testo italiani, sia a livello universitario che di scuola superiore. Nel seguito si riportano i principali risultati ottenuti dai ricercatori, distinguendo tra: a) *metafore concettuali e approccio macroscopico*; b) *metafore concettuali e approccio microscopico*; c) *metafore concettuali per mettere in relazione l'approccio macroscopico e l'approccio microscopico*.

Metafore concettuali e approccio macroscopico

Molte metafore utilizzate nell'affrontare la termodinamica da un punto di vista macroscopico sono riconducibili a volte a semplici applicazioni o “sotto-mappature” - a volte a vere rielaborazioni - di due metafore concettuali di base e di carattere generale individuate da Lakoff e Johnson e denominate *Location Event Structure* e *Object Event Structure*.

La metafora *Location Event Structure* si ritrova esplicitamente quando si identificano gli *stati* di sistemi termodinamici con *localizzazioni* – ad esempio “...le tre fasi *sono* presenti *nell'*equilibrio termodinamico” –, o nella forma “*Change of state is movement into/out of a location*” quando i *cambiamenti* di un sistema diventano *movimenti* lungo determinati *cammini*, ad esempio “quando il processo *va dallo* stato 1 (p_1, V_1) *allo* stato 2 (p_2, V_2)...”.

Interessante è l'applicazione di questa metafora ad evoluzioni spontanee di un sistema che vengono concettualizzate come movimenti direzionati lungo specifici percorsi – si pensi ad esempio all'espressione “molti processi termodinamici vanno unilateralmente *in una direzione* ma non nell'altra”. L'uso di questa metafora implica una precisa costruzione del concetto di entropia: entropia come “indicatore” che individua la

inizialmente assente – dei processi e poi riaggiustare i nuovi concetti da una non corretta “material substance ontology” ad una nuova “constructed process ontology”.

¹⁶ I libri analizzati sono tre testi universitari di: i) introduzione alla fisica (Young, H.D., Freedman, R.A., Sears, F.W. *Sears and Zemansky's university physics with modern physics* (11 ed.). 2003), ii) chimica (Zumdahl, S.S. *Chemical principles* (3 ed.). 1998), iii) meccanica statistica (Bowley, R. Sanchez, M. *Introductory statistical mechanics* (2 ed.). 1999), oltre a un trattato di termodinamica molto noto (Atkins, 2003).

direzione in cui evolve il sistema. Pensare infatti al cambiamento di un sistema come una “entità direzionata”, poiché un sistema evolve naturalmente verso stati caratterizzati da un aumento di entropia, porta a concettualizzare l’entropia come strettamente legata a una “destinazione di maggiore disordine, in cui l’energia è di più bassa qualità”: che è, metaforicamente, una “entità degradata”.

Quando si analizzano le proprietà di un sistema e si fa riferimento a particolari condizioni in cui alcune grandezze, come ad esempio la temperatura o la pressione, sono “tenute” costanti, si usano locuzioni che richiamano il concetto di “trattenere da qualche forza” e questo può essere visto come l’uso di metafore del tipo *Difficulties are impediments to motion, freedom of action is the lack of impediment to motion* che sono sotto-mappature della metafora più generale *Location Event Structure*.

Quando poi le leggi fisiche e le equazioni vengono costruite come leggi che governano il movimento di certe entità e in cui certi movimenti sono “permessi”, altri sono “proibiti” o sono “violazioni di leggi” si può riconoscere l’applicazione della metafora *Scientific law/principle/equation is a social law*.

Molte metafore utilizzate nell’approccio macroscopico sono applicazioni o rielaborazioni dell’altra metafora di base individuata da Lakoff e Johnson: *Object Event Structure*.

Questa metafora si ritrova esplicitamente quando, ad esempio, il concetto di entropia è costruito facendo riferimento ad un possesso: un sistema “ha” entropia, l’entropia è *di* un sistema; o come sotto-mappatura quando un cambiamento di stato è concettualizzato come il movimento di qualcosa che è posseduto: “Chi o che cosa sta versando l’entropia nell’universo?” (Atkins). In questa frase, dove la metafora è anche poetica e didattica, si concettualizza l’entropia pensando a una sorgente e ci si riferisce a entità e processi come “fonti” che “generano” o “producono” entropia. E ancora è applicata la metafora *Object Event Structure* quando il cambiamento energetico di uno stato è costruito come una perdita di energia posseduta dallo stato stesso e la direzionalità dei cambiamenti è legata ad una perdita di energia da “scartare” come se fosse un “rifiuto”: il cambiamento irreversibile è visto come perdita di energia utile.

Quando invece l'entropia è vista come quantità numerica costruita come un “tutto” – un oggetto – alla cui determinazione possono “contribuire” quantità minori si utilizza la sotto-mappatura *The arithmetic is object construction*.

La metafora *A function is a machine*, di cui Lakoff individua le sotto-mappature – i) *The domain of a function is a collection of acceptable input objects*, ii) *The range of the function is a collection of output objects*, iii) *The operation of the function is the making of a unique output object from each collection of input objects* –, è una metafora generica che può essere sempre usata quando si utilizzano espressioni matematiche, e per questo è ritenuta dagli stessi ricercatori poco significativa.

Interessanti sono invece espressioni del tipo “Il cambiamento di entropia è dato da energia trasferita come calore” dove sembra si utilizzi la metafora *A function is a machine*, ma “l'energia trasferita come calore” non è una funzione matematica, quanto piuttosto una quantità fisica che ha un'espressione matematica. Qui sembra che la quantità fisica stia al posto dell'espressione matematica da cui è rappresentata e che quindi l'espressione combini insieme la metonimia¹⁷ *Physical quantity stands for mathematical expression that represents it* e la metafora *A function is a machine*.

Ancora un intreccio tra metonimia e metafora si ha in espressioni del tipo “X è una misura di Y” come ad es. “l'entropia è una misura del disordine”. La grandezza matematica entropia espressa dal simbolo S è introdotta in ingresso (X) ed è una misura dell'uscita (Y) che però è data come caratteristica qualitativa del sistema fisico cioè “disordine” o “qualità dell'energia”. Non c'è nessun “dispositivo” che permette di leggere il valore dell'entropia – come ad esempio il termometro per la temperatura – e in questo senso l'espressione non può essere vista come una metonimia in cui la lettura dello strumento di misura sostituisce lo strumento stesso. Tuttavia espressioni come “l'entropia è una misura del disordine” possono essere mappate da due metonimie e una metafora se la metafora è vista come espressione specifica della più generale *A function is a machine*:

¹⁷ Metonimia: sostituire una parola con un'altra che abbia con la prima una certa relazione.

- *A mathematical function is a measuring device* (rielaborazione della metafora *Mathematical function is a machine*).
- *The reading of a measuring device stands for the device* (metonimia).
- *The output of a mathematical function/machine stands for the mathematical procedure* (metonimia).

Metafore concettuali e approccio microscopico

A livello microscopico le metafore concettuali utilizzate sono relativamente poche; non è usata la metafora *Object Event Structure*, mentre si ritrova talvolta la *Location Event Structure*.

Anche qui, come per l'approccio macroscopico, un sistema “è in” o “occupa” uno stato anche se ora è uno stato descritto a livello microscopico e il cambiamento di uno stato microscopico è un movimento dentro e fuori da un luogo, come ad esempio nella frase “le molecole *vanno dentro* la soluzione indipendentemente l'una dall'altra”.

Metafore concettuali per mettere in relazione l'approccio macroscopico e l'approccio microscopico.

Le metafore concettuali utilizzate per mettere in relazione il livello microscopico con quello macroscopico sono sostanzialmente tre:

- *Relating ideas at different levels is to connect them* come sotto-mappatura della più generale *Ideas are objects as well as theories are buildings*, secondo la quale una teoria/edificio non può essere costruita senza che le idee/oggetti che lo compongono siano correlate. Ci si riferisce alle funzioni come ad “un ponte che connette” gli stati microscopici a proprietà macroscopiche e il disordine come “base” della definizione di entropia. L'uso del termine “base” contribuisce a interpretare il livello microscopico come fondamento per comprendere i processi macroscopici.
- *Macroscopic process are machines that produce/manipulate microscopic process*: applicazione della metafora *Caused changes are forced* a sua volta sotto-mappatura della più generale *Location Event Structure*. Un processo macroscopico che causa un cambiamento a livello microscopico è costruito come una manipolazione che costringe un movimento o genera un prodotto a livello microscopico.

- *Correlation is accompaniment*: metafora di correlazione dei processi ai diversi livelli. Per esempio si trovano riferimenti alla diminuzione di disordine perché “associato a” o “accompagnato da” basse temperature.

Infine si fa uso di metafore/metonimie, come spiegato precedentemente per l’approccio macroscopico, per costruire collegamenti tra le proprietà e i processi tra i due livelli: ad esempio “l’entropia è una misura della casualità”.

Nel lavoro del gruppo di ricerca dell’Università di Linköping è stato indagato poi il possibile ruolo delle metafore cognitive di Lakoff nel ragionamento messo in atto per risolvere problemi. Il lavoro – che ha come presupposto di base che i concetti e i ragionamenti scientifici astratti implicano l’applicazione di strutture di conoscenza e risorse di ragionamento che comprendono anche elementi che derivano da esperienze intuitive, concrete e non formali – vuole mostrare come i domini sorgenti delle metafore cognitive, che si basano su esperienze concrete, vengono attivati per diventare vere risorse cognitive nell’apprendimento dei concetti.

Durante la risoluzione di un problema le metafore cognitive permettono, se ben utilizzate, di formulare costrutti esperienziali di concetti scientifici astratti e di “mettere a terra” ragionamenti astratti in un discorso “narrativo” che contiene concetti legati a cammini, agenti e movimenti; permettono, se ben coordinate tra loro o con altre risorse, l’allineamento tra il ragionamento qualitativo e quello quantitativo.

Il meccanismo delle metafore è strettamente legato al linguaggio, e i domini sorgenti sono riflessi negli elementi linguistici utilizzati; ad esempio le proposizioni *da*, *lungo*, *dentro*, *attraverso*, marcano schemi spaziali e di moto, verbi come *spingere*, *dare*, *prendere*, *aggiungere*, *salire* esprimono forza, movimento e scambio di qualcosa che si possiede. Questi elementi possono essere fonte di stimolo per costrutti metaforici di un dominio concettuale in termini di un altro. Il linguaggio offre infatti poche opportunità di esprimere concetti astratti e i modi metaforici di parlare sono inevitabili.

Il problema sorge quando si tende a interpretare letteralmente le espressioni metaforiche come hanno mostrato Jeppson e colleghi che hanno analizzato le discussioni di due studenti di PhD in chimica di fronte a problemi di termodinamica e precisamente problemi sull'entropia (Jeppson et al, 2012). I due studenti avevano, ad esempio, difficoltà a comprendere come l'entropia resti costante in una trasformazione adiabatica reversibile e questo, secondo Jeppson, perché interpretavano troppo letteralmente che “i microstati sono luoghi (“locations”), dando enfasi al contributo spaziale dell'entropia e trascurando implicitamente il contributo energetico che avrebbe richiesto un'altra interpretazione metaforica.

1.4. Osservazioni

L'analisi della letteratura ha messo in evidenza quali siano i concetti termodinamici particolarmente delicati sia per quanto riguarda il loro significato all'interno della disciplina – per come questa si è sviluppata da un punto di vista storico e logico/teorico –, sia per quanto riguarda la loro comprensione da parte degli studenti.

Dall'analisi emerge come gli studenti sembrano avere l'esigenza di trovare un “meccanismo” causale che leghi in modo deterministico una conseguenza ad una causa tramite relazioni formali, ma anche come questo tipo di ragionamento risulti spesso un ostacolo per un apprendimento significativo.

Emerge poi come sia cruciale e delicato il legame tra l'approccio microscopico e quello macroscopico. Il dibattito sull'efficacia didattica dei due approcci, su come questi debbano essere trattati e in quale relazione è ancora aperto: un approccio storico e macroscopico, caratterizzato dallo studio di trasformazioni e processi ciclici, sembra favorire la capacità di risolvere problemi ma non aiuta la comprensione di grandezze fisiche come, ad esempio, l'entropia; un approccio microscopico sembra invece fornire un modello interpretativo più efficace per far luce sui meccanismi sottostanti ai fenomeni fisici, ma è necessario fare i conti con il modello a particelle, il concetto di microstato e la statistica di Boltzmann. Sembra poi documentata la difficoltà ad interpretare le grandezze macroscopiche quando derivate da un approccio microscopico,

la difficoltà cioè a passare da un modello fisico astratto microscopico ad uno macroscopico.

Anche se gli studenti sembrano sentire l'esigenza di utilizzare il modello microscopico per spiegare quello macroscopico, attribuendo all'approccio microscopico un ruolo interpretativo "più fondamentale", questo spesso risulta non produttivo: se il modello microscopico non è ben compreso, anziché avere il ruolo di essere complementare e chiarificatore, diventa fonte di confusione non solo nella comprensione delle singole grandezze macroscopiche, ma anche nel modo in cui sviluppare il ragionamento.

Dall'analisi della letteratura consultata emerge inoltre che, per rispondere alle difficoltà degli studenti, si propongono per lo più interventi "locali", mirati alla comprensione di singoli concetti, leggi e principi senza inserire la proposta didattica entro un progetto più ampio che prenda in considerazione le peculiarità della termodinamica anche in relazione agli altri settori della conoscenza fisica (ad es. la meccanica): si risponde ad un "meccanismo" di ragionamento con un altro "meccanismo", anche se caratterizzato da altri vincoli formali e matematici che legano le variabili.

L'insegnamento della termodinamica, forse proprio per il suo particolare sviluppo storico e logico/teorico, diventa spesso frammentario e un'analisi, anche superficiale, dei libri di testo di scuola secondaria mostra quanto sia difficile trovare una coerenza all'interno della trattazione. Si cerca di dare significato e chiarire i concetti passando da equivalenze sul piano logico, a percorsi storici, ad applicazioni ingegneristiche; l'approccio macroscopico e microscopico si intrecciano spesso in modo frammentario e inconciliabile. Ad esempio, facendo riferimento al secondo principio, lo si enuncia seguendo Kelvin e Clausius e si mostra l'equivalenza logica delle due formulazioni; poi lo si enuncia in relazione alla macchina di Carnot, alle macchine termiche e frigorifere, si introduce "dal nulla" una nuova grandezza chiamata entropia collegata al disordine e alla irreversibilità, per poi passare ad un accenno alla probabilità a livello microscopico. Inoltre passando dal primo al secondo principio non si chiarisce il rapporto tra energia ed entropia e cambia senza nessuna giustificazione lo stile dell'argomentazione (Duprè in Tarsitani, Vicentini, 1991).

Proprio in relazione a queste ultime osservazioni, in accordo con Giannetto, si può concludere mettendo in evidenza come non solo nella mente degli studenti, ma anche alla base di ogni teoria fisica vi siano diverse “rappresentazioni mentali”: la termodinamica nella scoperta della seconda legge ne è un caso emblematico.

“Noi siamo abituati alla visione che le formulazioni di Clausius e di Kelvin fossero strettamente equivalenti. Tuttavia, è anche ben noto che ci fu una polemica molto forte tra i due scienziati sulla questione della priorità e sull'interpretazione della seconda legge. Queste divergenze non possono essere comprese pienamente attraverso analisi semplicemente esternaliste (ambienti culturali, tendenze nazionaliste, etc.), ma implicano le rappresentazioni personali per le quali fattori esterni possono essere presenti come presupposizioni. Queste RM [Rappresentazioni Mentali] personali sono coinvolte anche al livello interno, formale della fisica e da esse derivano la definizione e il significato stesso dei concetti fondamentali come il calore e l'irreversibilità.” (Giannetto 1992)

“Alla base di una teoria fisica vi sono profonde rappresentazioni mentali così come alla base di una concettualizzazione dell'esperienza di uno studente.” (Giannetto 1992)

La presentazione didattica di una teoria implica pertanto la necessità che l'insegnante sia consapevole che la scelta che fa sottende anche una precisa scelta epistemologica.

“Molti problemi concettuali e metodologici, che emergono durante l'analisi didattica di un argomento scientifico, hanno bisogno di un'elucidazione storica ed epistemologica, il cui obiettivo non è quello di trovare la soluzione 'corretta', ma quello di trovare la possibile RM soggiacente, per fare una scelta e per programmare in accordo la trattazione didattica. Invero, questioni storiche molto interessanti vengono fuori se si ricerca la coerenza globale dell'atteggiamento di uno scienziato che lavora in campi differenti. In questo senso, si deve ammettere una pluralità di livelli, che

vanno dalla 'conoscenza personale' alle più generali 'scuole', 'tradizioni', etc.” (Giannetto 1992)

In questo senso deve essere più profonda la relazione tra filosofia, storia e didattica della scienza.

CAPITOLO 2

Ristrutturazione Disciplinare

“Occorre tenere sempre presente che la presentazione didattica di un concetto, legge o principio, è sempre frutto di una scelta tra diverse possibilità. Ragioni di funzionalità didattica impongono di scegliere una determinata formulazione, un punto di vista, un particolare approccio. In relazione alla termodinamica e alla seconda legge, la cosa è particolarmente manifesta: si può scegliere un approccio fenomenologico, oppure un approccio microscopico, e, anche all’interno di queste due impostazioni, si possono seguire varie strade: assiomatica, induttiva, fenomenologica, costruttiva, ipotetica e via discorrendo.” (Tarsitani, 2005)

In questo capitolo viene presentata la ristrutturazione disciplinare sperimentata in classe mettendo in evidenza i criteri e le scelte di fondo legate alla progettazione. La progettazione è stata condotta con l’obiettivo di favorire la comprensione dei concetti (in particolare, tenendo conto delle rappresentazioni mentali degli studenti, quelli messi in evidenza dalla letteratura come particolarmente problematici), ma anche con l’obiettivo di creare un ambiente di apprendimento sufficientemente ricco da permettere ad ogni studente di integrare le conoscenze specifiche in un percorso più ampio di crescita personale e sociale (Levrini *et al.*, 2010; 2011a; 2011b; Fantini, Levrini, 2012).

Negli ultimi anni, seguendo la prospettiva dei *Design Studies*, è emersa la necessità di ripensare ai *curricula* scolastici in modo da problematizzare l’ambiente di apprendimento e favorire una più efficace risonanza tra la crescita intellettuale personale e quella collettiva del gruppo classe (diSessa, Cobb, 2004; Confrey, 2006), ma anche in modo da rendere l’apprendimento *di* e *in* una disciplina sempre più inclusivo e “psicologicamente sicuro” (Nasir *et al.*, 2006). Questo significa non solo riflettere sulle “tecniche” e sulle “modalità” di insegnamento che aiutano a rendere i contenuti più chiari e a creare un ambiente di apprendimento più coinvolgente e

motivante, ma anche esplicitare una precisa visione disciplinare. Significa non proporre un'immagine di scienza dove è legittimo (e possibile) un unico punto di vista e dove solo gli studenti "naturalmente" interessati possono avere un ruolo riconosciuto. Significa piuttosto mostrare la fisica come una disciplina in cui sono legittimi diversi punti di vista, in cui la discussione aiuta a fare emergere posizioni personali che possono essere confrontate e condivise, in cui il concetto rigido di "spiegazione scientifica", invece di chiudere i discorsi in nome di un'idea ingenua di verità assoluta e di oggettività, diventa essa stessa un argomento di discussione. In questa prospettiva, la questione cruciale: – che cosa “spiega” una “spiegazione” fisica? –, trova spazio e legittimità.

2.1. Criteri e scelte di fondo per la progettazione

La proposta didattica è stata progettata nella convinzione che lo studio della termodinamica abbia grandi potenzialità culturali legate a precise peculiarità che riguardano il suo sviluppo storico, la sua struttura logica e la sua modellizzazione: essa si presta a riflessioni più generali di carattere epistemologico e può svolgere un ruolo importante e significativo nel passaggio dalla fisica classica, in particolare dalla meccanica, alla fisica moderna.

Il duplice obiettivo – favorire la comprensione dei concetti e creare un ambiente di apprendimento sufficientemente ricco – con cui è stato progettato il percorso di termodinamica ha obbligato a fare lo sforzo di inserire la comprensione strettamente disciplinare dei concetti all'interno di una prospettiva di più ampio respiro culturale che aiutasse a costruire una cornice di senso. Per quanto riguarda il primo obiettivo, si sono tenuti presenti i risultati di ricerca analizzati nei paragrafi precedenti, così da porre una particolare attenzione ai “punti” riconosciuti critici da un punto di vista concettuale, mentre per quanto riguarda il secondo obiettivo si è soprattutto fatto riferimento a sperimentazioni condotte dal gruppo di ricerca dell'Università di Bologna (Fantini *et al.*, 2005; Levrini *et al.*, 2010; Levrini, Fantini, 2013). Il gruppo di ricerca ha progettato e sperimentato percorsi di fisica moderna (relatività e meccanica quantistica), in cui si sono privilegiate forme di complessità “produttiva” in grado di favorire ambienti di

apprendimento – ambienti propriamente complessi – sufficientemente ricchi da aiutare ogni studente ad integrare le conoscenze specifiche in un percorso più ampio di crescita personale.

Durante la progettazione del percorso è emerso chiaramente che ragionare localmente sui nodi concettuali disciplinari ha aiutato a far prendere consistenza a quelle forme di complessità individuate come produttive per collocare i concetti in un quadro più ampio. Ma anche viceversa: ragionare sulle forme di complessità produttive per collocare i concetti in una prospettiva più ampia ha permesso di far luce localmente sulle peculiarità disciplinari.

La progettazione è stata allora guidata da quello che potremmo chiamare “*un gioco di coerenza locale – globale*”: dare senso a ciò che si fa localmente – disciplinarmente –, in una prospettiva culturale più ampia e viceversa; il “*gioco locale – globale*” si è tradotto operativamente in una sorta di intreccio circolare tra l’analisi delle peculiarità disciplinari e di come, quando e perché introdurre certe forme di complessità.

Non è facile riproporre il modo in cui, nella progettazione, si è sviluppato l’intreccio di analisi, ma si può mostrare come nella ristrutturazione ci sia una forte coerenza tra le peculiarità della disciplina (difficoltà e potenzialità) e le forme di complessità individuate come produttive e come reciprocamente si diano significato.

Da un punto di vista più strettamente disciplinare

L’attenzione alla struttura logica e alla specificità della modellizzazione ha spinto a ripensare alla termodinamica facendo il grande sforzo di trattare i due approcci - quello macroscopico e quello microscopico – separatamente, in modo da farli emergere come auto-consistenti, coerenti internamente, ciascuno con precise peculiarità ma compatibili tra loro. Seguendo il pensiero di Einstein,¹⁸ si è voluto enfatizzare la struttura teorica dell’approccio macroscopico come una Teoria di Principi e la struttura teorica dell’approccio microscopico come una Teoria Costruttiva. Affrontare i concetti strettamente disciplinari insieme a riflessioni epistemologiche di più ampio respiro su

¹⁸ Einstein, A. (1919). Time, Space, and Gravitation. Times (London). 28 November 1919.

cosa comporta la costruzione di una teoria fisica significa chiarire il gioco della modellizzazione.

In particolare, si è cercato di far luce su tre apparenti paradossi che la modellizzazione dell'approccio macroscopico sembra contenere intrinsecamente. I tre apparenti paradossi, che saranno chiariti nel paragrafo successivo, si possono caratterizzare come:

- a) “familiare – astratto”: parole familiari (ad esempio temperatura, calore...) il cui significato appare semplice e scontato sono invece difficili da definire fisicamente in modo coerente e non tautologico;
- b) “processo – stato stazionario”: la spiegazione dinamica dell'evoluzione di un sistema scompare se la modellizzazione di un processo è una successione di stati di equilibrio nel piano PV;
- c) “reversibile – irreversibile”: l'entropia, che descrive l'intrinseca irreversibilità dei fenomeni è calcolabile solo per trasformazioni reversibili.

Da un punto di vista delle forme di complessità

- *Approccio multi-prospettico*: gli stessi contenuti (fenomenologia) sono stati analizzati dalle due diverse prospettive – microscopico e macroscopico – e confrontati sistematicamente, in modo da mostrare le loro peculiarità e la loro compatibilità.
- *Approccio multi-dimensionale*: i due approcci sono stati analizzati e confrontati a diversi livelli, per le loro implicazioni concettuali, sperimentali e formali, ma anche per le loro peculiarità filosofiche ed epistemologiche.
- *Approccio longitudinale*: il “gioco della modellizzazione”, che caratterizza sia i sistemi sia i processi termodinamici, è stato affrontato mettendo in atto un sistematico confronto con altre modellizzazioni già studiate (in ottica, meccanica classica, relatività ristretta).
- *Approccio trasversale*: una speciale enfasi è stata data al processo di interazione tra la radiazione elettromagnetica e la materia per correlare la descrizione termica, elettromagnetica e ottica dei fenomeni complessi.

Le forme di complessità, tuttavia, hanno preso vita nel momento dell'implementazione grazie ai materiali prodotti e alle attività messe in campo che, a loro volta, non sarebbero state possibili senza quelle forme di complessità.

I materiali e le attività descritte nel capitolo 4 hanno permesso di:

- trattare i due approcci separatamente in modo da mostrare la coerenza interna di ciascuno e confrontarli sistematicamente in modo da mostrare le loro peculiarità e la loro compatibilità (multi – prospettiva);
- confrontare l'approccio macroscopico e l'approccio microscopico all'interno di un dibattito epistemologico sui possibili modi per organizzare la conoscenza (teorie). L'attività è stata svolta attraverso questionari e discussioni collettive per riflettere sui due approcci alla luce del lavoro di Einstein sulle “Teorie Costruttive” e le “Teorie di Principi” (Einstein, 1919) (multi-dimensionalità);
- (in)seguire la domanda portante “Come cambia il gioco della modellizzazione dalla meccanica alla termodinamica?” (longitudinalità);
- applicare i concetti acquisiti allo studio del riscaldamento globale, indagando le sue caratteristiche intra- e inter-disciplinari (trasversalità).

Nella ristrutturazione disciplinare descritta nel paragrafo seguente, le forme di complessità che permettono di costruire un ambiente di apprendimento più ricco possono essere colte solo tenendo presente, come chiave di lettura, quanto detto precedentemente circa i criteri di progettazione e implementazione.

Il percorso è presentato per punti e strutturato in una introduzione e due sezioni (rispettivamente il primo e il secondo principio della termodinamica).

2.2. Il percorso

L'approccio macroscopico e il problema della sua consistenza interna

L'aspetto macroscopico della struttura concettuale è stato ristrutturato con l'obiettivo specifico di mettere a nudo tre apparenti paradossi del gioco della modellizzazione.

a) “Familiare – astratto”. Parole familiari (temperatura, calore...) il cui significato appare semplice e scontato richiedono invece una profonda riflessione epistemologica se si vuole darne una definizione fisica coerente e non tautologica. Per esempio, una definizione macroscopica di temperatura che sia coerente ed eviti le tautologie (la temperatura è ciò che si misura con un termometro, e un termometro è ciò che misura la temperatura) richiede un lungo processo dove la consistenza interna della argomentazione deve diventare esplicita (cfr. Introduzione, paragrafo 2.2.1). Per fare ciò, si è sottolineato lo stato epistemologico dei diversi passi dell’argomentazione, mettendo l’accento sulla distinzione tra “assunzioni” (l’equilibrio come concetto primitivo), “elevare un fatto a principio” (la proprietà transitiva della relazione “essere in equilibrio con”), “implicazioni della definizione nella modellizzazione oggetti/sistemi”. Queste distinzioni costruiscono un’importante impalcatura epistemologica che fornisce un contributo rilevante al raggiungimento di due obiettivi: i) aiutare gli studenti a comprendere il concetto fisico di temperatura, ii) consentire agli studenti di comprendere, in modo esplicito, perché è necessario un certo tipo di astrazione per dare conto di fenomeni la cui percezione è comunemente descritta da parole familiari.

b) “Processo – stato stazionario”. A dispetto del nome termo-dinamica, la spiegazione dinamica dell’evoluzione di un sistema scompare dietro la “strana” scelta di modellizzare un processo come una successione di stati di equilibrio nel piano PV. Tracce del processo dinamico sono riconoscibili solo nella distinzione tra variabili di processo e variabili di stato. Al fine di rendere esplicito il modello dinamico della termodinamica, è necessaria una riflessione epistemologica per sottolineare come le trasformazioni ideali, quasi-statiche, implementino una visione meccanica dell’interazione. Si assume che il sistema abbia, ad ogni istante, proprietà definite, il cui cambiamento è interpretato in termini di “inter-azione” con un agente esterno causale che controlla, in modo deterministico, e passo - passo, l’intero processo (cfr. Sezione 1, paragrafo 2.2.1).

c) “Reversibile – irreversibile”. L’entropia, grandezza definita con il secondo principio e che descrive l’intrinseca irreversibilità dei fenomeni, è calcolabile solo per

trasformazioni reversibili. Un sistema che evolve in modo irreversibile *dimentica* le condizioni iniziali e non torna indietro spontaneamente al suo stato iniziale; un sistema che evolve in modo reversibile “ricorda” le condizioni iniziali e può tornare indietro o andare avanti. Per affrontare questo apparente paradosso è necessaria una riflessione epistemologica sui diversi significati di entropia, così come emergono nel gioco tra modellizzazione e realtà (cfr. Sezione 2, paragrafo 2.2.1).

2.2.1. Lo scheletro concettuale

Domanda portante : Come cambia il gioco della modellizzazione passando dalla meccanica alla termodinamica?

Introduzione – Principio Zero

- a) La problematica definizione di un concetto apparentemente semplice: la temperatura. Riflessioni sulla difficoltà di definire il concetto in modo non tautologico.
- b) Prima assunzione: esiste, in natura, una tendenza universale dei corpi a raggiungere uno “stato di equilibrio” con l’ambiente, ovvero a trovarsi in una situazione di “stasi” per quanto riguarda possibili cambiamenti “esterni” ed “interni”. (l’assunzione del concetto di equilibrio come primitivo).
- c) Un “fatto” elevato a principio: sistemi in equilibrio in uno stesso ambiente e posti a contatto non modificano l’uno le proprietà dell’altro. Dal Principio Zero della Termodinamica alla definizione di temperatura.
- d) Implicazioni del concetto di temperatura nella modellizzazione di oggetti/sistemi: l’inadeguatezza dei modelli meccanici (punto materiale e/o corpo rigido) per dare conto delle nuove proprietà termiche influenzate dall’ambiente e la necessità di considerare uno “stato interno” del corpo.
- e) Riflessione sul significato di misurare una grandezza intensiva attraverso una operazione di “trasduzione” in una grandezza estensiva (lunghezza, volume..).

Sezione I

Primo Principio: approccio macroscopico

- a) Dalla meccanica alla termodinamica: l'attrito e l'"invenzione" dell'energia interna – in coerenza con la modellizzazione macroscopica di sistema – per salvare il principio di conservazione dell'energia.
- b) Il "criptico" concetto di calore: riflessioni su questo particolare processo di interazione che non si osserva né si misura direttamente ma si deduce dall'osservazione e dalla misura di altre grandezze, quali masse e differenze di temperature. (Ri-lettura della legge della calorimetria)
- c) I concetti di calore e lavoro: variabili fondamentali per descrivere le interazioni sistema–ambiente e/o sistema–sistema e in grado di cambiare lo "stato interno" di un sistema.
- d) Energia interna, calore e lavoro: la cruciale distinzione tra variabili di stato e variabili di processo. Discussione sul significato di frasi come "trasferimento di calore" "passaggio di calore" "fornire calore" "assorbire calore", espressioni che risentono del retaggio storico del calorico inteso come fluido che si trasferisce da un corpo ad un altro.
- e) La relazione tra energia interna, calore e lavoro elevata a principio: il I principio della Termodinamica.
- f) La scelta strategica di un caso particolare di sistema termodinamico: il gas perfetto e la sua definizione/modellizzazione fenomenologica come quel particolare gas che soddisfa la legge empirica $PV = nRT$ (Equazione di stato).
- g) Trasformazioni ideali: utili "costruzioni mentali" che consentono di seguire passo – passo il percorso che il sistema compie per passare da uno stato di equilibrio ad un altro; riflessioni sulle rappresentazioni grafiche per ragionare ulteriormente sulle grandezze caratteristiche dello stato e del processo.

Primo Principio: approccio microscopico

- a) Ri-esame del modello di gas perfetto alla luce della visione epistemologica che tende a ridurre le proprietà termiche a proprietà meccaniche: introduzione di specifiche ipotesi sugli elementi microscopici costituenti il gas.

b) Teoria cinetica dei gas: interpretazione microscopica.

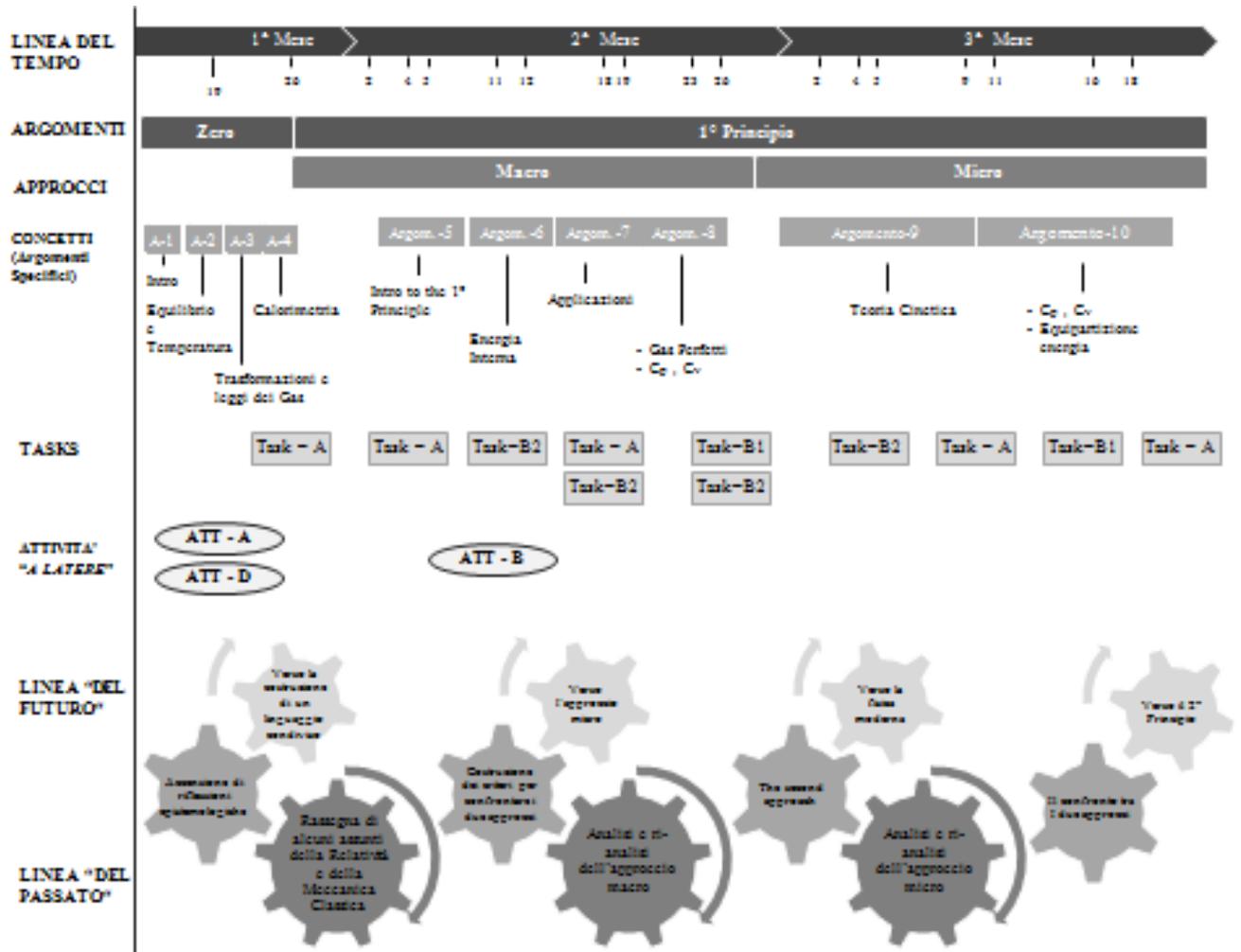


Figura 2. Lo sviluppo temporale della prima parte del percorso (per la legenda cfr. Figura 4)

Sezione 2

Secondo Principio: approccio macroscopico

a) L'irreversibilità dei processi reali spontanei e l'insufficienza del primo principio per descriverli: analisi di emblematiche tipologie di trasformazioni spontanee irreversibili (espansione libera di una gas, passaggio di calore da un corpo a temperatura superiore ad una corpo a temperatura inferiore, dissipazione di energia meccanica, elettrica ecc.. per attrito...).

- b) Il "verso" spontaneo dei processi naturali come un "fatto di natura" elevato a principio: il II principio della Termodinamica e i suoi diversi enunciati come casi particolari di un principio generale.
- c) Dal reale all'ideale: l'introduzione della modellizzazione delle trasformazioni reversibili come quelle trasformazioni quasi – statiche che possono essere effettuate indifferentemente sia in un verso sia nell'altro. Un "apparente paradosso": come possono trasformazioni reversibili dare ragione dell'irreversibilità dei fenomeni naturali, se un sistema che evolve reversibilmente *ricorda* le condizioni iniziali, mentre un sistema che evolve irreversibilmente verso lo stato di equilibrio *dimentica* le condizioni iniziali e spontaneamente non ci ritorna?
- d) Lo specifico e cruciale ruolo delle trasformazioni reversibili quando sono applicate a macchine ideali:
- i) evidenziano una asimmetria "intrinseca", ineliminabile tra calore e lavoro (il rendimento minore di 1 di una macchina termica ideale);
 - ii) portano alla necessità di introdurre una nuova variabile di stato, l'entropia, che permetta, nel caso ideale, di distinguere tra lavoro e calore (nel caso ideale un'interazione in modalità lavoro trasferisce solo energia, mentre in modalità calore sia energia sia entropia);
- f) dall'ideale al reale: la produzione di entropia dovuta ad ineliminabili processi spontanei e il significato di entropia come quella grandezza in grado di quantificare la quantità di cambiamento irreversibile nelle trasformazioni reali;
- g) rilettura del primo e del secondo principio della termodinamica così da vedere due possibili facce del "criptico" concetto di calore: $Q = \Delta U - L$ la faccia energetica; $Q = T\Delta S$ la faccia entropica.

Secondo Principio: approccio microscopico

- a) L'evoluzione del progetto epistemologico di ridurre la fisica alla meccanica intesa come scienza di base: la scelta di rottura di accettare la statistica nella spiegazione fisica e l'introduzione del ruolo storico giocato da Maxwell e da Boltzmann per una interpretazione microscopica dell'entropia;

- b) il progetto di Maxwell: dallo studio del “moto chiamato calore” alla interpretazione statistica dello stato di equilibrio attraverso la distribuzione statistica delle velocità delle molecole di un gas perfetto;
- c) la nozione di “probabilità a priori” e riflessioni sul problema della compatibilità di principio di un modello microscopico di tipo meccanico (e dunque intrinsecamente reversibile) con l’irreversibilità del secondo principio;
- d) il progetto di Boltzmann e il suo passaggio decisivo: lo sviluppo del progetto di Maxwell nell’ambito concettuale di una teoria delle probabilità a priori e l’interpretazione dello stato di equilibrio – lo stato macroscopico verso cui evolve il sistema – come quello stato che corrisponde al maggior numero di stati microscopici, lo stato più probabile.

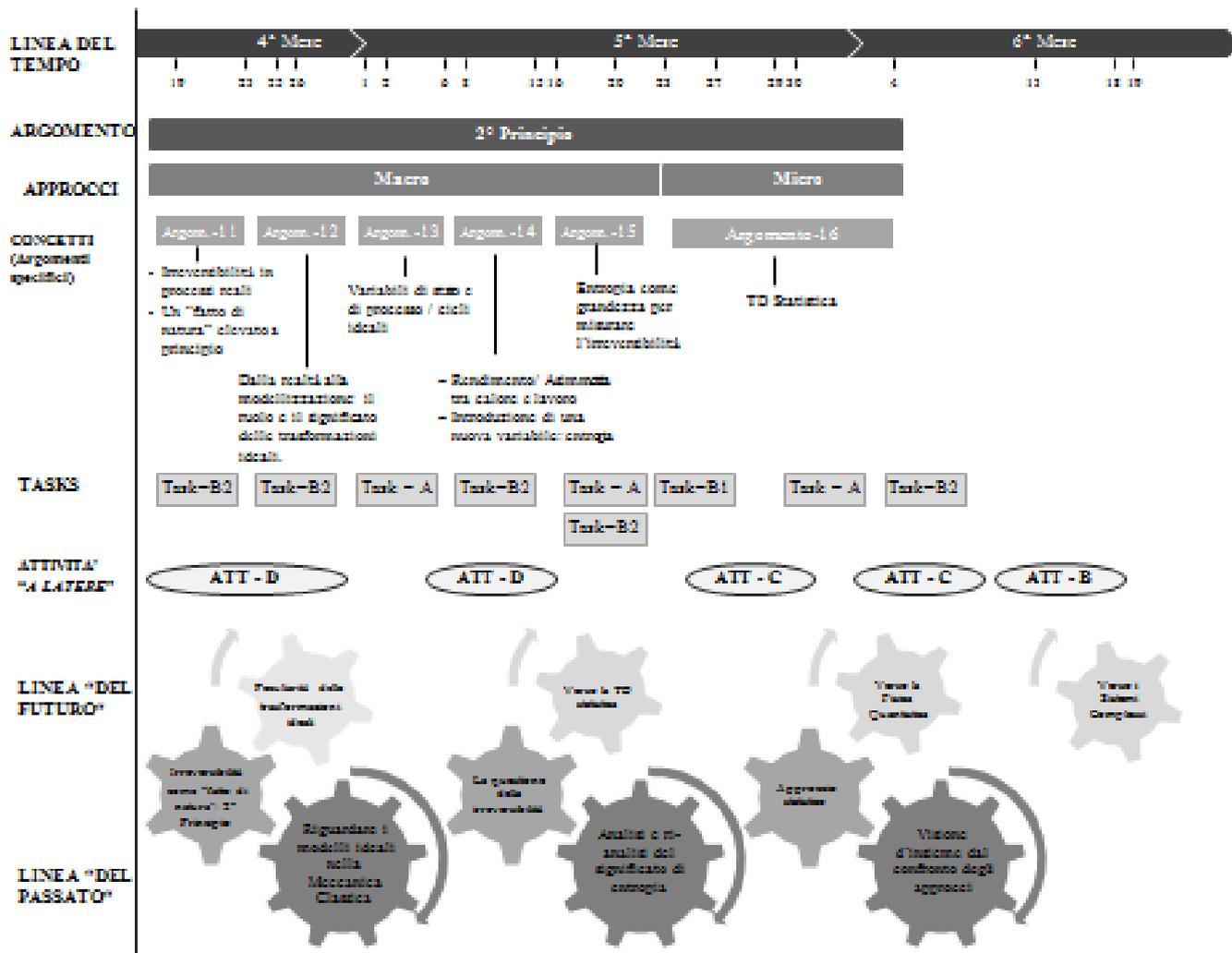


Figura 3. Lo sviluppo temporale della seconda parte del percorso (per la legenda cfr. Figura 4)

	<i>Descrizione</i> <i>Attività di classe implementate lungo l'intero percorso</i>
Task – A	Esercizi di tipo diverso: <ul style="list-style-type: none"> - esercizi standard - esercizi mutuati dalla letteratura e riconosciuti come esercizi critici - esercizi in preparazione alle verifiche scritte
Task – B	Verifiche scritte
Task – B2	Verifiche orali in cui gli studenti sono chiamati a consolidare singoli concetti ma anche a inserirli all'interno dell'intero percorso per costruire nessi e legami
<i>Attività “a latere”</i>	<i>Descrizione</i> <i>Particolari tipi di attività con l'obiettivo specifico di implementare le forme di complessità produttiva</i>
Attività A	Questionario iniziale
Attività B	Discussioni di classe orchestrate dall'insegnante
Attività C	Seminari tenuti da professori universitari
Attività D	Lettura di brani di saggi critici

Figura 4 – Legenda

CAPITOLO 3

Ricerca qualitativa: un dibattito ampio, articolato e difficile

"Qualitative research, also called naturalistic inquiry, is developed within the social and human sciences, and refers to theories on interpretation (hermeneutics) and human experience (phenomenology). They include various strategies for systematic collection, organization and interpretation of textual material obtained while talking with people or through observation. The aim of such research is to investigate the meaning of social phenomena as experienced by the people themselves."

(Malterud, 2001)

Con riferimento alla sperimentazione del percorso di termodinamica si sono dovuti affrontare, come verrà messo in evidenza nel capitolo successivo, importanti questioni metodologiche che hanno riguardato non solo la raccolta e l'analisi dei dati, ma anche il modo in cui "raccontare" ciò che stava emergendo dai dati stessi. È stata forte, allora, l'esigenza di orientarsi nel dibattito all'interno della Ricerca Qualitativa: un dibattito ampio, articolato e a volte anche difficile per la varietà dei significati che vengono attribuiti a questa espressione.

"Se l'espressione "ricerca quantitativa" ha un significato relativamente condiviso, l'espressione "ricerca qualitativa" appare alquanto polisemica". (Ricolfi, 1997)

In questo capitolo si vuole inquadrare storicamente e filosoficamente il dibattito tra ricerca qualitativa e ricerca quantitativa, individuare i paradigmi di riferimento e, all'interno della ricerca qualitativa, individuare le diverse tradizioni metodologiche, per costruire un quadro di riferimento in cui collocare il lavoro di ricerca oggetto della tesi.

3.1. Quadro storico-filosofico

Scrive Maria Fobert Veutro¹⁹

“È opinione comune che la riflessione sui diversi approcci alla scienza abbia origine nel celebre dibattito sul metodo iniziato con Dilthey, e alimentato in Germania prima da Windelband e Rickert, poi da Weber e Simmel, fino alla scuola di Francoforte e oltre; e in America dalle scuole della fenomenologia, dell’interazionismo simbolico e dell’etno-metodologia.”

Seguire da vicino lo sviluppo di un dibattito così lungo, ampio e complesso, articolato in diverse scuole di pensiero, e che coinvolge questioni di tipo ontologico, epistemologico e metodologico, esula dall’obiettivo di questo lavoro. Tuttavia è utile individuare schematicamente – quindi con l’inevitabile rischio della semplificazione – un quadro storico/filosofico che aiuti ad orientarsi circa i presupposti che hanno guidato la ricerca teorica nel campo delle scienze umane.

Il dibattito sulle diverse branche del sapere – relativamente sia alla natura dell’”oggetto” di studio e alla possibilità di una sua conoscenza, sia al metodo per giungere alla conoscenza stessa – si sviluppa in Germania, a cavallo tra Ottocento e Novecento, e vede i suoi maggiori esponenti nel filosofo e psicologo tedesco Wilhelm Dilthey (1833-1911) di indirizzo post-hegeliano e nel filosofo tedesco Wilhelm Windelband (1848-1915) di indirizzo neo-kantiano.

Dilthey, facendo riferimento all’oggetto della conoscenza e alla relazione tra soggetto che studia e oggetto studiato, distingue fra mondo della natura e mondo storico-sociale. Il primo, studiato dalle *Scienze della Natura*, esiste indipendentemente dal soggetto e la sua conoscenza avviene dall’esterno; il secondo, studiato dalle *Scienze dello Spirito*, si conosce solo dall’interno. Né la filosofia della storia né la sociologia possono dare

¹⁹ Fobert Veutro M., *Qualità e quantità: una sintesi del dibattito*, in *L’analisi qualitativa. Teorie, metodi, applicazioni*, (a cura di) Cipriani R., Armando Editore, 2008.

rigore ai procedimenti della conoscenza spirituale in quanto finirebbero per sostituire l'esperienza concreta con affermazioni metafisiche. E' la psicologia che, avendo come oggetto l'unità del mondo spirituale, può svolgere questo compito dando ragione dell'interazione tra pensiero, volontà e sentimento.

Dilthey scrive:

“Il loro ambito [delle scienze dello spirito] si estende quanto l'intendere, e l'intendere ha il suo oggetto unitario nell'oggettivazione della vita. Così il concetto di disciplina spirituale è determinato, secondo l'ambito dei fenomeni che cadono sotto di essa, mediante l'oggettivazione della vita nel mondo esterno. Soltanto ciò che lo spirito ha creato, esso lo intende. La natura, cioè l'oggetto della conoscenza naturale, racchiude la realtà prodotta indipendentemente dall'attività dello spirito. Tutto ciò a cui l'uomo, operando, ha impresso la sua impronta, costituisce l'oggetto delle scienze dello spirito.

E anche l'espressione “scienza dello spirito” riceve a questo punto la sua giustificazione. Si è nel passato discorso dello spirito delle leggi, del diritto, della costituzione: ora possiamo dire che tutto ciò in cui lo spirito si è oggettivato rientra nell'ambito delle scienze dello spirito.

Dal momento che la connessione dell'apprendimento oggettivo sta sotto le condizioni contenute nelle scienze dello spirito, viene a delinearsi la particolare struttura di tali discipline. Sulla base delle forme e delle operazioni generali del pensiero si fanno qui valere compiti specifici, che trovano la loro soluzione nell'intreccio dei propri metodi.”²⁰

Per Windelband, invece, la distinzione non è solo, e non tanto, nell'oggetto di osservazione, quanto piuttosto nel metodo e, proprio in base al metodo, individua due tipologie di scienze: le *Scienze Nomotetiche* (*nómos* e *thetikós*: che tende a stabilire leggi) e le *Scienze Idiografiche* (*ídios* e *graphikós*: che descrive il particolare).

²⁰ W. Dilthey, *Der Aufbau der geschichtlichen Welt in den Geisteswissenschaften* in *Gesammelten Schriften*, VII, Teubner, Leipzig und Berlin; trad. it., *La costruzione del mondo storico nelle scienze dello spirito*, in *Critica della ragione storica* (a cura di P. Rossi), Einaudi, Torino, 1982.

Le scienze nomotetiche sono quelle in cui è possibile generalizzare, quelle in cui le leggi hanno carattere generale, anche se sono state trovate studiando un fenomeno o un caso particolare. Nelle scienze ideografiche non si possono invece trovare leggi universali, ma si possono studiare e spiegare solo casi particolari. Le scienze della natura rientrano tra le scienze nomotetiche in quanto esse permettono di ricavare leggi di carattere universale (ad esempio la legge di gravitazione). Le scienze dello spirito sono invece scienze idiografiche. Tuttavia, dice Windelband, non è detto che ad esempio la storia sia una scienza solo idiografica. Dipende dal metodo utilizzato: lo storico può scegliere di studiare una situazione particolare, e il suo oggetto di studio può allora rientrare in una scienza idiografica, così come può decidere di studiare la storia nel suo divenire, e il suo oggetto di studio può rientrare in una scienza nomotetica. La differenza tra le diverse scienze è principalmente di tipo metodologico.

Il metodo delle scienze naturali, considerate come scienze nomotetiche, viene applicato anche alle Scienze dello Spirito principalmente perché, come scrive Dilthey, le Scienze della Natura hanno elaborato per prime i loro metodi.

“[...] le scienze dello spirito sono state sempre influenzate dalle scienze della natura; e poiché queste hanno elaborato prima i loro metodi, si è avuto in un vasto ambito un adattamento di essi ai compiti delle scienze dello spirito. In due punti ciò risulta particolarmente evidente: nella biologia sono stati scoperti per la prima volta i metodi comparativi poi sempre maggiormente applicati alle scienze sistematiche dello spirito, e i metodi sperimentali elaborati dall’astronomia e dalla fisiologia sono stati trasferiti alla psicologia, all’estetica e alla pedagogia. Anche oggi nello sforzo di soluzione dei compiti particolari, lo studioso di psicologia, di pedagogia, di linguistica o di estetica si chiede spesso se i mezzi e i metodi scoperti nelle scienze della natura per la soluzione di problemi analoghi possano venir sfruttati nel proprio campo. Ma, nonostante tali punti particolari di contatto, la connessione delle forme di procedimento delle scienze dello spirito è, fin dal suo inizio, del tutto diversa dalla connessione

delle scienze della natura.”

Non è questa l'unica ragione: applicare il metodo delle scienze naturali garantisce anche, secondo una impostazione positivista, veridicità alla conoscenza stessa. Secondo questa prospettiva infatti le scienze sono tali se danno spiegazioni causali (gli effetti si riconducono alle cause) e sono quindi in grado di produrre leggi di carattere generale.

Senza entrare nel merito di controversie complesse, si possono tuttavia, seguendo Corbetta, individuare nel positivismo (e neo-positivismo poi) e nell'interpretativismo i due paradigmi contrapposti che hanno guidato il quadro teorico della ricerca nel campo delle scienze umane e in particolare delle scienze sociali (Corbetta, 1999).

I due paradigmi si contrappongono per le risposte che vengono date a domande di carattere sia ontologico (La realtà esiste?), sia epistemologico (La realtà è conoscibile? In che misura è conoscibile?), sia metodologico (In che modo la realtà può essere conosciuta?).

Scrive Corbetta:

“Il paradigma positivista (il primo ad essere utilizzato nelle scienze sociali) studia la realtà sociale utilizzando gli apparati concettuali, le tecniche di osservazione e misurazione, gli strumenti di analisi matematica e i procedimenti di inferenza delle scienze naturali. Il primo vero sociologo positivista è Durkheim, la cui teoria impone di trattare i fatti sociali come cose effettivamente esistenti al di fuori delle coscienze individuali e studiabili oggettivamente. L'ontologia del positivismo afferma quindi che la realtà sociale ha esistenza effettiva ed è conoscibile, come se si trattasse di una “cosa”. Dal punto vista epistemologico, esso si basa sul dualismo tra ricercatore e oggetto di studio (che non si influenzano a vicenda in nessun modo), presume di ottenere risultati veri e certi, il suo obiettivo è quello di spiegare e di formulare leggi naturali e generali immutabili. La metodologia positivista prevede quindi esperimenti e manipolazioni della

realtà, con osservazioni e distacco tra l'osservatore e l'osservato; il suo modo di procedere è prevalentemente induttivo (dal particolare al generale). Le tecniche utilizzate sono quantitative (esperimenti, statistica) e si utilizzano le variabili.”

Alle critiche al “realismo ingenuo” del positivismo risponde il neo-positivismo, che si presenta con i caratteri così descritti da Geymonat:

“Rigida difesa delle esigenze della ragione, scrupolosa ricerca di chiarezza, individuazione di tutte le ipotesi accolte da una qualunque teoria, rifiuto sistematico delle argomentazioni non controllabili (e quindi di qualsiasi appello all'intuizione, al sentimento ecc.). Il grande strumento usato dai suoi numerosi sostenitori, in tutte le loro trattazioni, fu l'analisi scrupolosa del linguaggio, da condursi ora sulla base di considerazioni puramente logiche ed ora invece sulla esplicitazione del contenuto operativo dei concetti. In una prima fase essi lo applicarono soltanto al linguaggio scientifico, in fasi successive a tutti i linguaggi. Così la discriminazione tra problemi forniti e problemi sforniti di senso, fra domande ben poste e mal poste, fra discorso rigoroso e divagazioni metafisico-poetiche, parve costituire il tema dominante della rinata filosofia, o per lo meno della sola filosofia “seria” adeguata alla serietà del pensiero scientifico moderno.”

Il neopositivismo riconosce ancora una realtà esterna esistente indipendentemente dall'osservatore, il quale però influenza l'oggetto di studio rendendo l'osservazione empirica *theory laden*. Anche se l'osservatore, per poter formulare delle leggi, cerca di ridurre il più possibile l'interferenza con l'oggetto studiato, le leggi perdono il loro carattere assoluto, diventano storicamente collocate ed è possibile conoscere l'oggetto di studio solo in modo imperfetto e probabilistico (realismo critico). La metodologia resta sostanzialmente ancorata a tecniche quantitative, anche se si riscontra una apertura verso le analisi qualitative.

Al positivismo/neo-positivismo, si contrappone l'interpretativismo, per il quale non esiste una realtà oggettiva esterna, e la scienza non può spiegare i fenomeni sociali con leggi nomotetiche di causa-effetto. Per comprendere i fenomeni si può solo tentare di interpretarli – orientamento idiografico centrato sul particolare – in una interdipendenza tra il soggetto che studia e l'oggetto studiato.

Scrivo ancora Corbetta:

“L'interpretativismo, che vede in Weber il suo esponente principale, non si propone di spiegare la realtà, bensì di comprenderla; in questo modo si pone all'opposto del positivismo per quanto riguarda i punti principali del paradigma. Infatti, la sua ontologia prevede il costruttivismo e il relativismo (realtà multiple), vale a dire che non esiste una realtà oggettiva (ogni individuo produce una sua realtà, e solo questa realtà è conoscibile); inoltre anche le singole realtà individuali, o anche condivise tra i gruppi sociali, variano comunque tra le diverse culture, e quindi non esiste una realtà sociale universale valida per tutti.[...]. Nel perseguire il suo scopo (che è quello della comprensione del comportamento individuale), la ricerca sociale può servirsi di astrazioni e generalizzazioni: i tipi ideali e gli enunciati di possibilità. La metodologia prevede l'interazione tra studioso e studiato, perché solo in questo modo è possibile comprendere il significato attribuito dal soggetto alla propria azione. Le tecniche sono quindi qualitative e soggettive, e il metodo usato è quello dell'induzione (dal particolare al generale).”

3.2. Paradigmi epistemologici di riferimento e loro influenza sulla metodologia della ricerca

Abbracciare un paradigma di riferimento – a grandi linee: il paradigma positivista/neo-positivista oppure quello interpretativista – influenza non solo i presupposti teorici della ricerca, ma anche la metodologia della ricerca stessa.

Nel paradigma positivista/neopositivista – a cui fa riferimento l’approccio standard²¹ che utilizza una metodologia di analisi quantitativa – la teoria, che può venire determinata anche facendo riferimento alla letteratura, precede l’osservazione e i dati empirici, che vengono trattati muovendosi nel contesto della giustificazione, e servono di sostegno alla teoria stessa. Il fenomeno studiato, in base agli obiettivi della ricerca, viene frammentato nelle sue parti, nel tentativo di individuare i concetti inerenti alla realtà sociale oggetto di studio e le “proprietà individuali” dei soggetti coinvolti.

Ancora prima di iniziare operativamente la ricerca, le proprietà e i concetti, che diventano elementi costitutivi della teoria stessa, devono essere “operativizzati”, ossia trasformati in “variabili osservabili”, che possano venire trattate con tecniche matematiche, in particolare con la statistica. L’analisi dei dati poi, cercando le cause che provocano la variazione delle variabili, permette un controllo empirico sulla teoria che, come si è detto, è individuata a priori.

Il disegno di ricerca è rigidamente strutturato e le decisioni su come condurre operativamente la ricerca vengono stabilite “a tavolino” prima dell’inizio del lavoro sul campo; il lavoro sul campo, poi, è condotto in modo impersonale, nel senso che il ricercatore assume un punto di vista esterno alla realtà oggetto di studio. Il ricercatore, quindi, opera in modo il più possibile neutro e distaccato, e studia solo ciò che è stato stabilito in fase di progetto della ricerca, prescindendo dalle sue visioni personali. Questa modalità di procedere dovrebbe garantire oggettività alla ricerca, perché dovrebbe essere in grado di garantirne la replicabilità e la possibilità di controllo da parte della comunità scientifica (replicabilità e controllo sono infatti elementi essenziali del metodo scientifico) .

Questo metodo di ricerca sembra limitare l’aspetto interpretativo legato alla soggettività del ricercatore. Tuttavia, anche alcuni ricercatori che abbracciano questo tipo di approccio non negano la difficoltà di mantenere un punto di vista esterno, e riconoscono

²¹ I termini *approccio standard* e *approccio non standard* sono stati introdotti da Marradi in *Manuale di metodologia delle scienze sociali* (2007) e condivisi da molti altri ricercatori per fare riferimento rispettivamente all’approccio quantitativo e qualitativo. Marradi fa risalire i due approcci alla distinzione tra scienze della natura e scienze dello spirito di Dilthey.

che, già nella fase iniziale della ricerca in cui si selezionano le variabili da analizzare, c'è un forte aspetto interpretativo. Campelli²² scrive ad esempio.

“È irrealista la rappresentazione degli strumenti standardizzati come capaci di sfuggire completamente, per definizione, ai rischi dell'interazione” e ancora “il dato va costruito e soprattutto va interpretato”.

Nel paradigma interpretativista – a cui fa riferimento l'approccio non standard – l'approccio è “naturalista” cioè la ricerca è effettuata in un *ambiente naturale* (natural setting); l'analisi è principalmente qualitativa e viene usata una modalità *Case Study*.

Per Lincoln e Guba, come sostengono nel loro volume *Naturalistic Inquiry* (1985), la *ricerca naturalista* è un paradigma di ricerca (*Naturalist Paradigm*) che fornisce il modello di come condurre la ricerca stessa. La distinzione tra ricerca naturalista e non è strettamente legata alla contrapposizione tra i due differenti paradigmi positivista e naturalista, i cui principali assunti sono schematizzati, dagli stessi autori, nella tabella sottostante.²³

<i>Axioms About</i>	<i>Positivist Paradigm</i>	<i>Naturalist Paradigm</i>
The nature of reality	Reality is single, tangible and fragmentable	Realities are multiple, constructed and holistic
The relationship of knower to the known	Knower and known are independent, a dualism	Knower and known are interactive, inseparable
The possibility of generalization	Time and context free generalizations (nomothetic statements) are possible	Only time and context bound working hypotheses (idiographic statements) are possible
The possibility of causal linkage	There are real causes, temporally precedent to	All entities are in a state of mutual simultaneous

²² Campelli E., *Metodi qualitativi e teoria sociale*, in Cipolla C., de Lillo A. (a cura di), *Il sociologo e le sirene. La sfida dei metodi qualitativi*, Angeli Editore, Milano, 1996

²³ *Competing Paradigms in qualitative research* (1994) In Denzin, N.K., Lincoln, Y.S. (Eds) *Handbook of qualitative research*. Thousand Oaks. CA:Sage.

	or simultaneous with their effects	shaping, so that it is impossible to distinguish causes from effects
The role of values	Inquiry is value-free	Inquiry is value-bound

Nel paradigma interpretativista/naturalista la realtà sociale oggetto di analisi è interpretata dal ricercatore contestualmente all'osservazione sul campo e la teoria non può precedere l'osservazione, in quanto la formulazione iniziale di una teoria potrebbe condizionare il ricercatore a tal punto da impedirgli di comprendere il fenomeno studiato. Teoria e osservazione procedono intrecciati, e il ricercatore deve essere in grado di mettersi in quella particolare disposizione che gli permette, per dirlo con Marradi (2007), di *“spalancare gli occhi”* e *“tendere l'orecchio”*.

In questo modo si possono individuare concetti che a loro volta devono essere in grado di orientare lo sguardo del ricercatore senza condizionarlo: devono cioè essere, per dirlo con Blumen, *“concetti sensibilizzanti”* che orientano la fase operativa ma predispongono anche alla percezione teorica che è ancora da definire. I concetti non sono in nessun modo trattati con l'obiettivo di ridurre la realtà empirica in variabili astratte (come nell'approccio standard), ma diventano una sorta di guida di avvicinamento alla realtà così come è vissuta dal ricercatore.

Il ricercatore si immerge pertanto il più possibile nella realtà oggetto di studio, con la consapevolezza che sta mettendo in campo il proprio modo di guardare, implicito o esplicito che sia, ma anche con la consapevolezza che deve tenere conto del punto di vista dei soggetti studiati in una sorta di relazione di immedesimazione empatica che renda possibile la comprensione e la costruzione di significato. Questo obbliga ovviamente il ricercatore ad una osservazione e un coinvolgimento sul campo prolungato, in modo che ci sia il tempo di sviluppare quel rapporto di fiducia con i membri della realtà sociale studiata che permetta a questi ultimi di assumere un ruolo attivo.

Il sapere personale, l'esperienza, l'empatia del ricercatore non vengono visti come elementi da ridurre o eliminare, ma come una risorsa che assume un ruolo significativo nell'interpretazione dei dati.

Il disegno di ricerca non può allora che essere aperto, modellato nel corso dell'osservazione sul campo, idoneo a captare l'imprevisto, interessato anche a situazioni uniche e locali, a singoli casi piuttosto che alla rilevanza statistica.

In questo quadro generale di riferimento, si possono tuttavia individuare due tradizioni metodologiche caratterizzate da particolari strategie di analisi che affrontano in modo diverso il problema dell'attendibilità e della affidabilità della ricerca.

3.3. Tradizioni metodologiche

All'interno della ricerca qualitativa, che si propone di descrivere e interpretare un "pezzo di realtà sociale", determinando legami e relazioni tra i vari aspetti di realtà presi in considerazione, si possono individuare, a grandi linee, due tradizioni metodologiche: quello dello studio etnografico e quello fondato sulla cosiddetta *Grounded Theory*.

L'analisi fondata su uno studio etnografico ha come obiettivo la descrizione del fenomeno oggetto di studio, attraverso una *narrazione* in cui il ricercatore cerca di ricostruire, in modo convincente, la sua interpretazione della realtà sociale; l'analisi fondata sulla *Grounded Theory* ha invece l'obiettivo più ambizioso di costruire una teoria, una teoria "fondata sui dati".

*"La Grounded Theory ha assunto una veste particolarmente rilevante sia come prospettiva della sociologia interpretativa, che come metodologia della ricerca qualitativa, tanto in sociologia che, più in generale, nelle scienze sociali: quello della costruzione di una teoria sociologica a partire dai dati: l'altro è identificato con lo studio etnografico che privilegia la descrizione accurata dei fenomeni sociali invece che, appunto, la costruzione teorica."*²⁴

Come verrà illustrato più dettagliatamente nel paragrafo seguente, la *Grounded Theory* si può collocare all'interno del paradigma interpretativista, nel senso che la teoria non

²⁴ Stati S., *La scoperta della Grounded Theory*, Introduzione a Glaser BG., Strauss AL. *La scoperta della Grounded Theory. Strategie per la ricerca qualitativa*, Armando Editore, 2009

precede l'osservazione ma teoria e osservazione procedono intrecciati, e il ricercatore deve essere in grado di mettersi nelle condizioni di coglier quei "concetti sensibilizzanti" che sono in grado di orientare la ricerca stessa. Tuttavia, sia nella prima versione di Barney G. Glaser e Anselm L. Strauss (*Grounded Theory classica*), sia nella seconda di Anselm L. Strauss e Julien Corbin (*Full conceptual description*), in modo più o meno esplicito, è presente la convinzione di fondo, ancora di stampo positivista, che il dato osservativo è oggettivo e studiabile empiricamente.

Solo negli ultimi quindici anni, con lo svilupparsi di nuove riflessioni epistemologiche sulla ricerca, si è fatta strada in modo esplicito, anche all'interno della *Grounded Theory*, l'idea che il dato osservato non è esterno alla ricerca, ma la teoria è il frutto condiviso della complessità delle relazioni tra osservatori e soggetti osservati.

3.3.1. Grounded Theory

Il metodo della *Grounded Theory* prende forma, nella seconda metà degli anni 60 del Novecento, con la pubblicazione del volume "*The Discovery of the Grounded Theory*" di Barney G. Glaser e Anselm L. Strauss. La metodologia di analisi proposta nel testo risente della diversa formazione dei due autori: Glaser formatosi alla Scuola della Columbia University è di impostazione positivista con, alle spalle, una grande esperienza nell'analisi quantitativa, mentre Strauss proviene dalla Scuola di Chicago e ha una grande esperienza di ricerca sul campo.

“Quando si pensa al Dipartimento di Sociologia della Columbia University, vengono immediatamente alla mente la teoria del medio raggio di Merton e la metodologia quantitativa di Lazarsfeld. Su di un altro versante, la “Scuola di Chicago” (fra gli anni Venti e Cinquanta) è tradizionalmente legata alla ricerca qualitativa in profondità, ad una metodologia considerata meno rigorosa e a quadri teorici eterogenei e sfuggenti.

Per una bizzarra combinazione che ha intrecciato le loro carriere, i due autori di questo libro si sono formati proprio alla Columbia il primo e a Chicago il secondo. Se segnaliamo questo aspetto è solo per enfatizzare la

nostra convinzione che nessuna di queste tradizioni sociologiche – né peraltro alcun'altra della sociologia del dopoguerra – è riuscita a colmare l'imbarazzante divario tra teoria e ricerca empirica. Il divario è altrettanto vasto oggi quanto lo era nel 1941, quando Blumer lo segnalava con preoccupato rammarico o nel 1949, quando Merton suggeriva con molto ottimismo una possibile soluzione."²⁵

Anche se i due autori provengono da un diverso percorso intellettuale e una diversa formazione epistemologica, hanno entrambi la convinzione che sia giunto il momento di avviare una seria riflessione metodologica.

La metodologia proposta da Glaser e Strauss si basa su un intreccio continuo tra raccolta, analisi dei dati e concettualizzazioni, e ha come obiettivo la costruzione di una teoria "fondata sui dati": i dati empirici non descrivono/interpretano semplicemente un fenomeno, ma su di essi, attraverso un processo di concettualizzazione in cui i dati acquisiscono un vero e proprio "statuto teorico", si "fonda" una teoria.

[...]La teoria rappresenta una strategia con cui trattare i dati della ricerca e fornire modalità di concettualizzazione ai fini della descrizione e della spiegazione di determinati fenomeni."

E ancora:

"Una teoria basata sui dati di solito non viene confutata da ulteriori dati né superata da un'altra teoria ma, essendo intimamente legata ai dati, è destinata a durare malgrado le inevitabili modifiche e riformulazioni cui andrà soggetta."

In sostanza, dunque, la teoria emerge dai dati e non è il frutto di un metodo deduttivo o di una speculazione teorica a priori che trova nei dati una prova empirica o una giustificazione.

²⁵ Strati A. Prefazione a Glaser G.G., Strauss A.L., *La scoperta della Grounded Theory. Strategie per la ricerca qualitative*, Armando Editore, 2009.

“Siamo essenzialmente convinti che produrre una Grounded Theory consenta di pervenire ad una teoria ad un tempo utile ed adeguata ai suoi possibili utilizzi. In questo senso la nostra proposta si colloca agli antipodi rispetto alla produzione di teoria attraverso la deduzione logica da assunzioni aprioristiche.”

Il ricercatore/osservatore pertanto, costruisce la teoria partendo dai dati e non dall'analisi della letteratura o da ipotesi a monte. Le domande iniziali, che inevitabilmente il ricercatore deve porsi per iniziare la ricerca, devono avere origine dalla sua sensibilità, e non devono condizionare l'analisi ma avere solo funzione di guida. Precisano gli autori nel IX capitolo:

“la sorgente primaria di ogni teorizzazione dotata di senso è costituita dalle intuizioni sensibilizzanti dello stesso osservatore. Come ciascuno sa, queste possono coglierti in qualsiasi momento, al mattino o alla sera, improvvisamente o dopo una lenta maturazione, durante il lavoro o il riposo [...] Inoltre possono essere ricavate direttamente dalla teoria (propria o altrui) o aver luogo semplicemente al di fuori di ogni teoria [...] Un ricercatore può avere o sviluppare intuizioni cruciali non solo nel corso della propria ricerca (e a partire dalla propria ricerca), ma anche dalle proprie esperienze personali precedenti o al di fuori di essa”.

Le intuizioni del ricercatore diventano produttive, al fine di costruire una teoria, se vengono trasformate in *concetti*, i quali devono essere contraddistinti da due caratteristiche: devono essere *analitici*, cioè essere in grado di rilevare le peculiarità di una “entità concreta”, e al tempo stesso devono essere *sensibilizzanti*, ovvero

“produrre una fotografia “significativa” suffragata da adeguate immagini che siano in grado di evocare tratti della propria esperienza personale.”

La teoria non si costruisce *sul* “fatto che ci sta davanti”, ma *dal* lungo e faticoso processo di concettualizzazione che permette di individuare quelle che Glaser e

Strauss chiamano le *categorie concettuali* e le *proprietà concettuali delle categorie*. Queste categorie e proprietà, al livello concettuale più basso, emergono fin da subito, dalla prima analisi dei dati, ma le categorie più importanti e unificanti si mettono a punto solo in momenti successivi e si chiariscono, modificano, sono eliminate e/o sostituite con altre durante tutto il processo di raccolta – analisi – concettualizzazione dei dati fino ad avere vita separata rispetto alle evidenze che le hanno prodotte. Più volte gli autori ribadiscono che le categorie sono solo indicate dai dati, non sono i dati: è la sensibilità del ricercatore e la sua capacità nel processo di concettualizzazione che permette di definirle.

“Una categoria si regge da sé in quanto elemento concettuale della teoria stessa, laddove una proprietà è un aspetto concettuale o un elemento di una categoria.[...] Si deve tener presente che sia le categorie, sia le proprietà sono concetti indicati dai dati e non i dati stessi.”

Come si è detto, il ricercatore si muove, in un processo *iterativo multiplo*, dalla raccolta dei dati al processo di analisi, che non ha una sequenza temporale definita. Le domande iniziali hanno lo scopo di identificare un primo campione di persone da osservare e intervistare, dando luogo alla prima iterazione. Dopo avere raccolto un certo numero di dati, il ricercatore li analizza. Questo primo processo di analisi porta a sviluppare una teoria iniziale. Basandosi su questa prima teoria il ricercatore decide come fare altri campionamenti, i “Campionamenti Teorici” (*Theoretical Samplings*), in cui il ricercatore contemporaneamente raccoglie, codifica e analizza altri dati in un processo comparativo che continua fino a che il ricercatore raggiunge la *Saturazione*: il momento in cui dai dati non emergono più nuove idee e/o approfondimenti, ma si ripetono i temi che il ricercatore ha già osservato e articolato.

È l’analisi comparativa il metodo strategico di carattere generale che permette di generare la teoria.

“Il termine analisi comparativa, usato di frequente in sociologia e in antropologia, si è via via ampliato, moltiplicando e differenziando i

significati, ampliando sempre più la sua portata semantica. [...] Per noi lo scopo dell'analisi comparativa è la generazione di teoria. [...] Difenderemo e descriveremo il tipo di teorie che si possono produrre attraverso essa [analisi comparativa] . L'analisi comparativa è un metodo generale, allo stesso modo in cui lo sono i metodi basati sulla verifica e sulla statistica.”

Negli anni '80 continuano le riflessioni sul metodo di Glaser e Strauss, i quali però si avviano su strade diverse, fino ad arrivare negli anni 90 a posizioni anche contrastanti. La nuova posizione di Strauss, detta “*Full conceptual description*”, viene esplicitata nel testo “*Basic of qualitative research*” pubblicato nel 1990 insieme a Julien Corbin. Il punto di forza della sua nuova posizione, che per alcuni (tra cui Glaser) è in realtà il punto di debolezza, è quello di definire precisi tipi di codifica²⁶ sviluppando un processo di analisi più dettagliato e strutturato, ma al tempo stesso inevitabilmente più rigido. Se infatti da un lato questo processo ha l'ambizione di ridurre la soggettività dell'analisi – una delle maggiori critiche rivolta all'analisi qualitativa – dall'altro rischia, per l'eccessiva prescrizione della codifica, di far perdere di vista la visione di insieme, complessiva della ricerca.

Glaser e Strauss modificano negli anni, rispetto alla loro formazione iniziale, la loro posizione fino quasi a scambiarla: Strauss, formato alla scuola della ricerca qualitativa sul campo, si circonda sempre più di un'aura di scientificità abbracciando procedure rigide e avvicinandosi a chi produce software; Glaser, formato alla scuola positivista della ricerca quantitativa, si va sempre più convincendo che metodologie troppo rigide, che enfatizzano la costruzione di categorie con procedure codificate e precostituite, rischiano di “imbrigliare” il ricercatore in teorizzazioni che in qualche modo precedono

²⁶ Nel Libro di Strauss e Corbin sono definiti precisi tipi di codifica – *codifica aperta, codifica assiale, codifica selettiva (open, axial, selective)* – ciascuna con proprie procedure:

- nella Codifica Aperta (*Open coding*) il ricercatore inizia a segmentare e dividere i dati in gruppo formando delle categorie di informazioni preliminari;
- nella Codifica Assiale (*Axial coding*) il ricercatore unisce in raggruppamenti le categorie individuate nel open coding;
- nella Codifica Selettiva (*Selective coding*) il ricercatore organizza e integra le categorie e i temi individuati in modo da raggiungere una comprensione articolata e coerente (o teoria) del fenomeno oggetto di studio.

il dato empirico e non si fondano su esso. Come scrive Strati interpretando il pensiero di Glaser:

“Non si fa costruzione teorica se ci si creano percorsi prefissati, precostituiti, abituali, e se, nel dettaglio operativo, si rischia di perdere di vista il significato principale del tipo di ricerca qualitativa che si sta svolgendo. Metodo concreto e sistematicità sono certamente degli elementi chiave per la costruzione di teoria a partire dal dato empirico, ma vanno presi nella loro essenzialità, così come avevano fatto lui e Strauss nel libro del 1967, tratteggiando alcuni aspetti basilari: precisazione dei concetti, analisi comparativa, campionamento teorico, muovere da una teoria sostantiva ad una teoria formale, intuizione e sviluppo della teoria, credibilità e applicabilità della teoria fondata.”²⁷

Le critiche alla *Grounded Theory*, sia per quanto riguarda la forma classica degli anni Sessanta, sia per quanto riguarda quella detta “*Full conceptual description*” di Strauss e Corbin degli anni Novanta, nascono anche dall’interno, tra gli allievi di Glaser e Strauss e i ricercatori che la utilizzano, principalmente per lo svilupparsi di nuove epistemologie di ricerca legate al costruzionismo e al post-modernismo. Si articolano così altri due approcci: quello di Kathy Charmaz di stampo costruzionista e quello di Adele Clarke di stampo post-modernista.

Al centro del dibattito c’è soprattutto l’assunto, più o meno esplicito sia nella versione classica che nella *Full conceptual description*, che il dato empirico sia oggettivo, esterno alla ricerca e studiabile dal ricercatore empiricamente. Come sottolinea Strati²⁸, il titolo stesso del volume “*La scoperta della Grounded Theory*”, con l’enfasi posta sul termine scoperta, richiama l’idea di un fatto scientifico esterno alla ricerca.

²⁷ Strati A. Prefazione a Glaser G.G., Strauss A.L., *La scoperta della Grounded Theory. Strategie per la ricerca qualitative*, Armando Editore, 2009.

²⁸ Strati A. Prefazione a Glaser G.G., Strauss A.L., *La scoperta della Grounded Theory. Strategie per la ricerca qualitative*, Armando Editore, 2009.

Sia nella prospettiva della Charmaz che in quello della Clarke, il fatto scientifico va invece co-costruito collettivamente e il dato empirico va considerato nella sua complessità interpretativa, complessità che coinvolge non solo la dimensione cognitiva e intellettuale, ma anche quella affettiva-emozionale ed estetica, e riguarda sia i ricercatori/osservatori che studiano il “fenomeno”, sia gli attori sociali.

“Per entrambi gli approcci [costruzionista e post-moderno] il dato empirico è costruito nel corso della ricerca e non rimane esterno ad esso una volta che il suo studio è posto in essere. Nulla rimane come era prima che la ricerca iniziasse, bensì entra in relazione, quando non ancora in interazione l’uno con l’altro: il fenomeno sociale allo studio è frutto dell’interazione simbolica tra i partecipanti e tra di essi vi sono pure coloro che conducono la ricerca.”²⁹

In particolare, per Kathy Charmaz³⁰ (“*Grounded Theory costruzionista*”) l’oggetto della ricerca di studio è il processo (studio dell’azione) e i dati raccolti, in gran parte con interviste, devono essere fondati anche sui punti di vista dei partecipanti, i loro sentimenti, le loro azioni, oltre che sul contesto. La teoria non è scoperta ma, pur partendo da interessi generali di ricerca o dall’analisi della letteratura, è costruita all’interno delle relazioni interpersonali.

Per Adele Clarke³¹ (“*Analisi situazionale*”) ogni forma di conoscenza è il risultato di una costruzione sociale e culturale, ma collocata anche geograficamente e storicamente (post-modernismo), e i dati sono visti come mappe situazionali che vengono interrogate. Per studiare la complessità della relazioni occorrono metodi che prendano in considerazioni non solo le azioni ma anche *il contesto* in cui queste avvengono.

²⁹ Strati A. Prefazione a Glaser G.G., Strauss A.L., *La scoperta della Grounded Theory. Strategie per la ricerca qualitative*, Armando Editore, 2009.

³⁰ *Grounded Theory: Objectivist and Constructivists Methods*. In *Handbook of Qualitative Research* (2000) a cura di Denzin, N.K., Lyncoln, Y.S.

³¹ Corradi, G. *L’evoluzione della Gounded Theory*. Postfazione in Glaser G.G., Strauss A.L., *La scoperta della Grounded Theory. Strategie per la ricerca qualitative*, Armando Editore, 2009

3.4. Valutazione della Ricerca Qualitativa

La mancanza di un patrimonio condiviso di assunti, procedure, tecniche codificate e precostituite ha alimentato l'idea che l'analisi qualitativa sia poco affidabile perché troppo soggettiva e ha aperto un dibattito, all'interno della Ricerca Qualitativa stessa, su cosa si intenda per "ricerca qualitativa rigorosa".

"Too frequently, qualitative research is evaluated against the positivist criteria of validity and reliability and found to be lacking or "soft". Positivists allege that the product of qualitative inquiry is "fiction, not science, and that those researchers have no way to verify their truth statements" (Denzin, Lincoln, 2000, citato da Anfara et al., 2002)

Il dibattito è più acceso all'interno della tradizione metodologica della Grounded Theory (nei suoi diversi approcci)³² piuttosto che all'interno della tradizione etnografica; la prima infatti, come si è visto, ha l'ambizione di costruire una teoria del fenomeno sociale studiato, e forse per questo è più forte l'esigenza di una sorta di "oggettività" dei risultati, mentre la seconda ha come obiettivo *una narrazione*, per quanto dettagliata e particolareggiata, di un fenomeno sociale, al fine di ricostruire l'interpretazione che il ricercatore ne ha dato.

Il dibattito si articola su domande legate a se e come il ricercatore deve ridurre la sua soggettività; se e come si deve rendere partecipe il lettore del processo di costruzione e interpretazione dei dati; se e come si deve rendere partecipe il lettore del processo interpretativo che, a partire dai dati, ha portato alla costruzione delle generalizzazioni finali.

In buona sostanza alcuni ricercatori, legati sostanzialmente alla tradizione metodologica della *Grounded Theory*, si pongono la domanda se si possano adottare dei criteri, e nel caso quali, per stabilire la validità della ricerca stessa.

³² In particolare il dibattito acquista maggiore consistenza con il volume *Naturalistic Inquiry* (1985) di Lincoln e Guba, e il successivo *Handbook of Qualitative Research* curato da Denzin e Lincoln (2000).

Anfara e colleghi (Anfara *et al.*, 2002), facendo riferimento ai lavori di Lincoln sembrano sentire l'esigenza, pur collocandosi in modo esplicito all'interno del paradigma naturalistico, di stabilire precisi criteri metodologici che, in una sorta di parallelismo con la Ricerca Quantitativa, permettano di valutare la validità della Ricerca Qualitativa. Dopo avere individuato in *validità interna*, *validità esterna*, *affidabilità* (*reliability*) e *obiettività* quei criteri di attendibilità della ricerca che sono riconosciuti, nell'ambito dell'analisi quantitativa, dalla comunità scientifica, tentano di attuarne una sorta di traduzione nell'ambito dell'analisi qualitativa. Nello specifico, il criterio di *validità interna* – avere fiducia nella “verità” dei risultati – viene tradotto in *credibilità*; la *validità esterna* – mostrare che i risultati sono applicabili anche in altri contesti – in *trasferibilità*; l'*affidabilità* (*reliability*) – mostrare che i risultati sono consistenti (*coherence between design research and results*) e ripetibili – in *affidabilità* (*dependability*); l'*obiettività* – neutralità dei risultati – in *confermabilità*, nel senso che questi devono prendere forma dagli intervistati (devono emergere dai dati) e non da “pregiudizi”, motivazione, interesse dei ricercatori.

I criteri individuati sono resi operativi mettendo in campo, durante le diverse fasi della ricerca (sia durante l'osservazione sia durante l'analisi dei dati), alcune tecniche che verranno descritte nel paragrafo seguente. Queste tecniche, pur con diverse sfumature di significato, sono condivise da molti ricercatori sia all'interno della tradizione metodologica che si riconosce nella *Grounded Theory*, sia all'interno della tradizione etnografica. Si attribuisce a queste tecniche, o almeno ad alcune di esse, se non il merito di rendere operativi i criteri di credibilità, trasferibilità, affidabilità, confermabilità, il merito di contribuire a rendere il processo di ricerca visibile all'esterno (*the public disclosure of processes*).

3.5. Tecniche per la validità di una analisi qualitativa.

Osservazione e coinvolgimento prolungato nel tempo: rimanere un tempo sufficientemente lungo sul campo per cogliere i diversi aspetti del “fenomeno”, parlare con un significativo gruppo di persone, sviluppare relazioni e rapporti con i membri (partecipanti) della realtà sociale oggetto di studio con l'obiettivo di sviluppare un

rapporto di fiducia tra ricercatore/i e partecipanti in modo da facilitare la comprensione e la co-costruzione di significato.

Con le parole di Lincoln e Guba (1985):

“If the purpose of prolonged engagement is to render the inquirer open to the multiple influences - the mutual shapers and contextual factors - that impinge upon the phenomenon being studied, the purpose of persistent observation is to identify those characteristics and elements in the situation that are most relevant to the problem or issue being pursued and focusing on them in detail. If prolonged engagement provides scope, persistent observation provides depth.”

Triangolazione: incrocio di diverse sorgenti dati, metodi, prospettive, per costruire una conoscenza comune. Alcuni ricercatori vedono la triangolazione come una tecnica per validare i risultati ottenuti. Tuttavia questa non è una opinione condivisa, in quanto usare la triangolazione come test di validità presuppone che la *debolezza* di un metodo venga compensato da un altro metodo e che sia sempre possibile dare significato a differenti risultati. La triangolazione è usata piuttosto, dalla maggior parte dei ricercatori, per garantire che un risultato sia ricco, completo e ben sviluppato.

Sono state individuate 4 forme di triangolazione:

1. *Methods Triangulation.* Viene valutata la coerenza dei risultati ottenuti con diversi metodi di raccolta dei dati. Questa forma di triangolazione è comune sia all'analisi qualitativa sia a quella quantitativa e permette di chiarire aspetti complementari dello stesso fenomeno. I punti dove l'analisi diverge possono essere di grande interesse e permettere interessanti approfondimenti.
2. *Triangulation of Sources.* Viene esaminata la consistenza di differenti sorgenti di dati (dati raccolti in differenti momenti, in situazioni pubbliche o private, intervistando persone con differenti punti di vista, ecc...) utilizzando lo stesso metodo.

3. *Analyst Triangulation*. Vengono analizzati gli stessi dati da parte di diversi osservatori/ricercatori. Questa forma di triangolazione può illuminare zone d'ombra di una analisi interpretativa, fornendo un controllo sulle diverse percezioni. L'obiettivo non è cercare il consenso ma esplicitare le possibili diverse strade per *vedere i dati*.
4. *Theory/Perspective Triangulation*: vengono usate diverse prospettive teoriche per esaminare e interpretare i dati.

Debriefing tra pari: con le parole di Lincoln e Guba (1985) "*It is a process of exposing oneself to a disinterested peer in a manner paralleling an analytical sessions and for the purpose of exploring aspects of the inquiry that might otherwise remain only implicit within the inquirer's mind.*"

Attraverso un sondaggio analitico il “*debrief*er” può aiutare a scoprire distorsioni, prospettive e assunti impliciti da parte del ricercatore; attraverso questo processo il ricercatore può prendere consapevolezza della sua specifica posizione rispetto ai dati e all'analisi e può avere una opportunità per mettere alla prova ipotesi emergenti e valutare se sono ragionevoli e plausibili.

Analisi di casi negativi: ricerca e discussione di elementi che sembrano in contraddizione con i “*patterns*” o le spiegazioni emerse dall'analisi dei dati.

L'analisi dei *cas*i devianti può permettere di rivedere, ampliare o confermare i “*patterns*” che emergono dall'analisi dei dati e consentire un affinamento dell'analisi fino a renderla rappresentativa di un numero maggiore di casi

Referential adequacy: individuazione di quei dati che, in prima istanza, vengono archiviati e non analizzati per essere poi riconsiderati in un secondo momento.

Il ricercatore effettua una prima analisi su un set di dati selezionati fornendo dei primi risultati; ritorna poi sui dati archiviati e li analizza come test di validità dei suoi risultati.

Verifica con i Partecipanti (Member checking): i dati, le categorie di analisi, le interpretazioni e i risultati sono testati con i partecipanti dei gruppi.

Questa tecnica può essere messa in atto formalmente o informalmente sia durante le fasi di osservazione sia durante le interviste e i dialoghi con i partecipanti. Lincoln e Guba ritengono che questa sia una tecnica importante per stabilire la credibilità del lavoro, ma non tutti i ricercatori concordano su questo punto.

La letteratura individua i seguenti aspetti come positivi:

- fornire la possibilità di comprendere e valutare ciò che il partecipante intende fare attraverso le proprie azioni;
- fornire ai partecipanti l'opportunità di correggere errori e contestare ciò che è percepito come un'interpretazione sbagliata;
- offrire la possibilità ai partecipanti di fornire volontariamente informazioni aggiuntive (stimolate ad esempio dal ripercorrere il processo a ritroso);
- fornire ai partecipanti la possibilità di valutare l'adeguatezza dei dati e dei risultati preliminari, nonché di confermare aspetti particolari dei dati;
- fornire l'opportunità di sintetizzare risultati preliminari.

La letteratura individua i seguenti aspetti come problemi in quanto possibili fonte di confusione:

- i partecipanti possono avere cambiato idea rispetto ad una determinata questione, l'intervista stessa può essere vista in modo diverso rispetto alla loro originale valutazione e possono essere intervenute nuove esperienze;
- i partecipanti possono non essere d'accordo con l'interpretazione dei ricercatori e può diventare un problema decidere quale interpretazione considerare;
- sia il ricercatore che i partecipanti sono soggetti interessati nel processo di ricerca ma hanno programmi, obiettivi e storie diverse: questo può portare a interpretazioni contrastanti della realtà oggetto di studio;
- diversi partecipanti possono avere diversi punti di vista sugli stessi dati;
- i partecipanti si sforzano di essere percepiti come "persone buone", e i ricercatori si sforzano di essere visti come "studiosi buoni": questi obiettivi diversi possono portare a interpretare i risultati in modi differenti;
- i partecipanti durante una intervista possono dire cose che poi più tardi vedono in modo differente fino a negare e/o rimuovere dai dati ciò che hanno detto;

- i partecipanti possono non essere nella posizione migliore per controllare i dati: possono aver dimenticato ciò che hanno detto o la maniera in cui lo hanno detto.

Descrizione Dettagliata e Ricca (Thick Description): si riferisce ad un resoconto dettagliato dell'esperienza sul campo in cui il ricercatore rende espliciti i modelli delle relazioni culturali e sociali e li pone in un preciso contesto; in questo modo si può valutare in che misura le conclusioni sono trasferibili in altre situazioni, periodi temporali, contesti, ecc... Questa tecnica è descritta da Lincoln e Guba (1985) come una tecnica proficua per ottenere una forma di validità interna.

Il termine "*Thick Description*" è stato usato per la prima volta da Ryle nel 1949 e poi da Geertz nel 1973³³ che lo hanno applicato alla ricerca etnografica.

Indagine di Revisione (Inquiry Audit): un ricercatore non coinvolto nel processo di ricerca esamina sia il processo sia il prodotto dello studio di ricerca. Lo scopo è quello di valutare l'accuratezza della ricerca e in che misura i risultati, le interpretazioni e le conclusioni sono sostenuti dai dati.

La letteratura individua i seguenti aspetti come positivi:

- permettere ad un esterno alla ricerca di "mettere alla prova" il processo e i risultati dello studio di ricerca può essere un'occasione per sintetizzare i risultati preliminari;
- valutare l'adeguatezza tra i dati e i risultati preliminari;
- avere un importante feedback che può portare ad una ulteriore raccolta dati e ad uno sviluppo migliore e più articolato dei risultati.

-

La letteratura individua i seguenti aspetti come problemi in quanto possibili fonte di confusione:

- l'esterno non conosce i dati così bene come il ricercatore e può non condividere lo stesso punto di vista;
- l'esterno può non essere d'accordo con l'interpretazione del ricercatore ed essere problematico stabilire quale interpretazione considerare.

³³ Geertz C. (1973) *The Interpretation of Cultures*, New York. Basic Books.
Ryle G. (1949) *The Concept of Mind*, London. Hutchinson.

Audit Trail: descrizione trasparente dei passi della ricerca: dalla progettazione, allo sviluppo, all'analisi e infine alla comunicazione dei risultati.

Poiché l'analisi qualitativa può essere condotta con approcci diversi, è importante fornire una descrizione accurata e dettagliata del cammino di ricerca che includa il progetto, le scelte effettuate nella raccolta dati, i passi compiuti nel gestire, analizzare, comunicare i dati stessi chiarendo il ruolo delle diverse sorgenti di dati così come il ruolo dei diversi ricercatori.

Con le parole di Malterud³⁴:

“Declaring that qualitative analysis was done, or stating that categories emerged when the material had been read by one or more persons, is not sufficient to explain how and why patterns were noticed... the reader needs to know the principles and choices underlying pattern recognition and category foundation.”

Lincoln e Guba (1985), riportano le categorie di informazioni che occorre tenere presente quando si sviluppa un Audit Trail

- *Raw data:* tutti i dati grezzi come note scritte sul campo;
- *Data reduction and analysis products:* sintesi anche quantitative, note anche teoriche, informazioni unificate;
- *Data reconstruction and synthesis products:* strutture delle categorie utilizzate (temi, definizioni, relazioni), risultati e conclusioni, report finale con i riferimenti alla letteratura e una integrazione di concetti, relazioni e interpretazioni;
- *Process notes:* note metodologiche, (procedure, strategie, motivazioni..), note sull'attendibilità (legate alla credibilità, alla affidabilità e alla confermabilità), note sull'Audit Trail stesso;
- *Materials relating to intentions and dispositions:* proposta di indagine, note personali (note riflessive e motivazioni), aspettative (previsioni e intenzioni);

³⁴ Malterud K., (2001) *"Qualitative research: Standards, challenges and guidelines."*, The Lancet.

- *Instrument development information*: moduli di riferimento (pilot), schede preliminari e schede di osservazione.

Reflexivity: atteggiamento di partecipazione sistematica al contesto di costruzione della conoscenza, in particolare per effetto del ricercatore, in ogni fase del processo di ricerca.

La prospettiva del ricercatore modella tutta la ricerca. Con le parole di Malterud

"A researcher's background and position will affect what they choose to investigate, the angle of investigation, the methods judged most adequate for this purpose, the findings considered most appropriate, and the framing and communication. [...] Preconceptions are not the same as bias, unless the researcher fails to mention them".

Differenti ricercatori avranno differenti posizioni e prospettive. Questo potrebbe portare a interpretare diversamente una particolare situazione oggetto di studio, ma ogni interpretazione potrebbe essere ugualmente valida.

A seconda della propria posizione epistemologica, alcuni ricercatori possono pensare che questi diversi modi di interpretare siano un problema per l'affidabilità della ricerca, altri invece possono pensare che forniscano una più ricca comprensione del fenomeno complesso.

In tutte le ricerche è importante cercare di esplicitare la posizione, la prospettiva, "le credenze" e "i valori" del ricercatore, ma in modo particolare nella ricerca qualitativa dove il ricercatore è spesso inteso come "lo strumento umano di ricerca".

Fasi per favorire la riflessività e un disegno di ricerca riflessivo.

- *progettare la ricerca in modo da prevedere diversi ricercatori*: favorisce il dialogo, permette lo svilupparsi di interpretazioni complementari e/o divergenti, favorisce un contesto in cui "le credenze", "i valori", le prospettive, gli assunti dei ricercatori (spesso nascosti) possano venire alla luce ed essere anche contestati. Vale la pena

sottolineare che coinvolgere diversi ricercatori e promuovere un dialogo riflessivo non vuol dire raggiungere un consenso, ma promuovere l'affidabilità;

- *redigere un "giornale di riflessioni"*: questo è un tipo di diario in cui il ricercatore scrive regolarmente durante il processo di ricerca annotando le decisioni metodologiche e i motivi di tali decisioni, la logistica dello studio, le riflessioni su ciò che è successo in termini di valori e interessi di ciascuno. Un diario di questo tipo è spesso molto privato e "catartico";
- *segnalare prospettive di ricerca, posizioni, "valori" e "credenze"*: riportare brevemente, nel miglior modo possibile, in che modo i propri preconetti, "credenze", "valori", ipotesi e posizioni possono venire messe in gioco durante il processo di ricerca.

CAPITOLO 4

La sperimentazione del percorso di termodinamica

“Mi trovai intricato in tanti dubbi ed errori, che mi sembrava di avere tratto, nel tentativo di istruirmi, un unico utile: la crescente scoperta della mia ignoranza.”

(Descartes, Discorso sul metodo, 1637)

“L’uso di una molteplicità di approcci può rappresentare uno strumento potente per affrontare concezioni sbagliate, preconcetti e stereotipi degli studenti. Finché un concetto o un problema verrà affrontato da un’unica prospettiva o da un solo punto di vista, quasi certamente gli studenti se ne faranno un’idea quanto mai rigida e limitata. Al contrario, adottare nei confronti di un fenomeno tutta una gamma di atteggiamenti diversi vorrà dire incoraggiare lo studente a conoscere quel fenomeno da diversi punti di vista, a mettere a punto una molteplicità di rappresentazioni e a cercare di metterle in rapporto tra loro.”

(Gardner, 1993)

Il percorso di termodinamica illustrato nel capitolo 2 è stato da me sperimentato nel 2009 in una quarta classe di liceo scientifico³⁵, in collaborazione con il Gruppo di Ricerca in Didattica della Fisica dell’Università di Bologna.³⁶

La ristrutturazione disciplinare, come è stato già messo in evidenza, è stata pensata per fare chiarezza su alcuni nodi concettuali disciplinari particolarmente delicati e costruire

³⁵Liceo Scientifico A. Einstein di Rimini.

³⁶Il gruppo di ricerca, durante la fase di progettazione e sperimentazione in classe, era composto da me, che sono stata parte attiva del progetto fin dalla fase iniziale di ristrutturazione disciplinare, due docenti e ricercatori universitari che hanno partecipato anche ad alcune attività di classe (Dott. Olivia Levrini, Prof. Barbara Pecori), e due laureande, di cui una ha regolarmente seguito e registrato tutte le attività di classe (Giulia Tasquier).

così un filo conduttore forte e unificante, ma anche per creare un ambiente di apprendimento ricco, aprendo, oltre alla dimensione disciplinare, anche quelle epistemologica, metacognitiva ed emotiva. Fin dalla fase di progettazione, l'obiettivo è stato quello di costruire situazioni di classe e raccogliere dati che permettessero di valutare se e come sia possibile, attraverso lo studio della Fisica, far sì che ogni studente possa esplorare il proprio potenziale cognitivo e inserire la conoscenza acquisita all'interno di un percorso più ampio di crescita personale, sia intellettuale sia emotiva. Già durante la sperimentazione e dalle prime analisi di dati, come verrà illustrato nel paragrafo 4.1, è emerso che "qualcosa di molto particolare era successo", e che l'ambiente di apprendimento sembrava sufficientemente ricco da innescare approcci anche molto personali alla conoscenza.

Si è resa allora necessaria un'analisi più sistematica e rigorosa su tutto il corpo di dati, che rendesse possibile trovare le "parole giuste" per raccontare quanto successo in classe, ma che rendesse possibile anche spostare il fuoco verso la costruzione di una interpretazione teorica dei particolari processi di insegnamento/apprendimento osservati. Si è presentato pertanto un problema metodologico: trasformare idee e concetti, che ad una prima analisi dei dati erano ancora concetti sensibilizzanti, in costrutti teorici che dessero ragione non solo di quanto era successo ai singoli studenti, ma anche delle scelte che, più o meno consapevolmente, io stessa facevo in quanto insegnante della classe, così da mettere in luce i legami tra ristrutturazione disciplinare, dinamiche individuali, dinamiche collettive e mediazione dell'insegnante.

Dopo un'attenta rassegna della letteratura di ricerca (cfr. capitolo 3), con l'obiettivo di orientarmi nell'ampio dibattito su cosa significa fare Ricerca Qualitativa e poterla applicare in campo educativo, ho affrontato, in un continuo gioco di ricerca di coerenza, l'analisi dei dati.

Nel presente capitolo si descrivono: il contesto in cui è avvenuta la sperimentazione e le attività di classe che hanno permesso la raccolta dei dati; i risultati ottenuti prima di questo lavoro di tesi; alcune scelte metodologiche con le quali ho affrontato l'analisi dei dati.

I capitoli 5–6–7 illustrano nel dettaglio sia il processo di analisi effettuato sia i risultati ottenuti; si è scelto uno stile narrativo per rendere esplicito il processo del lungo e faticoso lavoro di analisi che ha visto comunque momenti di grande soddisfazione con scambi ricchissimi anche tra i componenti del gruppo di ricerca.

Nel capitolo 8, infine, si rileggono i risultati ottenuti dall'analisi dei dati, con l'obiettivo di effettuare alcune riflessioni che possano andare oltre il caso specifico di questa sperimentazione e permettano di muoversi verso una generalizzazione.

4.1. Il punto di partenza della ricerca

4.1.1. Il contesto della sperimentazione

La sperimentazione del percorso di termodinamica ha avuto una durata di 25 ore-scuola e ha visto sempre presente in classe un componente del gruppo di ricerca in qualità di osservatore esterno (Giulia Tasquier, laureanda in Fisica indirizzo didattico) che audio-registrava quanto accadeva in classe e prendeva appunti (note sul campo) che venivano poi commentati con l'insegnante (la scrivente) al termine dell'ora di lezione.

Con i componenti del gruppo di ricerca si sono svolti regolari incontri (ogni settimana o ogni due settimane), per analizzare i primi dati e triangolare le impressioni, i punti di vista, le opinioni, in modo da: costruire una narrazione comune che permettesse di: descrivere ciò che stava succedendo in classe; individuare i problemi che si incontravano; condividere i risultati rilevanti che sembravano emergere. In questo modo venivano, *in itinere*, adattate le attività progettate a monte.

Il curriculum di Fisica prevedeva 3 ore settimanali dal primo all'ultimo anno del corso di studi. Già al secondo anno – anno in cui ho iniziato a insegnare nella classe, accompagnandola poi fino alla quinta – si erano affrontate la termologia e la calorimetria (i concetti di temperatura e calore) da un punto di vista fenomenologico, dando un ruolo privilegiato al laboratorio. Nel terzo anno è stata trattata la meccanica classica, con una particolare enfasi sul discorso della modellizzazione, sia per quanto

riguarda l'oggetto (punto materiale, corpo esteso), sia per quanto riguarda l'interazione. In quarta, poi, prima della sperimentazione del percorso di termodinamica che si è svolta nella seconda parte dell'anno (II quadrimestre), si era affrontato lo studio della Relatività Ristretta, cercando di riflettere sull'idea che a partire da un "fatto oggettivo" - la costanza della velocità della luce - c'è spazio per diverse interpretazioni; in particolare si è esaminato il dibattito sullo spazio-tempo tra Einstein e Minkowski.

Quando gli studenti hanno intrapreso il percorso di termodinamica, avevano pertanto già basi fenomenologiche sui concetti di temperatura e calore (concetti che sono stati ripresi e riletti, mettendo in evidenza la necessità di dare definizioni coerenti e non tautologiche); avevano una certa familiarità con il discorso della modellizzazione; avevano già affrontato questioni di carattere epistemologico.

La classe, composta da 20 studenti (9 femmine, 11 maschi), è stata così descritta dal consiglio di classe: *“una classe intellettualmente vivace, con molteplici interessi culturali, ma non sempre facili da incanalare e rendere espliciti. All'interno della classe spiccano alcune personalità di rilievo, sia dal punto di vista intellettuale che relazionale; il clima è competitivo e favorisce situazioni di fermento intellettuale ma anche, a volte, di tensione interpersonale.”*

Durante le lezioni di Fisica si erano instaurate buone relazioni emotivo/intellettuali in un rapporto di fiducia reciproca. Gli alunni si erano abituati ad uno stile di insegnamento in cui si richiedeva loro, da un parte, un impegno molto forte per entrare nel gioco della Fisica – cogliendone e rispettandone i vincoli – e, dall'altra, di mettere in campo le loro idee e provarle in un gioco di ricerca di coerenza. Ai singoli studenti era richiesto un apporto al processo collettivo di costruzione di conoscenza attraverso contributi specifici sui singoli concetti, ma anche adottando una prospettiva più ampia, così da trovare collettivamente nuove forme di coerenza. Durante le attività erano condivise, in un modo più o meno esplicito, alcune norme di classe: in alcuni momenti, esplicitamente dedicati alla ricostruzione collettiva di un ragionamento disciplinare, tutta la classe doveva essere pronta a dare il proprio contributo, mostrando di aver colto gli aspetti cruciali della Fisica; in altri momenti, esplicitamente dedicati all'esplorazione

delle idee e alla messa alla prova di propri ragionamenti, veniva sospeso il giudizio e gli studenti erano incoraggiati a giocare il loro ruolo all'interno della classe. In queste ultime circostanze, i principali criteri per determinare la legittimità di una posizione erano la capacità/volontà di “stare dentro al gioco” e la coerenza dell'argomentazione.

Lo stile di insegnamento, poi, era impostato seguendo una dinamica circolare, fatta di continui rimandi avanti e indietro: *anticipare* l'obiettivo a medio-lungo termine che si voleva raggiungere con la classe; *sviluppare* un argomento specifico, guidando gli studenti ad esplorare diversi contesti; usare le nuove conoscenze come criteri per *guardare indietro* e ripensare a ciò che era già stato fatto; organizzare la conoscenza in un quadro concettuale sincronico; riconsiderare la conoscenza da una prospettiva più ampia in accordo con l'obiettivo a medio-lungo termine.

4.1.2. Attività di classe e sorgenti dei dati

Le attività in classe sono state progettate con l'obiettivo di coprire le diverse dimensioni in cui si è articolato il percorso (dimensione disciplinare, epistemologica e metacognitiva) (cfr. capitolo 2), e inoltre con l'obiettivo specifico di valutare l'efficacia dell'insegnamento prendendo in considerazione non solo la comprensione dei singoli concetti, ma anche le competenze epistemologiche e metacognitive, così come la qualità delle dinamiche collettive e delle strategie di mediazione.

Nella progettazione delle attività si è anche tenuto presente che sarebbe stato utile valutare le diverse competenze in diverse situazioni, così da poter mettere in atto una sorta di triangolazione dei dati e conferire all'interpretazione dei dati stessi una maggiore affidabilità.

Gli strumenti utilizzati per la raccolta dei dati sono di tipologia diversa e hanno riguardato non solo questionari, compiti, test e interrogazioni individuali, ma anche audio-registrazioni di lezioni e di discussioni collettive, note sul campo di un

osservatore esterno alla realtà della classe (la laureanda³⁷ che ha partecipato a tutte le lezioni), interviste semi-strutturate ai singoli studenti.

In tabella 1 è riportato un quadro sinottico delle sorgenti dei dati. Per una più facile lettura, si è messa in evidenza sia la dimensione temporale della raccolta dei dati (dati raccolti all'inizio, a metà, alla fine del percorso o durante tutto il percorso), sia la dimensione legata all'ambiente di apprendimento: è stato evidenziato cioè a quale dimensione – individuale dello studente, collettiva del gruppo classe o dell'insegnante – si riferiscono i dati. Inoltre, si è messo in evidenza se si fa riferimento a competenze concettuali, epistemologiche o meta-cognitive.

Di seguito sono illustrate più dettagliatamente alcune specifiche sorgenti dei dati perché particolarmente significative nell'analisi.

Questionario sull'organizzazione della conoscenza per teorie. Il questionario è stato costruito con l'obiettivo di rendere gli studenti progressivamente consapevoli sia delle scelte fatte nella ricostruzione disciplinare, sia del processo di costruzione concettuale: in particolare è stato centrato sulla necessità di vedere l'approccio macroscopico e quello microscopico come distinti, ma complementari riconoscendo le peculiarità di ciascun approccio.

Il questionario è stato articolato in tre parti.

Nella prima parte è stato richiesto agli studenti di leggere attentamente alcuni brani di carattere epistemologico riguardanti riflessioni sui processi di organizzazione della conoscenza fisica e in particolare sull'organizzazione della conoscenza in termini di "teorie". I brani proposti sono stati tratti da testi di Einstein, Poincaré e Drago; il brano più noto è quello di Einstein riguardante la distinzione tra Teorie di Principi (nelle quali Einstein include la relatività e la termodinamica macroscopica) e Teorie Costruttive (esemplificate dalla meccanica newtoniana e dalla teoria cinetica dei gas) (Einstein,

³⁷ Giulia Tasquier

1919)³⁸. In questa prima parte del questionario è stata resa esplicita la scelta di condurre, contestualmente allo sviluppo del percorso concettuale, riflessioni di carattere epistemologico, per poter comprendere meglio le peculiarità dei due approcci alla termodinamica, quello macroscopico e quello microscopico.

Nella seconda parte si è chiesto, con domande specifiche, di fare un'analisi dei brani, autore per autore, mettendo in luce le parole e/o le espressioni ritenute cruciali per comprendere oppure ambigue e poco chiare (esempi di domande: *Che termini o espressioni sono, secondo te, cruciali per caratterizzare il tipo di teoria descritta dall'autore? Quali termini o espressioni sono, secondo te, non chiari o ambigui?*).

Nella terza parte, infine, si è chiesto di fare un'analisi comparativa tra i brani (esempi di domande: *Ci sono secondo te aspetti comuni nei testi dei tre autori? Vedi differenze significative tra le posizioni degli autori? Se sì, come potresti descriverle?*).

Con questi brani si è voluto stimolare gli studenti a pensare alla termodinamica mantenendo lo sguardo anche sulle teorie precedentemente studiate (meccanica classica e relatività speciale). In questo senso, il questionario incorpora le forme di complessità che hanno guidato la progettazione del percorso: la multi-prospettiva e la multi-dimensionalità – per il fuoco sulla distinzione tra approccio macroscopico e microscopico dentro un quadro epistemologico più ampio – e la longitudinalità – per il confronto tra la termodinamica e le altre teorie già studiate –.

Discussioni sul questionario. Il questionario è stato discusso subito dopo la sua somministrazione, quindi prima di incominciare il percorso di termodinamica, con l'obiettivo di condividere collettivamente le riflessioni, i diversi punti messi in evidenza, le posizioni espresse dai singoli studenti. A partire dal questionario si è poi fatta una seconda discussione³⁹ alla fine del percorso per riprendere il filo della prima discussione e condividere collettivamente l'evoluzione del pensiero alla luce del percorso fatto.

³⁸ Vedi capitolo 2 “Ristrutturazione disciplinare”.

³⁹ La discussione finale viene descritta e analizzata nel capitolo 7 (Lezione B)

*Interviste semi-strutturate*⁴⁰. Le interviste sono state effettuate, al termine del percorso, su un campione selezionato di 10 studenti. Il numero ridotto di studenti intervistati è stato imposto da problemi di tempo (ogni intervista è durata in media 45 minuti). Due interviste poi, sempre per problemi di tempo, non sono state completate, per cui l'analisi è stata condotta sui dati raccolti in 8 interviste. La scelta degli studenti da intervistare è stata fatta in modo che il campione scelto fosse adeguatamente rappresentativo dell'intero gruppo classe: genere, interesse per la materia e la termodinamica in particolare, risultati raggiunti, partecipazione alle attività di classe.

Il protocollo di intervista è stato articolato in tre parti.

Nella prima parte le domande riguardavano il contenuto disciplinare: si è chiesto di ripercorrere lo studio della termodinamica seguendo il filo di un concetto; in particolare si è chiesto di ripensare quando e come era stata definita la temperatura e quando e come era stata utilizzata per "spiegare qualcosa".

Nella seconda parte le domande erano di carattere più generale. Ad esempio, sono state poste domande del tipo: *"Guardando all'intero percorso, quale approccio hai preferito? Perché? Che cosa hai trovato più interessante? E meno interessante? Perché? Che cosa hai trovato più facile? E più difficile? Le riflessioni epistemologiche stimulate dal questionario sono state importanti o inutili per comprendere la termodinamica? Perché?"*

Nella terza parte, infine, le domande erano più individualizzate e miravano a chiarire ciò che i singoli studenti avevano detto durante le attività di classe. Ad esempio *"Durante l'ultima discussione in classe hai parlato di una interessante relazione tra la termodinamica e una teoria che avevi precedentemente studiato, cioè la meccanica. Ci puoi dire qualcosa di più?"*

⁴⁰ Le interviste sono state condotte dalla ricercatrice Olivia Levrini e dalla laureanda Giulia Tasquier

4.1.3. Analisi precedenti al lavoro di tesi: la comprensione disciplinare

L'analisi sul livello raggiunto dagli studenti nella comprensione disciplinare, così come abitualmente è valutato in un curriculum scolastico (conoscenza dei concetti e capacità di applicare i concetti studiati per la risoluzione di problemi che potremmo chiamare standard) è avvenuta nel corso della sperimentazione stessa.

L'analisi dei compiti scritti e delle interrogazioni individuali (audio-registrate) sui contenuti disciplinari ha mostrato, in “tempo reale”, che la complessità del percorso non ostacolava la comprensione dei concetti fisici di base: gli studenti erano in grado non solo di risolvere gli esercizi quantitativi standard che compaiono sui libri di testo normalmente in adozione, ma anche di risolvere problemi riportati in letteratura di ricerca come particolarmente ostici per gli studenti. Durante il primo compito in classe, infatti, per valutare il livello di comprensione del primo principio della termodinamica è stato introdotto il noto problema qualitativo “del cilindro isolato” proposto da Kautz e colleghi (cfr. capitolo 1) (Kautz et al., 2005).

Nel lavoro di ricerca il problema è stato sottoposto come post-test sia a studenti universitari che avevano seguito lezioni standard, sia a studenti universitari che avevano seguito un intervento mirato sulla comprensione della prima legge. I risultati riportati dalla ricerca americana sono i seguenti: dopo l'intervento didattico standard solo il 10% degli studenti ha risposto correttamente ma nessuno ha messo in atto un ragionamento corretto (N=180); dopo l'intervento didattico mirato metà degli studenti ha fatto predizioni corrette con ragionamenti corretti (N=195) e un altro 25% con ragionamenti non corretti o incompleti.

Nella nostra classe di quarta liceo, anche se non è stato realizzato nessun intervento specifico sull'argomento, ha risposto correttamente il 40% degli studenti. È peraltro da mettere in evidenza che il problema non è stato somministrato da solo, ma come ultimo quesito di un compito in classe, e alcuni studenti hanno dichiarato di non essere riusciti

a risolverlo per non averne avuto il tempo, in quanto il compito è risultato lungo e impegnativo (Tasquier 2009)⁴¹.

4.1.4. Analisi precedenti al lavoro di tesi: un approccio personale alla conoscenza

Già durante la sperimentazione, da una prima triangolazione dei dati e delle impressioni, dei punti di vista, delle opinioni dei componenti del gruppo di ricerca, sembrava che l'apprendimento dei contenuti disciplinari avvenisse seguendo un approccio *personale* alla conoscenza.

Durante le interviste, poi, è emersa la varietà delle risposte degli studenti e, negli scambi di impressioni “a caldo” tra le intervistatrici, è stata subito notata la capacità di alcuni studenti di portare avanti discorsi coerenti. Questi studenti davano l'impressione di interpretare l'intervista come un'opportunità per esporre una tesi e sviluppare un proprio discorso attorno ad un'idea; non manifestavano timore nel mettersi alla prova e “giocare” con questa loro idea, che sembrava rappresentare il modo in cui, personalmente, avevano vissuto questa specifica esperienza di apprendimento.

Alla luce dei risultati sui problemi e delle prime impressioni avute nelle interviste, si è deciso di spostare l'attenzione verso le vie che ciascuno studente aveva messo in atto per accedere alla termodinamica. Un primo livello di analisi di queste vie è stato oggetto di una seconda tesi di laurea (Scarongella, 2009).

Per la tesi si sono scelte cinque interviste (3 ragazzi e 2 ragazze) e, su queste, sono stati costruiti i primi medaglioni degli studenti, finalizzati a mettere a fuoco gli aspetti idiosincratici. Le cinque interviste sono state scelte dalle intervistatrici come quelle che sembravano, per varietà e ricchezza, i casi più interessanti per studiare gli approcci *personali* alla conoscenza. Come vincolo per la scelta, però, si è voluto che le cinque interviste selezionate fossero anche adeguatamente rappresentative di tutto il gruppo classe. Questo vincolo era rispettato in quanto si trattava di studenti con differenti livelli di competenze in Fisica e differenti ruoli nelle dinamiche di classe.

⁴¹ L'analisi dettagliata dei risultati dell'apprendimento dei contenuti disciplinari è stata oggetto della tesi di laurea di Giulia Tasquier di cui sono correlatore.

Dalla costruzione dei medaglioni (Scarongella, 2009) è emerso un panorama effettivamente vario circa le idee che gli studenti avevano espresso come chiave per accedere alla conoscenza disciplinare. Per Michele, la chiave per comprendere i contenuti di termodinamica sono stati “l’ancoraggio alla *concretezza della vita reale* e la curiosità per il *funzionamento degli “oggetti”* (termometri e macchine termiche)”; per Matteo “il *piacere di speculare su temi di rilevanza generale* (l’irreversibilità e la freccia del tempo)”; per Chiara “il confronto di *diversi punti di vista che* permette di *capire meglio e ampliare la proprie vedute*”; per Lorenzo “la costruzione di una *visione uniforme, unificata, vasta e coerente della fisica*, basata sulla *teoria più semplice* (la meccanica classica)”; e infine per Caterina “la ricerca di quei *dettagli non scontati che si danno per scontati* (come il problema di misurare la temperatura o la ricerca di un’interpretazione dell’irreversibilità dei fenomeni fisici)” (Scarongella, 2009).

La costruzione di questi primi medaglioni degli studenti ha permesso di mettere in evidenza che i vari modi personali con cui ciascuno di loro ha reagito all’intervista presentavano anche alcune caratteristiche comuni: gli studenti sembravano delineare una linea di ragionamento esplicita e coerente nel ripercorrere i temi disciplinari della proposta didattica; sottolineavano idee e prese di posizione che avevamo già riscontrato in altre attività, per cui ciò che sostenevano nell’intervista non era occasionale; mostravano di sapersi muovere con disinvoltura sul piano disciplinare; il loro modo di rispondere alle domande e di argomentare sembrava autentico e carico di emozione.

Per cercare di interpretare quanto era accaduto, è stata esplorata la letteratura specialistica in didattica della scienza e ci è parso che i nostri dati stessero esemplificando la distinzione, teorizzata da Jere Confrey, tra *corridoio* di classe e *traiettorie* individuali di apprendimento. In altre parole, usando il linguaggio della Confrey (Confrey, 2006), ci sembrava di poter dire che i cinque studenti intervistati avessero costruito e seguito una loro personale traiettoria d’apprendimento all’interno del comune corridoio di classe (Levrini, Fantini *et al.* 2010).

Questo linguaggio ci ha accompagnato per diverso tempo, fino a quando ci siamo accorte che il termine traiettoria non sembrava rispecchiare né ciò che stava emergendo

dai dati, né la nostra idea di apprendimento. La locuzione “apprendimento come ricerca di una traiettoria” fa infatti uso di una metafora che sottintende linearità e una strada, pur nella molteplicità delle possibili vie, già delineata dai materiali didattici e dalla struttura della disciplina.

Le difficoltà che incontravamo nel cercare di ricostruire le traiettorie degli studenti ci hanno rafforzato nella nostra idea di fondo: l'apprendimento è un processo dinamico intrinsecamente complesso influenzato da molti fattori non lineari, in cui giocano un ruolo cruciale anche gli eventi contingenti, sia a livello individuale sia a livello di comunità classe. Questa convinzione, unitamente ai primi risultati di analisi che mettevano in evidenza il modo personale con cui gli studenti avevano acquisito i concetti di termodinamica, è diventata il *concetto sensibilizzante* che ha orientato l'analisi successiva (oggetto di questa tesi) e a cui si è cercato di “dare un nome” che potesse catturare questo particolare significato dell'apprendimento. A questo scopo si è scelta la parola “appropriazione”, che è parsa fin da subito in grado di enfatizzare due aspetti a noi molto cari circa il processo di apprendimento. Il primo aspetto è la sottolineatura del fatto che il protagonista del processo è lo studente, che si deve fare carico e prendere cura del proprio apprendimento. Appropriazione, dal latino *proper*, si riferisce infatti intrinsecamente ad un processo riflessivo, “faccio qualcosa mio”. Il secondo aspetto riguarda l'autenticità del processo, con cui la parola appropriazione condivide il significato etimologico⁴².

L'analisi dei dati condotta nell'ambito della tesi di dottorato ha allora proceduto in modo sistematico per trasformare il *concetto sensibilizzante* di appropriazione in un costrutto teorico.

4.2. Metodologia di analisi e fasi del lavoro

La metodologia adottata nell'analisi dei dati, all'interno del paradigma epistemologico interpretativista, rientra nella tradizione teorica della Grounded Theory: ci si è fatti guidare da un *concetto sensibilizzante* emerso, già durante la sperimentazione, dalle

⁴² Appropriazione: dal latino *proper* – Autentico: dal greco *autos*.

prime analisi dei dati, e si è cercato di tradurlo in un costrutto teorico descrittivo/interpretativo. In coerenza con le metodologie di analisi qualitative che si stanno mettendo a punto nella didattica delle scienze (cfr. ad esempio, Parnafes, diSessa, 2013), i principi generali seguiti nell'analisi dei dati sono stati: stare il più vicino possibile ai dati; lasciare consapevolmente la descrizione e l'interpretazione dei dati suscettibili di cambiamento, revisione e raffinamento mentre si estende progressivamente l'analisi a nuovi dati (nel nostro caso mentre l'analisi si sposta da una intervista ad un'altra); costruire consapevolmente storie coerenti alternative delle attività osservate e metterle le une a confronto con le altre; fare degli zoom dentro e fuori dai dati per trovare e verificare consistenze locali-globali e per verificare se dettagli trascurati possono invece risolvere possibili ambiguità; confrontare sistematicamente quanto emerge dai dati con la letteratura di ricerca per valutare il grado di tenuta e di generalizzabilità dei risultati.

Si è inoltre cercato di mettere in campo, durante le diverse fasi della ricerca alcune tecniche illustrate nel capitolo precedente (come ad esempio la triangolazione dei dati, delle opinioni delle persone coinvolte nella ricerca, dei risultati che sembravano emergere), con il principale obiettivo di rendere il processo metodologico adottato il più possibile condiviso, ma anche trasparente verso l'esterno.

L'analisi dei dati è stata guidata e gestita da me e da Olivia Levrini. È stato tuttavia necessario l'allargamento del lavoro ad una équipe di persone, al fine di poter triangolare l'analisi. L'équipe ha visto coinvolti, oltre a noi, altri ricercatori in didattica della Fisica in particolare Giulia Tasquier (ex-laureanda che ha seguito il lavoro in classe) e, nella fase di analisi delle dinamiche di mediazione, la Dott. Marianna Levin della Michigan State University. Nella triangolazione, ognuno aveva il compito di "tenere sott'occhio" una dimensione del problema, dal legame con la letteratura a quello con la realtà della classe e con le storie individuali degli studenti.

Dopo aver condotto l'analisi dei dati per trasformare il *concetto sensibilizzante* di appropriazione in un costrutto teorico (cfr. capitolo 5), si è proceduto passando ad un

livello più interpretativo per cercare di comprendere *come, quando e perché* avviene l'appropriazione.

A questo scopo, rimanendo sui singoli studenti, si sono rianalizzati i dati con l'obiettivo di ricercare dei pattern comuni nel loro ragionamento. Si voleva infatti individuare se erano riconoscibili particolari abilità metacognitive ritenute responsabili del processo di appropriazione e, nel caso, come e quando lo studente era in grado di metterle in atto e prendersi cura del proprio apprendimento. Nel capitolo 6, quindi, si riportano i risultati dell'analisi effettuata per rispondere alla domanda di ricerca:

Quali abilità metacognitive si possono individuare in quegli studenti che si sono appropriati della termodinamica? E, più in generale, quale è la relazione tra appropriazione e meta-cognizione?

L'analisi si è poi spostata dalla dimensione individuale a quella collettiva prendendo in considerazione il ruolo di mediazione dell'insegnante. Nel capitolo 7 l'analisi dei dati permetterà di rispondere alla domanda:

Quali modalità di interazione con la classe favoriscono e sostengono processi individuali di appropriazione?

In Figura 5 è riportato uno schema sinottico del progetto di ricerca e delle diverse fasi di analisi.

QUADRO SINOTTICO DELLE SORGENTI DEI DATI

<i>Sorgenti dei dati</i>	<i>Tempi di somministrazione</i>				<i>Dimensione dell'ambiente di apprendimento</i>				
	I	M	F	L	IND			COL	INS
					CC	CE	CM		
Compiti scritti (problemi qualitativi e quantitativi sui concetti chiave)		X	X		X				
Audio-registrazione della maggior parte delle lezioni (comprese le valutazioni orali individuali e collettive)				X	X	X	X	X	X
Note sul campo				X	X	X	X	X	X
Questionario su questioni epistemologiche	X		X			X			
Video-registrazioni delle due discussioni collettive sulle questioni poste nel questionario	X		X			X		X	X
Audio-registrazioni di 10 interviste individuali			X		X	X	X		
Audio-registrazione di una intervista all'insegnante			X						X
Audio-registrazione di discussioni con l'insegnante su alcuni punti specifici				X				X	X

Tabella 1.

Legenda: **I:** inizio del percorso; **M:** metà percorso; **F:** fine del percorso; **L:** lungo tutto il percorso.

CC: Comprensione Concettuale; **CE:** Competenze Epistemologiche; **CM:** Competenze Metacognitive.

IND: Individuale; **COL:** Collettivo; **INS:** insegnamento.

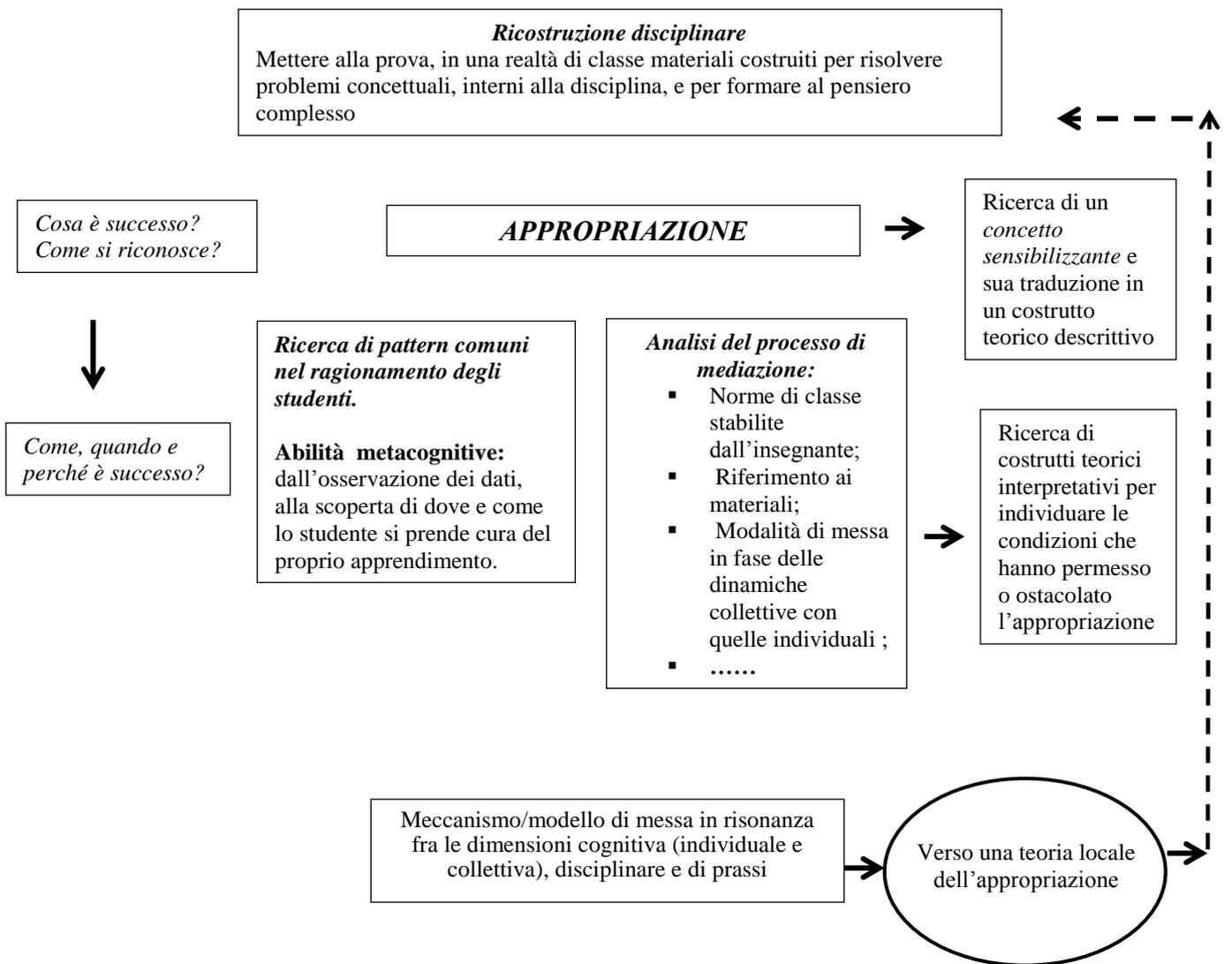


Figura 5. Schema sinottico del progetto di ricerca e delle fasi di analisi.

CAPITOLO 5

Appropriazione: come definirla e riconoscerla

'Living in the world', where the world is that of late modernity, involves various distinctive tensions and difficulties on the level of the self. We can analyse these most easily by understanding them as dilemmas which, on one level or another, have to be resolved in order to preserve a coherent narrative of self-identity.

(Giddens, 1991)

Come si è detto nel capitolo 4, si è scelta la parola *appropriazione* per catturare il modo personale con cui gli studenti avevano acquisito i concetti di termodinamica, per catturare questo più ampio e particolare significato dell'apprendimento emerso dalla prima analisi dei dati.

Il problema metodologico che si è affrontato è stato allora quello di trasformare questo concetto sensibilizzante in un costrutto teorico che permettesse non solo di costruire, in un processo iterativo di teorizzazione, ritorno ai dati e confronto con la letteratura di ricerca, la definizione di appropriazione, ma anche di renderla una definizione operativa. In altre parole la definizione doveva essere tale da poter essere messa alla prova su un ulteriore e più complesso corpo di dati.

L'analisi è stata condotta seguendo le seguenti due fasi.

Fase 1:

- Riconsiderare i dati relativi ai cinque studenti di cui era stato costruito un medaglione nella prima fase di analisi (cfr. capitolo 4). Con un'analisi più rigorosa e sistematica, si volevano costruire profili fortemente strutturati così da poter

esplicitare maggiormente gli aspetti comuni, le caratteristiche osservabili e renderli maggiormente confrontabili tra loro.

- Costruire una prima definizione di appropriazione.
- Prendere in esame la letteratura di ricerca sul significato del termine appropriazione (strettamente legato al concetto Vygotskijano di internalizzazione) in campo educativo, ma non solo, per definire più specificatamente i costrutti teorici che fanno parte della definizione, inquadrandola in una prospettiva più ampia che potesse andare oltre il caso specifico in esame. La letteratura è stata quindi presa in esame con l'obiettivo di favorire la teorizzazione di quanto emerso dai dati.⁴³

Fase 2:

La definizione di appropriazione è stata messa alla prova sui dati riferiti agli altri tre studenti intervistati che, a una prima analisi, erano sembrati casi di non appropriazione. Lo scopo di questa seconda fase di analisi è stato quello di rifinire ulteriormente la definizione e anche di valutare la sua capacità operativa di rendere “visibile” ciò che era “invisibile”.

5.1. Analisi dei dati: i profili degli studenti

Per strutturare i profili dei cinque studenti si è proceduto inseguendo, in tutto il corpo di dati, l'idea, già individuata nell'intervista al primo livello di analisi (cfr. capitolo 4), attorno a cui ciascuno studente aveva sviluppato il proprio discorso. Come emergerà dall'analisi, la formulazione da parte degli studenti di queste idee idiosincratiche attorno cui far ruotare il proprio discorso è stata certamente influenzata da aspetti contingenti e dalle dinamiche di classe, sia con i compagni sia con l'insegnante. Tuttavia, per lo scopo di questa analisi, è stata ritenuta importante la presenza stessa di idee idiosincratiche, oltre alla capacità e alla cura con cui gli studenti hanno sviluppato un discorso coerente attorno ad esse.

⁴³Il dibattito su come e quando riferirsi alla letteratura di ricerca (prima o durante l'analisi dei dati oppure non prenderla in considerazione per nulla) è un dibattito aperto e la scelta è comunque dettata dalle esigenze e dalla sensibilità del ricercatore (cfr. capitolo 3).

L'analisi per strutturare i profili è stata condotta seguendo una scaletta di lavoro scandita in tre punti:

- a) Identificare più precisamente, prendendo in considerazione anche la ripetizione di alcune parole o espressioni, l'*idea idiosincratica* attorno alla quale, durante l'intervista, ciascuno studente ha sviluppato il suo discorso;
- b) vedere se e come questa idea si è sviluppata durante tutta l'intervista;
- c) prendere in esame i dati ottenuti dalle discussioni in classe e dalle risposte al questionario per verificare la coerenza tra la posizione tenuta durante l'intervista e lo specifico contributo a queste attività.

Di seguito, il profilo dei cinque studenti è presentato con uno stile narrativo, riportando le frasi originali per rispettare, quanto più possibile, lo stile della loro argomentazione.⁴⁴

Michele: la concretezza della vita reale e la curiosità per il “funzionamento degli oggetti”.

a) *Idea idiosincratica.* Durante l'intervista il discorso di Michele è fortemente caratterizzato dalla ripetizione di parole come “macchine”, “oggetti reali”, “come funzionano”, parole che Michele usa sistematicamente in tutta l'intervista. L'idea idiosincratica attorno a cui ruota il suo discorso può essere tuttavia evidenziata attraverso ciò che lui stesso dice esplicitamente alla fine dell'intervista:

”Mi piace la fisica perché mi spiega come funziona la realtà, diciamo in parole molte grossolane, sono molto curioso di sapere come funzionano gli oggetti, gli eventi naturali...”

Era già emersa, anche nelle lezioni che hanno preceduto lo studio della termodinamica, la preferenza di Michele per la meccanica classica perché, come dice esplicitamente durante l'intervista, “è lì che possiamo trovare le cause”; è la meccanica, e non altri settori della fisica, che permette di capire “*gli oggetti della vita reale*”, le macchine di cui lui è molto appassionato.

⁴⁴ I nomi degli studenti sono di fantasia.

Dalla presenza di parole e frasi come quelle precedenti, si evince che il cuore del discorso ruota attorno a idee strettamente legate al mondo reale, agli oggetti e alle spiegazioni fisiche (“come funziona”) che permettono di individuare le cause meccaniche di un fenomeno; in altre parole, il discorso di Michele ruota attorno all’idea di *“come funzionano gli oggetti nel mondo reale”*.

Questa idea, con le sue “variazioni”, permette di interpretare – come verrà mostrato nei punti b) e c) – non solo il discorso di Michele durante l’intervista, ma anche la sua posizione rispetto ai compagni di classe nelle discussioni collettive.

b) Sviluppo dell’idea durante l’intervista. L’idea “come funzionano gli oggetti nel mondo reale” è sviluppata da Michele in modo consistente durante tutta l’intervista.

Parlando del concetto di temperatura (prima parte del protocollo d’intervista) dice:

Michele: *“Abbiamo visto che, nel ciclo di Carnot, le temperature influenzano il rendimento, il processo, il ciclo.*

Intervistatore: *In che senso? Puoi spiegare meglio?*

Michele: *Servono temperature diverse... per riuscire a compiere del lavoro... diverse temperature inducono uno scambio di calore – possiamo dire così – che determina lavoro; viene trasformata energia sotto forma di calore in energia lavoro.*

Invece di considerare la definizione di temperatura data dall’insegnante, Michele focalizza la sua attenzione sulle differenze di temperatura proprio perché ciò che gli interessa è la produzione di lavoro meccanico e si ha lavoro meccanico se vi è differenza di temperatura.

Rispondendo poi alla domanda della seconda parte del protocollo di intervista *“Guardando più in generale all’intero percorso c’è un approccio che tu hai preferito?”*

Michele dice:

“Il micro [l’approccio microscopico della teoria cinetica dei gas], perché riesce a spiegare meglio le cause, cos’è la T, cos’è il termine proprio in sé, mentre nel macro [approccio macroscopico] si studiano gli effetti, [...] senza mai riuscire a dare una spiegazione esaustiva del termine.”

E ancora:

“[Nell’approccio macroscopico al secondo principio] lì è proprio vita reale [nelle macchine termiche], diciamo, questi processi, le macchine funzionano tramite questi cicli, quindi mi interessava più relazionarlo alla vita reale che sapere cos’è esattamente”.

La risposte di Michele mostrano ancora una volta come i suoi discorsi siano guidati dalla sua idea idiosincratice: non predilige uno dei due approcci in particolare, ma di ciascuno dei due seleziona e prende in considerazione solo quegli aspetti specifici che lo aiutano a comprendere la realtà, come funzionano gli oggetti; Michele, in questo modo, mostra di assumere una precisa posizione rispetto al senso che ha per lui lo studio della fisica.

c) *Relazione con le attività precedenti.* Proprio per questa posizione, il ruolo di Michele è stato importante nelle dinamiche di classe; si è esposto prendendo posizione in favore dell’approccio microscopico per quanto riguarda la prima legge e in favore dell’approccio macroscopico per quanto riguarda la seconda legge.

Nonostante le sue precise preferenze, Michele ha però espresso il suo interesse per l’intero percorso perché ci sono “due modi per arrivare alla realtà” e perché danno un esempio di “come gli scienziati lavorano”:

“è stato molto interessante capire questi due modi per riuscire ad arrivare a dei principi, a come si arrivava alla realtà, mi è servito, mi è sembrato molto interessante, anche capire come lavorano gli scienziati, capire come ha lavorato Einstein, come ha lavorato Poincaré”.

Michele ha scelto di tenere una posizione pragmatica rispetto ai compagni e, dall’inizio, è stato uno dei punti di riferimento nelle dinamiche di classe. Già dalle sue risposte al questionario e i suoi interventi nella prima discussione di classe egli ha preso una netta posizione in favore di quell’approccio che può arrivare “direttamente”, “perfettamente”, “realmente” e nel modo “più semplice” al “cuore delle cose”. Per Michele il questionario è servito anche come strumento per cercare di riconoscere in

anticipo quale approccio preferire perché più vicino alla realtà e alla sua idea di semplicità. Durante la prima discussione si esprime in questo modo:

Michele: “[attraverso l’approccio microscopico] *si possono spiegare fenomeni complessi...cioè uno prova a costruire una semplice immagine di fenomeni complessi [...]*”

Insegnante: “*non abbiamo ancora affrontato l’approccio micro. Che idea te ne sei fatta?*”

Michele: “*per ricercare le cause, le cause supreme... per analizzare perfettamente, realmente i concetti primitivi, cosa è, ad esempio, la temperatura a livello molecolare.*”

Michele diventa un riferimento stabile e riconosciuto dalla classe, spesso in opposizione alla posizione di Matteo.

Matteo: il piacere della speculazione e la ricerca di un approccio umanistico alla scienza.

a) *Idea idiosincratica.* I discorsi di Matteo sono ricchi di termini filosofici e la posizione di Matteo può essere sintetizzata nella frase seguente:

“Io ritengo ovvio il fatto che sia fondamentale speculare sulla realtà e sull’esistenza, perché una volta che vedi dei fenomeni e ne ricavi delle formule, a quel punto non hai niente, non hai una base su cui fondarti. [...] Ritengo che per riuscire a capire [...] sia fondamentale [...] fare certe speculazioni, sul come vengono appunto trovate, vengono elaborate certe teorie, vengono elaborati certi concetti. Questi concetti rimarranno sicuramente di più di qualche formula”.

Matteo è molto esplicito e coerente nel cercare la dimensione filosofica, la dimensione a lui più congeniale, che può aiutarlo a entrare nel ragionamento fisico. Come sarà mostrato nei punti b) e c), questa dimensione lo porta a focalizzare l’attenzione sulla distinzione filosofica tra “essere e divenire”, in modo da trovare una chiave significativa per capire i concetti fisici (con i quali non risuona naturalmente) e le peculiarità della termodinamica rispetto ad altri ambiti della fisica.

b) *Sviluppo dell'idea durante l'intervista.* Matteo sviluppa in modo consistente la sua idea centrale durante tutta l'intervista. Parlando del concetto di temperatura dice:

“[Penso che] $Q=mc\Delta T$ sia *divenire*[...]: c'è un cambiamento [a causa di ΔT] che porta al fatto che non è tutto stabile e non è tutto essere, c'è qualcosa che cambia.

[...] La prima relazione [$PV=nRT$] è essere perché [...] [c'è] la temperatura assoluta T , che è sempre quella...non c'è Δ [differenza di temperatura], non c'è cambiamento...”

Già rispondendo alle prime domande dell'intervista, Matteo focalizza la sua attenzione sulla differenza tra T e ΔT , e questa differenza lo porta a riconoscere, in un concetto fisico, l'idea filosofica relativa al *divenire* (cambiamento) e all'*essere* (stato).

Alla domanda di carattere generale della seconda parte del protocollo di intervista (*Guardando più in generale all'intero percorso c'è un approccio che tu hai preferito?*), Matteo evidenzia la sua preferenza per l'approccio macroscopico. La sua argomentazione si sviluppa attorno al suo rifiuto sul piano epistemologico di approcci come quello microscopico che si fonda su assunti ipotetici, su come è il mondo:

“Sì, l'aspetto, come appunto avrete capito, [che ho preferito è quello] macroscopico che si ferma sull'osservare ciò che avviene e non cerca di sviscerare la realtà [...], non cerca di capire come queste cose avvengano dall'interno appunto come con una teoria microscopica che vede... che sonda i corpi e trova nei corpi particelle che si muovono allo stesso modo.... cose strane”

L'argomento che Matteo predilige è il concetto di irreversibilità legato al concetto di entropia e alla freccia del tempo.

“Sì, è appunto questo fatto dell'entropia, in cui prende parte un nuovo modo di vedere il mondo [...], perché noi vediamo che il mondo è *divenire*, che certe cose quando avvengono non possono essere trasformate,....riportate indietro come erano prima: la gente invecchia, la tazza si spacca... non può più essere ricomposta e in questo si ha un concetto chiave per riuscire ad accettare anche in un certo senso la realtà “.

A differenza di Michele, Matteo non riconosce alla meccanica un ruolo privilegiato e ancora una volta è la distinzione tra “essere e divenire” la chiave che consente di sottolineare il cambiamento epistemologico nel passaggio dalla meccanica alla termodinamica.

“Le leggi della meccanica sono forse un’idea un po’ bizzarra, per il fatto che le leggi della meccanica sono reversibili e che quindi non c’è un motivo per cui ci debba esser una linea del tempo e il tempo debba andare avanti;[...]; è forse un modo un po’ filosofico di guardare la realtà perché questo modo di non accettare “il divenire dell’essere”, di voler spiegare tutto [...], aver capito che qualcosa non si può spiegare, che ci sia questo avanzare del tempo, questo divenire che non può essere riportato a un essere, magari questo fatto penso mi sia piaciuto cioè mi è piaciuto”.

c) *Relazione con le attività precedenti.* Nelle discussioni Matteo ha giocato un ruolo simile a quello di Michele. È diventato il punto di riferimento della posizione opposta, quella che condivideva una certa forma di scetticismo rispetto alla teoria cinetica dei gas e all’approccio microscopico in generale. Matteo ha espresso la sua posizione rispetto all’approccio microscopico molto chiaramente sia nelle risposte al questionario, sia nella prima discussione in classe.

“[Nell’approccio microscopico] c’è la ricerca di principi fondamentali, che possono anche non avere riscontri pratici, non avere riscontri empirici, un principio che formuliamo nella nostra mente [...], vero per se stesso. Quindi da questo punto di vista possiamo arrivare ad una fede nella ragione [...] [C’è] un principio che è elevato ad assioma, ad una cosa vera, vera di per sé e la natura, in qualche modo deve girarci attorno. È come in un dipinto, c’è un soggetto che è il principio, e [...] la natura deve adattarsi ad esso. [...] ma la ragione non è infallibile.”

Lo studio della termodinamica è stato per Matteo un’importante opportunità per riconoscere che la distinzione filosofica tra “essere e divenire” poteva diventare una chiave per dare ai concetti fisici un significato personale.

Chiara: lo sforzo sistematico di cercare e mettere alla prova “nuovi e diversi punti di vista” perché “capire è come vedere”.

a) *Idea idiosincratca.* L'idea attorno a cui ruota l'intervista di Chiara è ben espressa dalla frase:

“Abbiamo analizzato la termodinamica da due prospettive, guardando le differenze e le similarità, voglio dire abbiamo due differenti punti di vista... può essere più completo cercare di analizzare un fenomeno o ciò che ci circonda da due differenti punti di vista piuttosto che da uno.

[...] fare le cose così è costruttivo, allarga le vedute, posso ragionare meglio, mi permette di vedere le cose da un altro punto di vista e quindi questo è molto utile anche ai fini personali.”

“Capire” per Chiara significa “vedere”. Nell'intervista ricorrono spesso metafore che enfatizzano l'essenza di un insegnamento multi-prospettico; il concetto “capire significa vedere” è ripetuto 3 volte, la parola “vedere” ben 12 volte e la parola “vista” 4 volte.

b) *Sviluppo dell'idea durante l'intervista.* Parlando della temperatura, nella prima parte della intervista Chiara dice:

“T è una variabile intensiva [...]; la posso definire attraverso due approcci quello macro e quello micro, con quello macro la considero come una proprietà che hanno i sistemi in equilibrio e la misuro attraverso degli strumenti come ad esempio il termometro; costruendo una scala posso misurare T, ad esempio nel caso del termometro considero il ghiaccio che fonde e l'acqua che bolle, metto 0°C e 100°C, divido in unità tutte uguali fra loro e da lì posso constatare la variazione di temperatura che può subire un corpo. Invece sotto l'aspetto micro [la temperatura] è legata al movimento molecolare, alle particelle. Poi T l'abbiamo vista legata all'energia interna, [...] in un grafico pV posso rappresentare un'isoterma che avrà una T assoluta espressa in Kelvin e in base all'isoterma posso definire un'energia interna che sarà propria dello stato di equilibrio [...].” Chiara non specifica esplicitamente che sta parlando di un gas ideale, ma lo si intuisce dal contesto.

L'opportunità di confrontare i due approcci dà a Chiara l'opportunità di "giocare" con la metafora del "vedere" che è usata a diversi livelli: dalla osservazione empirica, ma non banale, della realtà, alla interpretazione, attraverso l'approccio microscopico di ciò che può essere visto solo con "gli occhi della mente".

Nella seconda parte della intervista, parlando del concetto di temperatura Chiara dice:

"Un [approccio] è più tangibile, più reale perché lo vedo con il termometro, misuri e dici: c'è una variazione di T, lo vedo e lo capisco. Comunque, anche l'aspetto micro è utile [...]: ad esempio il movimento delle particelle in un termometro non lo posso vedere, solo andando nel microscopio ... puoi vedere" [con gli "occhi della mente" questo movimento]

Nella sua prospettiva l'approccio microscopico è utile *"non per capire meglio il macro, che comunque ho trovato più semplice, ma per vedere sotto un altro punto di vista"*

L'interesse e il piacere per il gioco di mettere in relazione le diverse prospettive emerge anche quando Chiara parla di irreversibilità e mostra la sua sorpresa nel trovare che lo studio di questo concetto obbliga ad una sorta di "capovolgimento" delle idee che fa andare oltre le apparenze:

"L'entropia mi interessava per il fatto che era legata alla reversibilità e all'irreversibilità dei fenomeni, pensavo: "che strana cosa: i fenomeni sono irreversibili, c'è un prima e un dopo, però li considero reversibili, anche qui faccio un altro modello ideale, li considero attraverso delle altre trasformazioni", è una sorta di capovolgimento [che avviene] spesso nella fisica, che però mi piace [...]"

c) *Relazione con le attività precedenti.* Chiara ha giocato un ruolo importante in entrambe le discussioni di classe proprio per il suo desiderio di *"vedere altri punti di vista"*, di *"ampliare il proprio punto di vista, evitando di restare bloccati su questioni particolari"*.

A differenza di Matteo e Michele, Chiara non ha interpretato il questionario come un modo per esprimere la sua preferenza per un approccio o per l'altro. Ha piuttosto focalizzato l'attenzione su come individuare, perché fossero utili a lei, i principali

aspetti di ogni approccio. I suoi interventi, nei quali ha espresso chiaramente quali sono per lei le principali differenze tra i due approcci (i differenti ruoli degli esperimenti e delle osservazioni, la differente natura delle ipotesi, il diverso modo di formulare ipotesi), sono stati essenziali per la dinamica della discussione finale.

Lorenzo: la costruzione di una visione unificata, vasta e coerente per poter capire.

a) *Idea idiosincratica.* Durante l'intervista Lorenzo ha reso esplicita quella che sembra essere per lui l'idea centrale:

“Si può vedere che ogni cosa è presa e ripresa in considerazione, non è divisa in argomenti ognuno dei quali ha proprie leggi, ma ogni cosa può essere connessa, unificata, gli argomenti diventano più ampi e più uniformi [organizzati]”

Per lui “capire” significa “connettere”, “unificare in una visione sempre più vasta e coerente”. Ripete questo concetto diverse volte mostrando, come sarà illustrato nei punti b) e c), quanto sia importante per lui la necessità di trovare una visione ampia, unificata e coerente.

b) *Sviluppo dell'idea durante l'intervista.* Parlando di temperatura Lorenzo pone grande attenzione alla descrizione del processo che gli ha permesso di connettere i diversi elementi di conoscenza e costruirsi una visione sempre più ampia e consistente.

“All'inizio ho legato la temperatura allo scambio di calore; poi al lavoro ma anche ad altre quantità. Poi anche alla macchina di Carnot.[...]”

[All'inizio] a livello macro, la temperatura era legata a pV, al grafico pV: abbiamo visto che lungo un'isoterma il prodotto pV è costante e questa costante è legata alla temperatura [...] poi [andando avanti nel percorso] il concetto di temperatura è cambiato. All'inizio non avevo questi concetti nella mente e pensavo solo al cambiamento di temperatura. Non pensavo che dietro il livello macro e micro ci fosse questo discorso più ampio. Così il mio punto di vista è diventato più ampio”.

Lorenzo è interessato ai passaggi seguiti in classe per ampliare il contesto in cui applicare il concetto di temperatura, ma, soprattutto, è interessato e coinvolto nel

ricostruire il suo personale processo, quello che gli ha permesso di ampliare la sua visione. Dalla citazione si vede come cambia anche la persona dei verbi, dal *noi* a *io*.

In coerenza con la sua esigenza di ricercare una visione più ampia, consistente e unificata, nella seconda parte dell'intervista dice che ha apprezzato l'approccio macroscopico ai gas perfetti soprattutto per la sua natura unificante (*"Sono stati procedimenti abbastanza rapidi, con quelle tre leggi [Leggi di Boyle e Gay-Lussac] siamo giunti abbastanza velocemente alla legge dei gas perfetti."*) e quello microscopico per la possibilità di interpretare la temperatura (*"cercare di ridare una spiegazione della temperatura partendo dal movimento delle molecole"*).

Egli conferma ancora la sua posizione quando confronta i due approcci:

"Alla fine di tutto il percorso, son riuscito a capire gli aspetti che prediligo dell'uno e gli aspetti che prediligo dell'altro,.... Ho prediletto per certi aspetti l'uno per certi aspetti l'altro, alla fine ho potuto uniformare tutto, quindi il discorso complessivo l'ho capito abbastanza chiaramente, grazie a queste due modalità".

Lorenzo ammette di avere avuto serie difficoltà a rispondere al questionario all'inizio del percorso perché i testi da analizzare contenevano troppi elementi, troppi spunti di riflessione e lui non riusciva a trovare una chiave per costruirsi una struttura unificante, una chiave che ha trovato solo alla fine del percorso grazie al confronto, da un punto di vista epistemologico, delle due prospettive.

"[Quando ho riletto il questionario] ho subito associato la termodinamica a livello micro alla teoria costruttiva, mi è subito venuto in mente e li ho letti in maniera diversa,..... e mi è stato subito più chiaro rispetto alla prima volta. Sono riuscito a ricollegare... Leggendoli [i testi] così, ho capito che qualcosa era cambiato....[....] mi ha dato soddisfazione...perché mentre la prima volta avevo fatto fatica, ci avevo messo un pomeriggio, avevo riletto molte volte, non mi erano chiari molti passaggi e molti procedimenti....."

Conclude dicendo:

“ [...] *Ho notato molta differenza tra quando l’ho letto all’inizio [il questionario] e quando l’ho letto alla fine, cioè comunque se non le avessi lette all’inizio.....non avrei apprezzato il lavoro che abbiamo fatto* ”.

c) *Relazione con le attività precedenti.* Lorenzo, in accordo con quanto egli ha dichiarato sulle sue iniziali difficoltà a comprendere il significato del questionario, non è mai intervenuto durante la prima discussione in classe. Ha invece giocato un ruolo molto importante nella discussione finale: il suo bisogno di coerenza è stato un apporto fondamentale alla riflessione collettiva aiutando a mettere in evidenza eventuali “contraddizioni” nel ragionamento del gruppo classe.

Caterina: l’attenzione e la ricerca di quei dettagli “non scontati ma che si danno per scontati”.

a) *Idea idiosincratica.* “*La fisica mi piace perché sono curiosa rispetto a come succedono le cose*” Ma ciò che a Caterina sembra piacere di più della fisica è che “*le cose ovvie non possono essere date per scontate*”. In particolare, ciò che le è piaciuto di tutto il percorso di termodinamica è che “*mi ha fatto notare cose che prima non avevo notato*”. Questa è l’idea attorno a cui ruota tutto il suo discorso.

b) *Sviluppo dell’idea durante l’intervista.* Parlando di temperatura, la sua attenzione è soprattutto diretta al problema non banale di come misurare una grandezza apparentemente ovvia.

“*Inizialmente T è il sintomo da cui è partita la ricerca sulla TD perché osservando questa variazione di un grandezza che non si riusciva a misurare come si misura un lunghezza o un tempo. Da questo si è pensato che ci fosse qualcos’altro e si è cercato di dare delle risposte relativamente a che cosa scatenava questa variazione di T ed è stata appunto definita temperatura. Cioè era una cosa che si sentiva, si sentiva che un corpo che prima era freddo poi era caldo, solo che non sapevi come misurarlo, perché non è che c’era un metro o un cronometro...*”

[...]

non è che con le tue sensazioni puoi avere una scala precisa e dire quanto misura, non riesci a dare un valore numerico alle sensazioni

[...]

[mi è piaciuto] di non poter dare per scontate alcune cose che nella vita comune si sbagliano e sono dati di fatto.”

Caterina pone sistematicamente attenzione ai piccoli dettagli che tiene sotto controllo, anche per essere sicura che il modello di realtà che si è costruito non sia infondato o troppo idealizzato.

“Nel micro mi è piaciuto e insieme non mi è piaciuto il fatto del modello di un gas discreto, perfetto, rarefatto [...]

Ciò che non le piace è l'idea di “perfezione” che sembra dare un'immagine troppo ideale e semplificata della realtà, trascurando troppi dettagli. Ciò che invece le piace è *“che si possa pensare un modello su cui fare esperimenti e creare un modello così perfetto che ognuno potrebbe immaginare una cosa come quella...”*

Per Caterina si può apprezzare un modello solo dopo che si è appurato che questo ha riscontro nella realtà, perché solo così si possono prendere in considerazione dettagli non notati prima:

“Il macro mi è piaciuto di più perché mi ha fatto pensare a delle cose che davo per scontate, mentre il micro mi è piaciuto perché c'è questo modello che fa pensare, perché se ti soffermi a pensare a tutti i vari passaggi che sono stati fatti per poter arrivare alla legge finale, bisogna considerare un bel po' di cose.”

c) Relazione con le attività precedenti. Caterina ha giocato un ruolo importante nelle dinamiche di classe perché la sua attenzione ai dettagli, riconosciuta dagli altri studenti, è diventata parte importante delle discussioni.

Nel questionario inoltre Caterina è apparsa autonoma e creativa: non ha risposto alle singole domande, ma ha proposto una sua personale riorganizzazione delle risposte, individuando un suo criterio per confrontare i diversi tipi di teorie (sviluppando per esempio la distinzione tra “relazioni esterne di un fenomeno” o “meccanismo interno di un fenomeno”).

5.2. Risultati dell'analisi per strutturare i profili

Dal confronto dei profili, risulta evidente la natura idiosincratca del modo in cui ogni studente ha reagito alla proposta didattica; in particolare, l'analisi ha mostrato come gli studenti siano stati in grado di riconoscere la struttura complessa dei materiali proposti e ciascuno abbia focalizzato la propria attenzione su aspetti differenti: rapporto con la realtà, riflessioni filosofiche/epistemologiche, co-presenza e confronto di differenti approcci, visione unificata e coerente della struttura, presenza di dettagli.

Dall'analisi dei dati è inoltre emerso come ogni studente abbia focalizzato la sua attenzione su differenti "elementi di conoscenza" che sono parte di ciò che comunemente viene chiamato concetto, e li abbia poi riorganizzati in accordo con la propria idea idiosincratca. Ad esempio, riferendosi al concetto di temperatura, come si è visto dalla lettura dei profili, Michele ha focalizzato l'attenzione sul gradiente di temperatura perché è questo che permette lavoro meccanico, mentre Matteo ha focalizzato la sua attenzione su T e ΔT perché questa distinzione può essere vista come una differenza filosofica tra essere e divenire. Gli studenti hanno trasformato il concetto in modo da renderlo significativo non solo per loro stessi ma anche per la classe. La coerenza e il carattere meta-disciplinare con cui hanno argomentato la loro posizione durante tutta l'intervista e nelle discussioni di classe (compresa la scelta delle parole e delle espressioni utilizzate) ha rafforzato la loro posizione sia rispetto alla fisica sia rispetto ai compagni e all'insegnante, e fa dire che, nelle loro scelte, non ci sono state ragioni di convenienza.

In conclusione, le caratteristiche comuni nei discorsi degli studenti individuate nella prima fase di analisi (cfr. capitolo 4), sono state confermate ma maggiormente specificate:

- il discorso di ciascuno studente si è sviluppato *coerentemente*, sia ad un livello disciplinare che meta-disciplinare;
- gli argomenti sono *fondati sul piano disciplinare* nel senso che sono stati selezionati diversi aspetti disciplinari (della termodinamica) che poi sono stati correlati l'uno all'altro in modo significativo da un punto di vista della conoscenza fisica, cioè nel rispetto delle regole disciplinari;

- l'argomentazione è “*spessa*” nel senso che include elementi che appartengono alla dimensione meta-cognitiva e/o epistemologica;
- l'approccio specifico alla conoscenza disciplinare *non è occasionale* (si può riconoscere l'approccio personale degli studenti nelle varie attività di classe);
- il discorso, attorno al quale lo studente costruisce i propri argomenti, rivela un coinvolgimento e un impegno personale, per il suo essere *autentico* (non si sente la voce dell'insegnante).

Alla luce di quanto detto si può formulare una prima definizione che contiene al suo interno quelle che sono emerse come caratteristiche comuni.

Una prima definizione di appropriazione

*Appropriazione è quel particolare processo personale che implica, da parte dello studente, una trasformazione della conoscenza tale che i **contenuti disciplinari** stessi siano **coerenti** e sia possibile una ricostruzione **personale** in cui la voce degli studenti riveli un **autentico** coinvolgimento e la conoscenza fisica sia inserita dentro un **percorso più ampio di conoscenza** che vada oltre l'obiettivo di imparare la termodinamica.*

Le caratteristiche comuni dei discorsi degli studenti, tuttavia, non sono ancora dei costrutti teorici sufficientemente specifici ed operativi per stabilire, applicando la definizione ad altri dati, se c'è stata o no appropriazione.

Si è allora analizzata la letteratura di ricerca riguardante il termine appropriazione, ma anche quello di internalizzazione (strettamente legato ad appropriazione), con il duplice scopo di: inquadrare la definizione in una prospettiva teorica più ampia; cercare un contributo che, in accordo con la visione di apprendimento e quindi di appropriazione che stava emergendo dall'analisi, aiutasse a definire più specificamente e più operativamente i vari ingredienti che sembravano concorrere a definire l'appropriazione come costrutto teorico.

5.3. Il termine appropriazione nella letteratura di ricerca in campo educativo

Il termine *appropriazione* è stato introdotto da Bakhtin in campo linguistico per descrivere quel processo che il soggetto mette in atto per adattare “a word living in a world of others” al proprio personale mondo, attribuendo alla parola intenzioni, accenti, intenti idiosincratici.

“It [a word] becomes “one’s own” only when the speaker populates it with his own intentions, his own accent, when he appropriates the word, adapting it to his own semantic and expressive intention. Prior to this moment of appropriation, the word does not exist in a neutral and impersonal language (it is not, after all, out of a dictionary that the speaker gets his words!), but rather it exists in other people’s mouths, in other people’s contexts, serving other people’s intentions: it is from there that one must take the word, and make it one’s own.” (Bakhtin, 1981).

Nella letteratura di ricerca in campo educativo, la parola *appropriazione* è stata introdotta, facendo riferimento agli scritti di Bakhtin, da Barbara Rogoff ed è stata scelta per esprimere la differenza tra la sua visione e “*the version of internalization involving importing objects across boundaries from external to internal*” (Rogoff, 1995). Bakhtin è stato scelto dalla Rogoff come riferimento in quanto “[Bakhtin] argued that the words people use belong partially to others, as they appropriate words from others and adapt them to their own purposes.” (Rogoff, 1995)

Il termine *internalizzazione* è stato introdotto da Vygotskij, e la Rogoff, preferendo il termine *appropriazione (appropriazione partecipata)*, vuole prendere le distanze dalla prospettiva teorica che si è progressivamente delineata nell’uso del termine *internalizzazione*; una prospettiva che implica una trasmissione meccanica di concetti, conoscenze, abilità: si acquisiscono, si accumulano, si memorizzano elementi esterni di conoscenza o abilità in una sorta di separazione tra individuo e contesto sociale.

“Development in terms of a static, bounded ‘acquisition’ or ‘transmission’ of pieces of knowledge (either by internal construction or by the internalization of external pieces of knowledge).” (Rogoff, 1995).

La prospettiva teorica legata all’uso del termine *appropriazione* implica invece un processo dinamico in cui le persone partecipano ad attività socio-culturali come parti integranti di quella attività; in questo senso il contesto sociale non è esterno all’individuo:

“Development as a dynamic, active, mutual process involved in peoples’ participation in cultural activities” (Rogoff, 1995).

Secondo la prospettiva della Rogoff

“Appropriation occurs in the process of participation, as the individual changes through involvement in the situation at hand, and this participation contributes both to the direction of the evolving event and to the individual’s preparation for involvement in other similar events [...] appropriation is a process of transformation, not a precondition for transformation.” (Rogoff, 1995).

Il termine *appropriazione*, tuttavia, sembra non sottendere una sola prospettiva teorica. Nella prospettiva condivisa da Rogoff, come si è detto, la persona è parte, attraverso la sua partecipazione, dell’attività di cui deve appropriarsi e durante questo processo si perde l’idea di confine tra una dimensione interna e una esterna. A volte, però, si considera l’*appropriazione* come quel processo che precede la trasformazione, come *precondizione* per la trasformazione stessa: una conoscenza è importata dall’esterno e poi trasformata per adattarsi al nuovo “proprietario”. Quest’ultima prospettiva è quella che secondo Rogoff è alla base della visione che si è progressivamente delineata nell’uso del termine *internalizzazione*: una conoscenza è importata dall’esterno e non è sostanzialmente messa in discussione l’idea di confine tra una dimensione interna e una esterna.

Un'ulteriore differenza tra la prospettiva della internalizzazione e quella dell'appropriazione sta nel modo in cui è considerato il tempo. Nella prospettiva dell'internalizzazione il tempo è, più o meno implicitamente, segmentato in passato, presente e futuro. L'individuo memorizza e la memoria del passato viene recuperata, rielaborata nel presente ed eseguita nel futuro. Questo implica, denuncia sempre Rogoff, un modello di mente a memoria con elementi statici e con processi esecutivi che portano elementi memorizzati a essere implementati in un periodo successivo, e questi processi sono difficili da specificare.

Nella prospettiva dell'appropriazione il tempo è un elemento *interno agli eventi* e non è costituito da unità separate (passato, presente e futuro). Ogni evento nel presente è una estensione di eventi precedenti ed è diretto verso eventi non ancora compiuti. Il presente si estende nel passato e nel futuro e non è separato da essi.

All'interno della ricerca in campo dell'educazione scientifica, e precisamente nella didattica della matematica, l'internalizzazione è stata oggetto degli studi di Sfard che ha introdotto una nuova parola, certamente vicina ad appropriazione: *individualizzazione*. Come il termine appropriazione per la Rogoff, anche il termine individualizzazione per la Sfard è all'interno di una prospettiva partecipativa, che mira a superare ogni forma di semplice acquisizione (dall'esterno all'interno).

Tuttavia la Sfard preferisce la parola individualizzazione perché vede nella parola appropriazione, a differenza di Rogoff, un residuo del significato "acquisizione" che implica un'implicita distinzione tra dentro e fuori, e anche perché vuole porre l'enfasi su quelle che lei chiama *variazioni personali* (personal variations) delle attività collettive:

"Individualization results in personal versions of collective activities: learning to speak, to solve mathematical problems, or to cook means a gradual transition from being able to take a part in collective implementations of a task to becoming capable of implementing such a task in its entirety on one's own accord."

L'individualizzazione però, come nel modello complesso della Rogoff, è strettamente correlata al concetto di comunità, per cui viene coniato il termine "commognition".

"The collective activities are primary models for individual forms of acting, whereas individual variations feed back into the collective forms of doing, acquire permanence, and are carried in space and time from one community of actors to another." (Sfard, 2007)

5.4. Triangolazione tra i risultati dell'analisi e la letteratura di ricerca

L'analisi della letteratura di ricerca ha permesso di condividere con la Rogoff l'idea che il termine appropriazione debba includere, nel guardare all'individuo, l'attenzione al processo dinamico e complesso della sua relazione con la comunità-classe, mettendo in discussione la stessa idea di confine tra la dimensione cognitiva individuale e quella collettiva. Condividere il fatto che la persona sia parte integrante, attraverso la sua partecipazione, dell'attività di cui deve appropriarsi mette l'accento, in una realtà di classe, sullo stretto intreccio (intreccio circolare) tra le dinamiche individuali e collettive e sull'importanza del ruolo giocato da ciascuno nella co-costruzione di una conoscenza condivisa all'interno della comunità scolastica.

La visione di Bakhtin, tuttavia, sembra essere più efficace di quella di Rogoff per definire alcuni termini teorici dell'appropriazione che possono riferirsi anche a un contenuto scientifico.

Bakhtin infatti, più di Rogoff, pone l'accento sull'*oggetto* dell'appropriazione. Per lui, l'oggetto dell'appropriazione è, in campo linguistico, il discorso – composto di *words* e *utterance* – nella sua *natura dialogica e storicamente contingente* (un discorso non può che avvenire all'interno di una comunità, un posto, una storia e non può essere separato da queste). Seguendo Bakhtin, l'appropriazione di un discorso è quel processo che l'individuo mette in atto per adattare le parole al proprio mondo attribuendo a queste intenzioni personali. Ma l'appropriazione di un discorso, per il fatto stesso che riflette la storia personale di ciascuno, non necessariamente deve essere circoscritta al campo linguistico, ma può essere estesa a diverse forme di discorso: appropriazione di un

discorso come modello dell'apprendimento, anche dell'apprendimento scientifico. Ma il discorso scientifico può diventare oggetto dell'appropriazione solo se si considera la conoscenza fisica una conoscenza plastica: una conoscenza che può essere trasformata personalmente dallo studente con accenti personali ma senza uscire dai vincoli disciplinari. Nell'appropriazione di un contenuto scientifico (fisico in particolare) termini scientifici (*words*) come ad esempio calore e temperatura, o espressioni del discorso scientifico (*utterance*) diventano la principale unità di appropriazione. Seguendo la visione di Bakhtin, ogni studente prende queste parole “*dalle bocche altrui*”, dalle bocche degli altri membri della comunità (compagni e insegnante), e le trasforma arricchendole di sfumature, intenzioni, significati personali, in modo che il discorso scientifico possa diventare parte della sua storia personale.

Come è emerso dall'analisi dei dati, vi sono state tra gli studenti, per dirlo con Sfard, “*variazioni personali*”; le “*variazioni personali*” sono quindi possibili anche nell'apprendimento delle discipline scientifiche, le cosiddette “*discipline dure*” (matematica e fisica) che invece, nell'opinione diffusa, sembrano avere una unica possibile interpretazione. Come sembra di poter evincere dall'analisi, le variazioni personali non sono avvenute solo durante il processo di apprendimento, ma anche e soprattutto nelle sfumature e nei significati che il singolo studente ha dato alle parole e alle espressioni. In accordo con Bakhtin, se le parole fanno parte di un discorso (in questo contesto, un discorso scientifico), l'appropriazione di questo discorso significa che la disciplina (la fisica) diventa parte di una *biografia personale*.

In questa prospettiva, la conoscenza scientifica non colma lacune facendo entrare l'individuo in un discorso scientifico (*neutro e impersonale*) sempre più raffinato, ma piuttosto le parole (*word e utterance*) del discorso scientifico, che esistono sulla bocca di altri, nelle intenzioni di altri, possono e devono diventare proprie.

5.5. Definizione operativa di appropriazione

Alla luce di quanto detto, inquadrando teoricamente l'analisi dei dati, si può sostenere che le parole e le frasi ripetute dagli studenti rappresentano delle variazioni personali, e possono essere elevate a parole/espressioni-chiave; sono cioè quelle parole/espressioni alle quali gli studenti sono stati in grado di assegnare un significato più ampio, profondo e personale, investendo anche la dimensione emotiva dell'apprendimento; per dirlo con Bakhtin la parola è diventata “*one's own*” e questo avviene solo quando “*speaker populates it with his own intentions, his own accent, when he appropriates the word, adapting it to his own semantic and expressive intention.*”

In altri termini, nelle parole e nelle frasi ripetute si può riconoscere il modo personale con cui gli studenti esprimono e sviluppano la loro idea idiosincratica. Questa idea permette loro di giocare il gioco di selezionare e ricomporre, in un modo personale, elementi di conoscenza legati a concetti fisici come quello di temperatura. Questo gioco porta gli studenti a popolare le parole del discorso fisico di intenzioni e gusti personali e a inserirlo in una narrazione che dà senso non solo a loro come individui, ma a loro all'interno di una comunità, all'interno delle dinamiche collettive.

Le caratteristiche comuni dei discorsi degli studenti, emerse dalla costruzione e dal confronto dei profili (fase 1 dell'analisi dei dati), si possono allora ridefinire in modo da diventare costrutti teorici più operativi – *marcatori* – che, se inglobati nella definizione, la rendono più chiara e ricca nel suo significato.

Marcatori operativi:

- A. il discorso, in tutta l'intervista, è sviluppato dal singolo studente attorno a un set di parole-chiave e espressioni ripetute diverse volte in modo da esprimere, rispetto alla fisica, un'idea ***autentica e idiosincratica***; le idee sono riconoscibili come autentiche e idiosincriche perché sono differenti da studente a studente; inoltre le scelte linguistiche e il tono usato mostrano che queste idee non sono “prese in prestito” da un'autorità esterna (insegnante, libro di testo, compagno di classe...);

- B. il discorso è *fondato sul piano disciplinare* nel senso che le idee idiosincratiche sono state usate dagli studenti per selezionare elementi di conoscenza disciplinare e ricomporli poi in un modo significativo da un punto di vista disciplinare (rispettoso delle regole e dei vincoli della fisica);
- C. il discorso è “*spesso*” nel senso che l’idea idiosincratica include elementi che appartengono alla dimensione meta-cognitiva (che cosa significa per me imparare la fisica) e a quella epistemologica (che immagine di fisica ha senso per me);
- D. il discorso *non è occasionale* nel senso che l’idea idiosincratica la si ritrova nelle diverse attività che hanno coinvolto gli studenti (e non solo nell’intervista);
- E. Il discorso è veicolo *di relazioni sociali* nel senso che l’idea idiosincratica è difesa dallo studente di fronte alla classe e lo posiziona all’interno della comunità di classe (l’“ingegnere”, il “filosofo”, il “mediatore”...) e, viceversa, lo sviluppo dell’idea idiosincratica non è separabile dalle dinamiche di classe.

Definizione: l’appropriazione è un processo complesso (C) di trasformazione del discorso scientifico (cioè di parole e frasi della scienza) finalizzato ad *incorporare* tale discorso all’interno di una propria storia personale (D).

Questo processo:

- popola il discorso scientifico di scopi e intenzioni personali, di gusti idiosincratici (A);
- rispetta le regole e i vincoli disciplinari (B);
- ha, intrinsecamente, una natura sociale (E): è sensato sia per se stessi, sia all’interno del contesto sociale della classe.

5.6. Messa alla prova della definizione operativa

La significatività e l’efficacia operativa della definizione è stata messa alla prova sui dati riguardanti gli altri tre studenti intervistati; ad un primo livello di analisi questi

studenti sembravano molto diversi dai cinque di cui si è delineato il profilo in quanto: i) non era evidente una idea idiosincratICA attorno cui fare ruotare il discorso; ii) il modo di parlare di concetti di fisica (ad es. di temperatura) richiamava una strategia comune: ripercorrere cronologicamente quanto fatto in classe (erano ripetute frasi come ad es. “*in classe abbiamo fatto...*”, “*abbiamo introdotto il concetto...*”, “*mi ricordo che abbiamo fatto...*”, o ancora “*non mi ricordo se...*”).

Ad un primo livello di analisi sembrava quindi di dover concludere che non c’era stata, da parte di questi tre studenti, appropriazione. Nel seguito si riportano invece i risultati dell’analisi delle interviste condotta applicando la definizione operativa di appropriazione e si mostra che solo uno studente (Federica) è un evidente caso di non appropriazione. L’applicazione della definizione ai dati di un altro studente (Paolo) ha mostrato non solo che c’è stata appropriazione, ma anche che questa era particolarmente difficile da riconoscere per la “naturale”, spontanea risonanza dello studente con il linguaggio interno alla fisica e con la sua struttura formale. L’analisi dell’ultima intervista (quella di Sara) mostra infine che la studentessa ha risuonato con il senso globale del lavoro, ma era ancora alla ricerca del suo personale approccio all’apprendimento della fisica.

Federica: la sua difficoltà a comprendere il senso dell’intervista.

Durante l’intervista Federica appare imbarazzata e poco a suo agio. La dinamica dell’intervista è del tipo “domanda-breve risposta” e le risposte sono accompagnate da momenti di silenzi e sono presenti espressioni del tipo “*ehm....*” o ancora “*cosa vuol dire...?*” “*in che senso...?*”

Intervistatrice: “Pensa un po’ al percorso dall’inizio alla fine; il concetto di T è emerso diverse volte, Puoi dire quando e come?”

Federica: “Cioè, come....temperatura nel concetto di equilibrio ehm... nel macro?”

I: “In generale, nel percorso, quello che ti viene in mente.”

F: “Mi viene in mente la temperatura legata all’energia”

I: “All’energia in che senso?”

F: “Nel senso che, ehm..., quando diminuisce l’energia diminuisce la temperatura”.

Federica è una brava studentessa, con buoni voti nelle prove in cui è richiesto di svolgere esercizi, e infatti anche durante l'intervista sembra più a suo agio e mostra anche una certa sicurezza in quei momenti in cui può scrivere o leggere delle formule (come ad esempio il primo principio della termodinamica e la legge della calorimetria).

F: [scrivendo la relazione formale $Q-W=\Delta U$] "Questo è il primo principio della termodinamica"

I: "Cosa dici di questa relazione?" [facendo riferimento alla relazione $Q=cm\Delta T$ che Federica aveva scritto sul foglio]

F: "La legge della calorimetria, [...] il calore è proporzionale al calore specifico, alla massa e alla variazione di temperatura."

Anche se le sue risposte sono *on-task* e non contengono evidenti errori o inconsistenze fisiche, il suo discorso è frammentato e non abbastanza articolato da permettere di valutare se il suo pensiero è globalmente consistente.

Le risposte poi diventano particolarmente povere quando le domande passano dal contenuto disciplinare a riflessioni sulla fisica e/o al suo modo di imparare la fisica.

I: "Quale approccio preferisci per la temperatura?"

F: "Il macro è più semplice...il micro anche nelle spiegazioni più difficile anche nella comprensione"

I: "E rispetto a tutto il percorso quale approccio preferisci?"

F: "Quello macro perché più semplice" [Federica mostra evidente difficoltà a spiegare perché è più semplice]

[...]

I: "Nel percorso, quali aspetti/attività hai trovato interessanti e quali difficili?"

F: "Difficile l'aspetto microscopico anche concettualmente"

I: "Perché?"

F: "Non riesco a capire perché nel micro si entra nella materia, mi era difficile..."

La povertà del discorso fa concludere che, in questo caso, non c'è stata appropriazione. Il discorso manca di tutte quelle caratteristiche che si sono individuate per riconoscere

l'appropriazione: le risposte corte e occasionali non mostrano la costruzione di un percorso di conoscenza personale. Anche durante le discussioni collettive non c'è stato coinvolgimento; Federica è apparsa sempre attenta alle discussioni, ma non ha mai chiesto la parola.

Paolo: *“la fisica è la fisica”, una forma di conoscenza affidabile e obiettiva.*

Nei primi 30 minuti dell'intervista (sui 37 minuti dell'intera intervista) Paolo ripercorre l'intero percorso per descrivere quando e come il concetto di temperatura è stato affrontato e in quale relazioni formali la grandezza temperatura è presente.

Il linguaggio che Paolo usa sembra suonare come il tentativo di ricordare cosa è stato fatto *“abbiamo dato una definizione iniziale di temperatura..”, “poi abbiamo trattato l'approccio macroscopico..”, “nel mezzo abbiamo visto le leggi di Gay-Lussac e di Boyle...”*.

In tutto il discorso, tuttavia, Paolo mostra la sua abilità e competenza a muoversi, in modo sicuro, nella dimensione disciplinare. In particolare, sembra muoversi con molta sicurezza nell'affrontare la dimensione formale e nel connettere le formule ai fenomeni o nel riconoscere la dimensione di modellizzazione che sta dietro al formalismo.

Egli mostra anche un interesse marginale rispetto alle riflessioni sulla fisica o sul suo modo di vedere, come è mostrato dai pochi minuti dedicati alla seconda e terza parte dell'intervista (7 minuti).

Ad un primo sguardo superficiale, Paolo sembra lo studente che ha compreso profondamente il contenuto, ma senza cercare quell'approccio personale che è necessario per trasformare la conoscenza disciplinare in una conoscenza personale. Tuttavia, a dispetto di questo, tutte le caratteristiche che si sono evidenziate per riconoscere l'appropriazione, sono presenti nel discorso di Paolo. In particolare, quando si è ri-analizzata l'intervista, alla luce della definizione operativa di appropriazione, la ripetizione di parole-chiave è risultata molto evidente: molte volte Paolo ha ribadito che per lui è importante vedere come la fisica porta sempre *“allo stesso risultato”* anche con approcci differenti intendendo per *“lo stesso risultato”*, le stessi leggi (Tabella 2).

1	7'30''	<i>Abbiamo ricavato la legge [dei gas perfetti] dal punto di vista micro e abbiamo visto che partendo dal macro e dal micro il risultato è lo stesso</i>
2	20'40''	<i>Sinceramente no [non c'è un approccio che preferisco] perché la cosa che mi è piaciuta di più è stata che partendo sia dal micro che dal macro [il valore di] T viene sempre uguale, cioè l'equazione di stato dei gas perfetti viene sempre uguale. Mi sembra un punto di forza perché in qualunque modo ricaviamo questa legge viene sempre lo stesso risultato. Passare dall'una o dall'altra parte l'importante è arrivare allo stesso risultato.</i>
3	27'5''	<i>Alla fine dell'analisi della differenza tra l'approccio Macro e Micro.... In coerenza con il macro si raggiunge lo stesso risultato.</i>
4	30'00''	<i>Ripensando al percorso ci sono delle riflessioni che suggeriresti per fornire altre chiavi per entrare nella termodinamica? Non saprei...Magari vedere che si può arrivare allo stesso risultato in più modi.</i>
5	31'50''	<i>Parlando di probabilità, il suo interesse è nell'usare diversi strumenti matematici per affrontare concetti noti Nell' excursus sulla storia della termodinamica che abbiamo fatto, abbiamo visto che molti personaggi erano arrivati a risultati anche importanti usando vari metodi ma nessuno aveva utilizzato la probabilità.</i>
6	33'50''	<i>Nel macro abbiamo verificato le formule in laboratorio, per esempio P e V sono quantità inversamente proporzionali e diciamo: "E' così perché abbiamo fatto vari esperimenti". Invece nel micro usiamo la meccanica che funziona, ed è tanto che la usiamo. Verificando che passando dalla meccanica ci viene lo stesso risultato che negli esperimenti allora diciamo che il risultato è corretto.</i>
7	37'00'' Ultima frase dell'intervista	<i>Quale approccio ti dà più fiducia? Per me è indifferente passare dal macroscopico o dal microscopico, l'importante è che il risultato sia quello.</i>

Tabella 2. Stralci dell'intervista di Paolo

Anche se in questi stralci dell'intervista Paolo ribadisce che non importa la strada seguita poiché l'importante è ottenere le stesse leggi, in altre parti dell'intervista introduce dei criteri che mostrano che le varie vie non sono per lui equivalenti:

“Il macro è più semplice, ma il micro è più chiaro, perché segui tutti i passaggi. Quando siamo partiti dal macro, siamo partiti dalle leggi e dagli esperimenti in laboratorio; nel micro invece siamo arrivati alla legge dei gas perfetti, abbiamo fatto i vari passaggi da cose che conoscevamo.” (minuto 21).

L'approccio microscopico ha la caratteristica di essere più chiaro di quello macro, perché si seguono i passaggi per giungere al risultato. I passaggi a cui Paolo fa riferimento sono applicazioni di leggi e concetti già studiati e pertanto già conosciuti e, per questa ragione, i passaggi si riferiscono ad una conoscenza di cui ci si può fidare:

“Ad esempio, nel micro ci riconduciamo alla meccanica, è una conoscenza consolidata che noi abbiamo. Passando dalla meccanica possiamo dire che ci fidiamo di più. Nel macro abbiamo verificato le formule in laboratorio [...]. Invece nel micro usiamo la meccanica che funziona ed è tanto che la usiamo, e verificando che passando dalla meccanica ci viene lo stesso risultato che negli esperimenti allora diciamo che il risultato è corretto.”

La possibilità di ottenere lo “stesso risultato” in modi diversi e la possibilità di seguire strade che si basano su conoscenze già acquisite (come la meccanica) sono i due principali criteri che Paolo usa per descrivere quando la conoscenza è affidabile. È significativo che, nell'opinione di Paolo, per ottenere una conoscenza affidabile è preferibile prendere in prestito conoscenze già acquisite e su queste sviluppare una linea di ragionamento piuttosto che eseguire un test sperimentale.

Sulla base di questa analisi, si può dire che la ripetizione delle parola-chiave “*lo stesso risultato*” è l'indizio di una esigenza più profonda di guardare alla fisica come ad una conoscenza affidabile: l'affidabilità della conoscenza emerge come idea idiosincratica attorno alla quale ruota il discorso di Paolo coerentemente sviluppato. In particolare, questa idea può essere correlata ad una precisa immagine di fisica alla quale

implicitamente si riferisce, quando dice che la conoscenza fisica ha una demarcazione precisa rispetto ad altre forme di conoscenza come la filosofia:

[Il questionario]. “È stato interessante, però sinceramente con la termodinamica non mi sembra..., non mi è sembrato che avesse tanti risvolti... forse più per filosofia.”

Nelle discussioni collettive sul questionario Paolo ha giocato il ruolo, assegnatogli dall'insegnante, di rompere il ghiaccio. Il suo coinvolgimento limitato nelle riflessioni meta-cognitive ed epistemologiche lo ha portato ad ascoltare il dibattito dei suoi compagni di classe senza però prendervi una parte attiva.

La sua posizione *coerente e non occasionale* (marcatore D) nel guardare alla fisica come una forma di conoscenza affidabile e ben definita ci ha portato a pensare che, durante l'intera intervista, egli abbia implicitamente sostenuto l'obiettività della fisica come una caratteristica che la rende affidabile. Da questa prospettiva, il modo impersonale in cui, nella prima parte dell'intervista, ha descritto il percorso, visto ad un primo livello di analisi come un segno di mancanza di appropriazione (non ha mai usato espressioni del tipo “Ciò che ho capito è...”, “nella mia opinione...”, ma sempre espressioni del tipo “noi abbiamo fatto..”), può essere riconosciuto come l'espressione di una ben precisa posizione epistemologica: *la fisica è la fisica*. Paolo infatti ha ricostruito il percorso scegliendo quei elementi di conoscenza che considera affidabili e tagliando via ciò che suona come soggettivo.

In questo senso, possiamo inferire che il discorso di Paolo è *spesso* (marcatore C): dietro il suo discorso disciplinare (mono-dimensionale) pulito e competente può essere riconosciuta una precisa posizione epistemologica.

Riassumendo, l'applicazione dei criteri specifici che abbiamo individuato per riconoscere l'appropriazione, ci porta a concludere che il discorso di Paolo può essere riconosciuto come una ricostruzione personale del contenuto disciplinare. La relativa povertà della dimensione filosofica e meta-cognitiva, che ha reso più difficile riconoscere segni di appropriazione nelle sue parole, può essere attribuita alla sua “naturale”, spontanea, e autentica risonanza cognitiva con la fisica. Proprio a causa di

questa naturale risonanza con la disciplina, è stata necessaria una analisi più fine per riconoscere che il linguaggio impersonale usato da Paolo è il suo *personale* linguaggio (marcatore E).

Sara: la ricerca d un approccio “confortevole” all’apprendimento della fisica

Sara durante l’intervista ha detto più volte, molto chiaramente, che per lei lo studio della fisica è difficile soprattutto per il suo aspetto formale:

“Studiare la fisica, almeno dal mio punto di vista, è un po’ pesante, perché è un insieme di formule, di concetti.....”

E ha ripetuto più volte che l’approccio microscopico è, per lei, più difficile di quello macroscopico proprio per l’apparato formale su cui si basa:

“Ho trovato l’approccio macro più facile da comprendere [...] [nell’approccio micro, per esempio quando abbiamo fatto i problemi, c’erano un sacco di formule, [...] l’ho trovato un po’ più pesante, mentre quello macro era più semplice per me.

L’approccio micro, [...] l’ho trovato più difficile per le formule, le costanti. Il ciclo di Carnot invece l’ho trovato più semplice perché erano delle fasi che si ripetevano [...] perché si può connettere al lavoro in generale...”

Nella prima parte dell’intervista riguardante il concetto di temperatura (che ha occupato i primi 13 minuti dei 33 minuti dell’intera intervista) è abbastanza evidente che Sara cerca di ricordare ciò che è stato fatto in classe. Quando ad esempio l’intervistatrice chiede di riportare esempi specifici o contesti in cui le relazioni (ad es. $pV=nRT$, $Q=cm\Delta t$) possono essere applicate, Sara reagisce con momenti di silenzio o frasi tipo *“non ricordo bene...”, “non so...” “abbiamo introdotto il concetto...”*.

La prima parte dell’intervista è completamente condotta dall’intervistatrice: per sviluppare il suo ragionamento, Sara ha bisogno di essere sollecitata con domande alle quali risponde con brevi risposte. La dinamica domanda/breve risposta è molto simile a quella dell’intervista di Federica, ma Sara riesce a seguire un “ragionamento stretto” e il linguaggio che usa è on-task e appropriato da un punto di vista disciplinare.

Per dare un'idea della dinamica della prima parte dell'intervista, se ne riporta un brano abbastanza lungo.

Intervistatrice: *“Vedi una messa in relazione fra la seconda (2) [$Q=cm\Delta t$] dove c'è calore Q e la prima (1) [$pV=nRT$] dove c'è pV ?”*

Sara: *“questa (2) è un trasferimento di energia mentre l'altra (1) no”*

I: *“Cioè...”*

Silenzio...

I: *“Questo (2) indica un processo, in che senso indica un processo?”*

S: *“Perché comunque ci sono due situazioni, una iniziale e una finale e c'è questa variazione di T ”*

I: *“Che tipo di processo è?”*

S: *“Trasferimento di energia attraverso il calore”*

I: *“Quando avviene questo processo?”*

S: *“quando mettiamo a contatto due corpi con temperature differenti.”*

I: *“Quale è il ruolo della temperatura?”*

Silenzio...

S: *“La temperatura è una proprietà che hanno i corpi”*

[...]

S: *“Qui (2) c'è un processo e qui (1) non c'è”*

I: *“Infatti cosa descrive questa (1)?”*

S: *“Uno stato, uno stato del gas, lo stato in cui possiamo conoscere p , V e T in un momento preciso, che è lo stato di equilibrio.”*

Dopo i primi tredici minuti di intervista, qualcosa di importante è successo: l'intervistatrice fa i complimenti a Sara per il modo in cui ha seguito il ragionamento. Da questo momento Sara inizia a rendere esplicite le sue idee e il discorso diventa più lungo e articolato. Per esempio, subito dopo che si è complimentata, l'intervistatrice le chiede se può ricostruire quando, durante le lezioni, hanno incontrato il concetto di temperatura e Sara risponde:

“Ad esempio prima [parte iniziale del percorso] l'abbiamo usata [la temperatura] per spiegare qualcosa, perché abbiamo detto che era una proprietà e come si poteva

misurare, che era una grandezza intensiva, che non può essere misurata direttamente ma che ha bisogno di un'altra grandezza [estensiva] per essere misurata; quindi in questo caso non abbiamo detto precisamente che cos'è [...]. Mentre invece poi [quando si è introdotto l'approccio microscopico], [...] abbiamo approfondito che cos'è la T a livello anche delle particelle, [...] le particelle che si muovono e che influenzano la T. Secondo me è un modo per spiegarlo meglio [...]. la prima descrizione [quella macro] l'ho trovata molto generica.”

Nel transcript riportato si possono rilevare due importanti aspetti del discorso di Sara:

- è la prima volta nell'intervista che osa una opinione personale;
- cambia il soggetto: da “noi” diventa “io” e nel seguito dell'intervista abbandona “io” solo quando tratta gli aspetti formali.

Per quanto riguarda il primo punto, dopo una “asciutta” descrizione dei problemi inerenti alla misura della temperatura, introduce un nuovo criterio per distinguere tra l'approccio macroscopico e quello microscopico: il macro non dice cosa è la temperatura, mentre il micro sì. Questo nuovo criterio la spinge ad esprimere una opinione personale: l'approccio microscopico spiega meglio di quello macroscopico. Questa opinione non è “accidentale”. Alla fine dell'ultima discussione collettiva, quando l'atmosfera era particolarmente amichevole e disinvolta, Sara ha preso spontaneamente la parola per esprimere la stessa opinione:

“Secondo me, l'approccio micro è più vero, perché si devono fare i conti con la struttura della materia e allora, si può capire.....per esempio, con il modello discreto, abbiamo supposto che le particelle del gas si muovano in accordo con le leggi della meccanica e partendo da questo abbiamo potuto ricavare tutto[....] noi però non viviamo in un modello e...[....] e poiché l'approccio macroscopico è ricavato dalla realtà, siamo più interessati ad esso.”

Questo commento ha una particolare rilevanza perché, come si è detto, l'approccio microscopico è più difficile ma “è meglio, anche se più difficile”.

L'analisi ha fatto emergere il punto chiave del discorso di Sara: la spaccatura tra la percezione di che cosa lei è in grado di capire e la sua idea di che cosa invece è importante capire.

Questa spaccatura potrebbe proprio essere l'origine del suo coinvolgimento emotivo e, in questo senso, essere la chiave per spiegare che cosa si è osservato nei dati:

- la sua prima reazione di imbarazzo e di andare indietro per ricordare che cosa era stato fatto in classe;
- la dinamica della prima parte dell'intervista, dove era evidente il bisogno di essere sostenuta e guidata dall'intervistatrice;
- il cambiamento di atteggiamento quando ha ricevuto un feedback positivo da un adulto circa le sue competenze in fisica.

All'ultima domanda della intervista *“Ti è piaciuto, in generale, il percorso?”* Sara risponde:

“Studiare la fisica, almeno dal mio punto di vista è un po' pesante, perché è un insieme di formule, di concetti mentre questo lavoro [...] rende tutto un po' più diverso, più interessante, perché [...] si vede la fisica sotto un altro aspetto; non quello scolastico, rigoroso, ma sotto un aspetto più culturale, nel senso che non ti deve servire soltanto per la scuola, per andare bene, ma ti può servire anche per una tua conoscenza personale, per una tua cultura”.

Sara è ancora divisa tra l'aspetto formale, astratto della fisica, che lei sostiene essere difficile, e la rilevanza culturale della fisica.

La spaccatura tra la percezione delle sue difficoltà e l'idea di che cosa è rilevante per lei la pone in una particolare posizione di tensione emotiva: nonostante le sue difficoltà riconosce nella fisica un potenziale culturale di crescita personale; nonostante la sua percezione del potenziale culturale della fisica, le sue difficoltà le impediscono di avere quella fiducia in se stessa, quella sicurezza che è necessaria per farsi carico, in modo autonomo, del proprio apprendimento.

A causa di questa tensione, la spaccatura sembra giocare, da una parte il ruolo di sostegno rispetto ad un processo di ricerca di un proprio approccio personale e, dall'altra, di ostacolo nell'acquisizione di quella fiducia in se stessa che la possa mettere

in grado di ricostruire la fisica attorno ad una idea chiave personale e nella quale riconoscersi.

In conclusione, l'analisi ha mostrato che Sara è in grado di sviluppare l'argomentazione in modo *coerente, on task* (marcatore B) e *non occasionale* (marcatore D); ha mostrato inoltre che ha una personale e *autentica* sensibilità nel cogliere lo *spessore* culturale della fisica (marcatore C). Tuttavia è presente una barriera emotiva che la ostacola nel processo di appropriazione. Sara ha ancora bisogno di essere condotta e sostenuta nello sviluppare il suo ragionamento, ha bisogno di un adulto che giochi il ruolo di “stampella mentale”, meta-cognitiva ed emotiva.

Si può sostenere che l'appropriazione implica anche un coinvolgimento emotivo e che Sara è ancora nella *zona di sviluppo prossimale*. Per allineare le varie dimensioni dell'apprendimento (concettuale, meta-cognitiva, epistemologica e sociale) e riuscire così a rendere la conoscenza scientifica parte della propria *biografia personale* è necessario anche avere fiducia in se stessi sia rispetto alla disciplina, sia rispetto alle dinamiche di comunità.

5.7. Osservazioni

La pluralità degli approcci che gli studenti hanno scelto nello studio della termodinamica è andata ben oltre le aspettative che si avevano al momento della progettazione dell'intervento didattico.

Ogni processo di appropriazione è intrinsecamente complesso (influenzato da molti fattori correlati tra loro in modo non lineare) e non prevedibile *a-priori* a causa del ruolo cruciale degli eventi contingenti, sia a livello individuale sia collettivo: un processo irreversibile, che può essere ricostruito solo *a-posteriori* e non è prevedibile in tutti i suoi dettagli.

L'imprevedibilità di dettagli contingenti è, dal nostro punto di vista, un punto di forza perché è in accordo con la reale natura dell'appropriazione, che sottolinea il cruciale e insostituibile ruolo che ogni studente è chiamato a giocare nel farsi carico e prendersi

cura del proprio apprendimento, nel nutrire i propri modi idiosincratici di apprendimento, nel cercare le proprie variazioni personali all'interno delle norme e delle regole disciplinari.

Uno sguardo a-posteriori sui marcatori mette in luce come lo spazio dell'appropriazione sia uno spazio multidimensionale in cui è presente la dimensione concettuale (marcatore B), la dimensione metacognitiva/epistemologica (marcatore C), la dimensione personale biografica (marcatori A e D) e quella sociale (marcatore E).

Molto interessante è il caso di Sara che ha messo in evidenza come l'appropriazione non sia uno stato che c'è o non c'è, ma un processo complesso che implica anche un forte coinvolgimento della dimensione emotiva. La ricerca di una posizione personale rispetto alla disciplina richiede che lo studente si confronti con ciò che spesso è percepito come l'"autorità" della fisica e con l'ansia di non essere in grado di soddisfare per se stesso le aspettative che sente nei confronti della disciplina stessa.

Il caso di Federica mostra come l'appropriazione sia qualcosa di molto diverso dalla capacità di risolvere problemi e da ciò che è di solito valutato a scuola. Con le parole di Radford:

“Although knowing how to solve problems in a technical sense may be an important goal, more important, I think, is the range of possibilities that mathematics [and physics, in our case] offers to our students to live in a social, historical, cultural and esthetic experience. But to be truly meaningful, this experience has to occur in the public space of words, deeds and actions.” (Radford 2012)

Il caso di Paolo è stato forse il più difficile da analizzare, proprio perché le diverse dimensioni erano “avvolte” tra loro.

Infine, confrontando Paolo, Lorenzo, Sara e Federica, si può notare come il tempo individuale per realizzare il processo di appropriazione sia diverso: da Paolo che ha da

subito trovato la sua personale strada di apprendimento, a Federica, per la quale il processo non è mai partito, passando attraverso Lorenzo, che è riuscito ad allineare le diverse dimensioni solo alla fine del percorso quando è riuscito a far emergere un discorso globale da elementi discontinui di conoscenza, a Sara, che è ancora dentro al processo.

CAPITOLO 6

Abilità metacognitive

“A Vygotskij va riconosciuto il merito di un’intuizione geniale; aver colto l’importanza dell’acquisizione del linguaggio come modello di ogni apprendimento. E io credo che vi sia giunto grazie alla sua profonda convinzione che il linguaggio e le sue forme di uso – dal racconto, alla fiaba, all’algebra, al calcolo proposizionale – riflettono la nostra storia”

(Bruner, 2003)

Il concetto di appropriazione di un discorso scientifico implica, come è emerso dall’analisi del capitolo precedente, che lo studente sappia prendere in carico il proprio apprendimento partecipando consapevolmente ad un processo individuale all’interno di una comunità di classe. Questo particolare modo di intendere l’apprendimento fa dire che lo studente debba essere in grado di riflettere consapevolmente sui propri stati interni non solo cognitivi, ma anche affettivi ed emotivi interiorizzando e gestendo, nell’interazione con gli altri, specifiche abilità in cui *“la coscienza, armata dei concetti, nonché del linguaggio con cui formarli e trasformarli, gioca un ruolo decisivo.”* (Bruner)⁴⁵

Rifacendosi al pensiero di Vygotskij, ripreso da Rogoff, si può affermare che la comunità, nell’interazione tra gli individui, favorisce lo svilupparsi della *coscienza, armata dei concetti*, che consente di raggiungere livelli mentali più elevati e che diventano uno strumento per tornare indietro sui propri pensieri e rileggerli in una prospettiva più ampia. Ad entrare nel gioco è la mente che riflette su se stessa.

⁴⁵ Bruner interpreta il pensiero di Vygotskij.

Scopo di questo secondo livello di analisi è cercare di riconoscere se ci sono e quali sono le abilità di carattere metacognitivo che gli studenti devono mettere in atto e qual è la relazione, a livello individuale, tra queste e l'appropriazione.

Con il termine meta-cognizione si fa riferimento, fin dalla fine degli anni 70, alla conoscenza che un individuo ha sia del proprio funzionamento cognitivo sia di quello altrui e alla maniera in cui può averne consapevolezza. Più recentemente, poi, con questo termine si è fatto, più specificatamente, riferimento ai meccanismi di regolazione e controllo del processo cognitivo (Brown, 1987) connesso alle attività di risoluzione di situazioni problematiche; meccanismi che consistono principalmente nella capacità di: pianificare procedure ed elaborare strategie; prevedere la soluzione stimando il risultato; testare e rivedere le strategie usate; valutare il risultato di una azione in funzione di un obiettivo; generalizzare le strategie passando da un contesto problematico ad un altro.

Anche in campo educativo il termine meta-cognizione fa riferimento ad abilità di gestione della dimensione prettamente cognitiva cioè alla *conoscenza*, alla *consapevolezza*, e al *controllo* del proprio apprendimento (Gunstone, 1994). Per *conoscenza* si intende conoscenza della natura del processo dell'apprendimento, di quali sono le strategie di apprendimento e quando si usano, delle caratteristiche di apprendimento personale; per *consapevolezza* si intende la percezione degli scopi dell'attività di apprendimento/insegnamento, dei progressi personali attraverso le attività; infine per *controllo* si intende la natura delle decisioni e delle azioni dello studente fatte durante le attività.

In questo capitolo le abilità che si riferiscono alla dimensione meta-cognitiva, che sono state cercate nei dati e sono emerse dall'analisi, non fanno riferimento solo alla dimensione cognitiva ma, proprio per quanto emerso nel capitolo 5, anche a quella emotiva ed affettiva all'interno della comunità classe.

6.1. Analisi dei dati

Per condurre l'analisi si è presa in esame la seconda parte dell'intervista dove sono state poste domande che richiedono riflessioni di carattere meta-disciplinare: *Quali aspetti dei due approcci hai trovato più o meno interessanti? Quali più o meno difficili? Le riflessioni epistemologiche stimulate dal questionario sono state importanti o inutili per comprendere la termodinamica? Perché?*

L'intenzione del gruppo di ricerca, nella fase di progettazione e di stesura della seconda parte del protocollo di intervista, era principalmente quella di far emergere i gusti e gli interessi personali di ciascuno studente, con l'obiettivo di valutare quanto un percorso così articolato potesse essere d'aiuto o di ostacolo.

Tuttavia, i cinque studenti che si sono appropriati del discorso termodinamico hanno dato risposte complesse e articolate e hanno mostrato, già ad una prima superficiale analisi dei dati, competenze metacognitive. Questo ha spinto il gruppo di ricerca ad andare più a fondo nell'analisi per indagare la tipologia di queste abilità e la loro relazione con l'appropriazione.

Da un punto di vista metodologico, in modo analogo a come è stata condotta l'analisi che ha permesso di definire operativamente l'appropriazione (cfr. capitolo 5), ci si è dapprima concentrati sui cinque studenti che hanno mostrato di essersi appropriati in modo evidente del discorso termodinamico e solo in un secondo momento si è spostata l'attenzione sugli altri tre studenti, Paolo, Federica e Sara.

L'obiettivo della prima analisi, condotta sui cinque studenti, era quello di cercare se c'erano e quali erano le loro abilità metacognitive, e poi, in un secondo momento, se c'era e quale era la relazione tra le abilità metacognitive e l'appropriazione.

Questo tipo di analisi ci ha obbligato ad affrontare alcune questioni di natura metodologica:

- cercare se sono presenti dei pattern comuni, degli elementi strutturali comuni che rendano le risposte confrontabili: questo significa cercare ed adottare una lente

- d'osservazione che permetta di non perdere la visione d'insieme: con una metafora, potremmo dire che si tratta di adottare una lente a grand'angolo (una macro-lente);
- analizzare i transcript di ogni studente per mettere alla prova se e come questi elementi strutturali comuni siano effettivamente efficaci per catturare l'essenza dei discorsi dei singoli studenti. Continuando nella metafora, questo significa usare una lente di ingrandimento che permetta di zoomare localmente su singole parti di dati (una micro-lente);
 - aggiustare continuamente il fuoco della lente e passare da analisi locali su singole parti dei dati ad analisi globali su tutto il corpus di dati per vedere come le singole parole e le singole frasi prendano significato da tutta l'intervista, ma anche come l'intervista nella sua globalità dia significato alle singole frasi.

La visione d'insieme (macro-lente) ha permesso di riconoscere che tutti e cinque gli studenti hanno usato, per rispondere alle domande, una meta-strategia simile. Tutti hanno iniziato mettendo in evidenza le loro difficoltà, individuando un *problema cognitivo/epistemologico* e raccontando *la storia* di come lo hanno risolto. La *storia* che ciascuno ha raccontato è una *storia* temporalmente estesa (come dicono gli studenti “*all’inizio*” ... “*poi*” ... “*alla fine*”); non è il racconto di qualcosa che è successo *qui e ora*, bensì la ricostruzione a posteriori di un lungo e faticoso processo.

Da questa prima analisi è poi emerso che la natura del problema si presentava per tutti, in modo più o meno evidente, come un problema che potremmo chiamare di disallineamento: il problema di rendere confrontabili due diversi approcci (quello macroscopico e quello microscopico), o riuscire a collegare due diverse dimensioni: la dimensione epistemologica e quella disciplinare.

Infine, è emerso che la chiave usata da tutti gli studenti per risolvere il disallineamento – allineare i due approcci o le due dimensioni – è stata, in modo significativo, l'idea idiosincratica che, come si è visto nel capitolo 5, ogni studente ha usato come criterio personale per dare significato alle parole e ai concetti termodinamici.

Individuati questi elementi comuni si sono analizzati nel dettaglio i transcript dei singoli studenti per mettere alla prova l'efficacia di tali elementi. Nell'analisi delle risposte dei cinque studenti, riportata di seguito, sarà esemplificato che cosa si intende, da un punto di vista metodologico, con l'espressione "aggiustare il fuoco della lente", passando da analisi locali su singole parti dei dati ad analisi globali su tutto il corpus di dati e viceversa.

6.1.1. Alla ricerca di abilità metacognitive comuni

Michele

“[Il questionario riguardava] due modi per riuscire ad arrivare a dei principi [...]. All'inizio [il questionario] mi è sembrato molto astratto, non avevo capito molto bene i punti chiave, anzi a volte mi sembrava quasi che si contraddicessero.... Invece dopo tutto il percorso che abbiamo fatto e tutte le riflessioni mi si è chiarito molto [...] mi si sono chiariti molto i vari concetti, queste diverse vie per riuscire a formulare i principi.”

La frase di Michele mette in luce la necessità, che sembra essere presente anche negli altri studenti, di esprimere la propria difficoltà cercando di esplicitarne la natura: una difficoltà incontrata all'inizio del percorso e che può essere ricondotta ad un problema di disallineamento.

La frase in sé non dice molto sulla precisa natura della difficoltà incontrata da Michele e su come, durante l'intero percorso, sia riuscito a superarla; ciò nonostante, sembra di poter dire che Michele stesso, quando risponde alla domanda *“Sono state importanti per te le riflessioni del questionario relative alle teorie? Perché?”*, fornisce la chiave che permette di entrare nel suo discorso e comprenderlo.

“È stato molto interessante capire questi due modi per riuscire ad arrivare ai principi, a come si arriva alla realtà, mi è servito, mi è sembrato molto interessante [...]”

È proprio qui che si presenta la questione metodologica messa in evidenza nella premessa di questo paragrafo e che va esplicitamente affrontata: adoperando una lente che fa uno zoom solo sulle singole parole, non si riesce a comprendere quale sia lo specifico problema di Michele, il significato del suo disallineamento, e quale strategia abbia usato per risolverlo. Occorre invece tenere in considerazione, come proprietà intrinseca dei dati, la complessa dinamica tra parole, frasi e storia cognitiva di ciascuno studente: le parole danno senso alle frasi, ma le frasi e l'intera storia personale danno significato ai singoli dati. Questa dinamica circolare costringe a spostare avanti e indietro il fuoco della lente di analisi, da singoli dati all'intera storia che si può ricostruire per ciascuno studente.

In questo caso specifico, l'intera storia di Michele porta a dire che, con quelle precise parole - *“due modi per riuscire ad arrivare ai principi, come si arriva alla realtà”* – Michele stava esplicitando una elaborazione personale, una sua interpretazione alla domanda che gli era stata posta. Egli stava trasformando la distinzione “filosofica” tra Teorie Costruttive e Teorie di Principio in un personale confronto tra *“due modi per arrivare ai principi”*, che diventano per lui due modi per investigare la realtà. Egli infatti commenta *“è stato utile per me”*. Come appunto spiega in un'altra parte dell'intervista, con le Teorie Costruttive (approccio microscopico) si arriva alla realtà *“formulando ipotesi a-priori”*; con le Teoria di Principi (approccio macroscopico) la realtà è la base da cui i *“principi”* possono essere formulati.

Quando Michele è stato in grado di ri-concettualizzare e confrontare *“i due modi per arrivare ai principi”*, considerandoli due modi complementari per *“arrivare alla realtà”*, il suo problema è stato risolto. Ma, se il fuoco della lente rimane su singole parti del transcript, il disallineamento che Michele ha incontrato per passare dai *“principi”* alla *“realtà”* e il modo in cui lo ha risolto possono sembrare tenui e occasionali. Se invece il fuoco si allarga a tutto il corpo di dati, diventa evidente il suo profondo significato: *“dove è la realtà”* è esattamente l'idea attorno alla quale Michele ha organizzato il suo personale approccio alla termodinamica. Michele si riferisce ancora a questa idea e la usa come chiave per interpretare le riflessioni filosofiche e confrontare due posizioni epistemologiche.

In questo senso la sua argomentazione non solo non è occasionale, ma è anche il segnale che sta fornendo una risposta autentica ad una vera domanda.

Caterina

Il problema cognitivo/epistemologico di Caterina è molto diverso: l'approccio microscopico è così affidabile come quello macroscopico? Cosa significa che una teoria è vera?

“All’inizio avevo fatto fatica a capire come una teoria fondata su ipotesi a monte [modello microscopico] potesse essere considerata vera, però dopo aver visto che sia nel macro che nel micro si giunge allo stesso risultato, [questa coincidenza] vuol dire che [la teoria] funziona.” “Una teoria che funziona è quella che riesce ad avere un confronto tra due modi”.

Il problema di Caterina si presentava come una difficoltà a capire come una teoria costruita su ipotesi a-priori e che sembra essere un “*modello perfetto*” possa essere considerata vera e dire qualcosa della realtà.

Il problema è stato risolto perché Caterina ha visto che l'approccio microscopico porta agli stessi risultati dell'approccio macroscopico: due approcci diversi permettono di effettuare un controllo incrociato e stabilire che una teoria, come la termodinamica, “*funziona*”, cioè “*ha senso*”. Tuttavia, allargando il fuoco della lente e zoomando sull'intera intervista, si può sostenere che il criterio “giungere allo stesso risultato” non è l'unico a cui Caterina si riferisce per superare il suo problema epistemologico ed elevare l'approccio microscopico allo stesso “livello di affidabilità” di quello macroscopico. Caterina deve passare attraverso la scoperta del ruolo specifico giocato dai dettagli nell'approccio microscopico che permettono di garantire una coerenza logica interna.

“Una teoria che costruisce un modello perfetto, che segue tutti i passaggi e non si contraddice... bene, quella teoria è vera”

Poi prosegue:

“Però [questa teoria] non è detto che si riferisca alla realtà perché ci sono altri fattori che incidono nella realtà.”

Caterina ha risolto il suo problema quando è stata in grado di confrontare, si potrebbe dire laicamente, i due approcci e riconoscere il ruolo complementare giocato dai dettagli per attribuire verità e realtà ad una teoria che funziona.

“[Nell’approccio micro] *ho trovato interessante fermarsi a pensare come evolve* [il modello];

[...] *Se ti soffermi a pensare a tutti i vari passaggi che sono stati fatti per poter arrivare alla legge finale, bisogna considerare un bel po’ di cose* [...] *Poi appunto nel macro* [ho trovato interessante] *non dare per scontate alcune cose che nella vita comune ... sono dati di fatto.*”

Anche per Caterina l’idea idiosincratica è stata la chiave che le ha permesso di risolvere il suo iniziale problema di disallineamento.

Chiara

Il problema di Chiara è capire il senso del questionario, un senso legato a un linguaggio filosofico/epistemologico non compreso all’interno di un contesto fisico:

“E’ stato molto difficile all’inizio. Non capivo neanche il linguaggio, cos’è “assunzioni su ipotetici costituenti della materia di osservazione” e altre frasi, non capivo che frasi erano.....”

E ancora,

*“All’inizio non avevo capito niente, non capivo il senso, **sottolineavo** ma non capivo. Poi abbiamo fatto il primo incontro e lì le cose mi erano un po’ più chiare, [...]. Ho lasciato alcune cose al tempo aspettando di fare la termodinamica. L’abbiamo studiata [...] rileggendolo dicevo “è chiaro”.*”

Il problema di Chiara, a differenza di quello di Michele e Caterina, è legato a un disallineamento tra la dimensione epistemologica e quella fisica e, secondo la ricostruzione di Chiara, andava risolto studiando la termodinamica, ovvero sviluppando quei contenuti fisici che potessero riempire di significato frasi “filosofiche” che ad una prima lettura non ne avevano.

Invece di rifiutare il questionario come un'attività senza senso o cercare risposte immediate, Chiara, nel suo racconto, dice: *“Ho lasciato alcune cose al tempo aspettando”*. In questo modo Chiara rivela un particolare atteggiamento di fiducia sia verso l'insegnante sia verso se stessa: l'insegnante, nella progettazione dei lavori a breve-medio-lungo termine, avrebbe messo a disposizione le risorse disciplinari necessarie per dare senso alle letture epistemologiche, ma era lei stessa, con pazienza (*“lasciare le cose al tempo”*), che doveva cercare il significato di ciò che sottolineava senza comprenderlo appieno (*“sottolineavo, ma non capivo”*).

Il problema è stato risolto considerando i due diversi approcci alla termodinamica (macroscopico e microscopico) e associando a questi la distinzione epistemologica tra Teorie Costruttive e Teorie di Principi:

“Avevo capito intanto che uno [un tipo di teoria] era micro e l'altro era macro, prima invece no”.

Grazie a questa associazione, continua Chiara:

“Ho capito che “le assunzioni su ipotetici costituenti della materia di osservazione”... ho capito che questo era riferito [all'approccio] micro; invece [ho collegato l'approccio] macro a “determinati empiricamente” e “basate sull'esperienza” ho capito che non ci sono ipotesi a monte che dovevo fare [...]. Poi “proprietà generali dei fenomeni naturali”; ad esempio la T è una proprietà, e da lì ho collegato.

“Collegare” le espressioni filosofiche con proprietà fisiche come la temperatura è stata per Chiara la chiave non solo per riallineare le dimensioni, ma anche per riallinearle in una forma a lei congeniale. Focalizzando l'attenzione sulle parole di Chiara – *“Avevo capito intanto che uno [un tipo di teoria] era micro e l'altro era macro, prima invece no”* – e allargando poi l'inquadratura all'intera intervista, ancora una volta si può riconoscere quanto il modo in cui Chiara ha risolto il suo problema di disallineamento non sia casuale, ma coerente con il modo che maggiormente ha caratterizzato il suo apprendimento della termodinamica: un modo mosso profondamente dal piacere di capire, esplorando diverse prospettive che diventano due “modi diversi di guardare”, due modi che non si escludono a vicenda ma che, in modo complementare, concorrono a costruire conoscenza.

Lorenzo

Lorenzo sembra avere lo stesso tipo di disallineamento tra le diverse dimensioni che aveva Chiara, ma lo risolve con un altro criterio: seleziona di ciascun approccio quei dettagli che gli permettono di arrivare, alla fine, ad una visione unificata e, soprattutto, riconducibile in qualche modo ad una descrizione meccanica del mondo.

Lorenzo infatti dice:

“All’inizio mi sono accorto di aver sbagliato l’approccio con cui ho letto i testi su teoria dei principi e teoria costruttiva, [...] Mi son concentrato su aspetti distanti ...dopo aver fatto tutto questo procedimento, quando sono andato a rileggerlo, [i testi] mi hanno illuminato maggiormente.[...] Sono riuscito a ricollegare...”

Anche le difficoltà di Lorenzo sembrano legate alla sensazione di non cogliere il senso del discorso per mancanza di un riferimento fisico a cui associare i testi di natura epistemologica. Lorenzo esprime tuttavia il suo disagio in termini di incapacità a porre l’attenzione su aspetti importanti che possano essere collegati tra di loro: *“mi sono concentrato su aspetti distanti”*.

L’operazione di “ricollegare” è avvenuta associando le Teorie Costruttive all’approccio microscopico:

“Ho subito associato la termodinamica a livello micro alla Teoria Costruttiva, mi è subito venuto in mente e li ho letti in maniera diversa, e mi è stato subito più chiaro rispetto alla prima volta. Sono riuscito a ricollegare...”

Allargando dunque l’inquadratura all’intera storia di Lorenzo, si può dire che, già durante il percorso, l’approccio microscopico era stato per lui una chiave per “tornare a casa” e ricondurre lo sguardo termodinamico sul mondo – certamente interessante ma più difficile – a quello più familiare della meccanica. Lorenzo aveva più volte insistito sul fatto che in entrambi gli approcci c’erano aspetti che gli erano sembrati interessanti, ma l’immagine del “movimento molecolare” era stata, proprio per la sua esigenza di collegare e “uniformare”, particolarmente importante:

“Quando abbiamo ripreso le leggi della dinamica, l’ho capito subito, mentre magari ho fatto un po’ più difficoltà a capir questo concetto di trasferimento di energia di calore, ci ho messo un po’ ad interiorizzare questi concetti ... ”.

Matteo

Nell’intervista emerge con chiarezza che Matteo, a differenza degli altri studenti non ha trovato il questionario “strano” o disorientante, ma li ha visti piuttosto come un’occasione per esplicitare un suo disagio nei confronti della fisica:

“È stato bello perché comunque porta la gente alla riflessione su cose che magari in certi ambiti non ci pensi... la fisica fatta di formule è una cosa diversa dalla fisica fatta di motivi, di come ci arrivi a queste formule.”

Matteo si è avvicinato al percorso di termodinamica con un suo problema generale di disallineamento con quella particolare visione della “*fisica fatta di formule*”. Il suo disallineamento era dovuto ad una sproporzione tra la facilità con cui era in grado di sviluppare argomentazioni filosofiche e la difficoltà con cui era in grado di gestire formalmente i concetti fisici.

Tale disallineamento lo aveva portato a sentire l’esigenza di trovare una “*fisica fatta di motivi, di come si arriva alle formule*”.

Ancora una volta, allargando l’inquadratura all’intero corpo di dati, la sua frase:

“Porta la gente alla riflessione su cose che magari in certi ambiti non ci pensi”

è interpretabile come: porta i miei compagni – “*la gente*” – a riflettere su questioni epistemologiche/filosofiche – “*riflessione su cose*” – che spesso, soprattutto quando si fa scienza – “*in certi ambiti*” – non sono considerati ma che sono importanti - *non ci pensi* –.

Il processo di Matteo di ri-allineamento della fisica con i suoi interessi filosofici è dovuto però passare anche attraverso un suo rafforzamento sul piano strettamente disciplinare. Matteo ha accettato la sfida di capire la termodinamica, perché il questionario gli aveva aperto anche la possibilità di cercare, e di trovare, un suo modo per dare significato ad una disciplina a lui lontana.

La soddisfazione, “è stato bello”, sta quindi anche a indicare la sua conquistata capacità di allineare, in modo consistente durante l’intero percorso, la dimensione più strettamente disciplinare con quella epistemologica (“il piacere di speculare”).

Nell’intervista, Matteo descrive tale soddisfazione con le seguenti parole che mostrano come abbia conciliato la riflessione epistemologica sulla realtà con i modi tipici della fisica di spiegarla:

“La fisica cerca di trarre dalla realtà la spiegazione che più gli è consona, cioè che crede che più rispecchi la realtà. E quindi questo riflettere sulla realtà e su come la realtà è sviscerata dalla fisica ritengo sia un punto importante.”

6.2. Le abilità metacognitive

Il risultato dell’analisi permette di fornire una risposta alla domanda di ricerca:

Quali abilità metacognitive si possono individuare in quegli studenti che si sono appropriati della termodinamica?.

I cinque studenti analizzati mostrano abilità metacognitive simili che si possono riassumere nei seguenti punti :

1. accettare che l’apprendimento implichi problemi di “*span e allineamento /confrontabilità*” (diSessa, Sherin 1998);
2. accettare la “*manca di chiusura*”, che significa non rifiutare immediatamente un problema, una difficoltà e/o una questione confusa, ma concettualizzare la situazione come un problema che deve essere riconsiderato al momento opportuno (open-ended problem);
3. accettare di “*prendersi cura*” delle proprie difficoltà di apprendimento: cercare e applicare consapevolmente un criterio personale per risolvere il problema di allineamento (allineamento come atto creativo);
4. costruire consapevolmente una narrazione personale con l’obiettivo di rielaborare come è stato risolto il problema di allineamento (Levrini, diSessa 2008).

Avere messo in evidenza queste abilità metacognitive ci porta a dire che gli studenti, incontrando la complessità della fisica, hanno accettato e si sono appropriati anche di

un complesso e impegnativo modo di guardare l'apprendimento: *“l'apprendimento come un processo personale circolare (avanti e indietro) che mette in risonanza la disciplina con la dimensione cognitiva, epistemologica ed emotiva cercando, consapevolmente, l'allineamento tra diverse prospettive, diverse dimensioni, diverse proiezioni dei concetti* (Fantini, Levrini 2012).

Che cosa si può dire degli altri tre studenti? Quali fra le abilità metacognitive che si sono individuate hanno raggiunto? E, in particolare, quali nuove informazioni possiamo avere per comprendere la relazione tra appropriazione e meta-cognizione?

6.3. Relazione tra appropriazione e meta-cognizione

Le risposte di Paolo e Federica alle domande metacognitive dell'intervista sembrano essere molto simili. Entrambi sembrano non avere quelle abilità individuate nei 5 studenti che si sono appropriati della termodinamica e nessuno dei due ha manifestato, durante l'intervista, alcun problema di allineamento tra le diverse prospettive e le diverse dimensioni. Paolo e Federica hanno tuttavia “profili di appropriazione” opposti: Paolo si è appropriato profondamente della fisica (una appropriazione, come abbiamo visto, difficile da riconoscere), mentre Federica è il caso evidente di non appropriazione.

Allargando la lente su tutto il corpo di dati, è evidente che per Paolo la mancanza di un problema di allineamento è una scelta epistemologica precisa e consapevole, collegata alla sua visione della fisica: la conoscenza fisica ha una demarcazione ben precisa rispetto ad altre forme di conoscenza, come ad esempio la filosofia, la fisica è la fisica. *“[Il questionario] è stata una cosa interessante, però sinceramente con la Termodinamica non mi sembra..., non mi è sembrato che avesse tanti risvolti, magari forse più per filosofia.”*

La povertà del suo linguaggio filosofico e metacognitivo può essere attribuito alla sua “naturale”, spontanea e autentica risonanza cognitiva con la fisica.

Diversa è la posizione di Federica. Nell'intervista, alla richiesta di confrontare i due approcci, quello macroscopico e quello microscopico, è stata in grado di usare solo il criterio "facile/difficile", senza riuscire a spiegare cosa significa per lei "facile/difficile" e dando l'impressione di non avere mai considerato e quindi riflettuto su un eventuale problema di disallineamento. Si può forse supporre che Federica non ne abbia sentito la necessità in quanto, allargando la lente su tutta la sua storia, si può ritenere che fosse già gratificata dai buoni risultati ottenuti, durante il percorso, nelle prove di valutazione disciplinare in cui era richiesto di applicare le conoscenze fisiche alla risoluzione di problemi. La povertà del suo linguaggio metacognitivo sembra comunque essere proprio il sintomo della mancanza di appropriazione.

Possiamo ritenere che Paolo e Federica, per motivi molto diversi, non abbiano avuto la necessità di trovare una posizione personale né rispetto alla fisica, né rispetto alla classe.

Diversa è invece la posizione di Sara, la studentessa che, come è emerso dal "profilo di appropriazione", alla fine del percorso era ancora alla ricerca di un suo approccio personale.

Analizzando le risposte si evince che Sara percepisce un problema di disallineamento, ma non è in grado, in modo autonomo e consapevole, di esplicitarne la natura.

" Quando l'ho letto la prima volta [il questionario] l'ho trovato molto complicato e complesso, molte cose mi erano confuse, però adesso riguardandolo mi è stato molto utile, perché comunque analizza l'approccio macro e micro anche da diversi punti di vista ..."

Sara non riesce a dire di più né sul motivo del disagio, né se e come ha cercato di risolverlo. A differenza di Paolo e Federica, inserisce il questionario in un processo "temporalmente esteso" riconoscendone un'utilità *durante* il percorso, ma senza costruire una narrazione personale che espliciti a se stessa e agli altri quale ruolo abbia avuto nel suo processo di apprendimento. È stato necessario l'intervento della intervistatrice che ha cercato di interpretare il suo pensiero.

I: "Quindi è stato il percorso che ha aiutato a capire il questionario, o viceversa il questionario, ti ha dato delle chiavi per capire meglio il percorso? Posso interpretare quello che hai detto in questo senso: nel questionario si mette l'accento su alcuni

aspetti che rappresentano delle chiavi per capire meglio la distinzione tra il macro e il micro...che ci sono, però siccome si fanno tante cose, avere delle letture che mettono l'accento su un aspetto possono aiutare?"

S: *"Sì, nel senso che è molto utile perché ci sono molte affermazioni, ne ho sottolineate un sacco, che possono identificare questi due tipi diversi di approcci..."*

Sara ancora una volta va poco oltre una sorta di *revoicing*: sembra quasi che cerchi di chiarire a se stessa più che rispondere all'intervistatrice, ma quelle poche parole *"ne ho sottolineate un sacco"*, fanno pensare ad una sua ricerca, un suo tentativo di riallineare le diverse dimensioni *"analizzando l'approccio macro e micro da diversi punti di vista"*.

Occorre però, ancora una volta, allargare la lente su tutto il corpo dei dati e tenere presente l'aspetto emotivo: il timore di Sara, emerso più volte durante l'intervista, verso l'aspetto formale e matematico – soprattutto verso l'approccio micro ritenuto da lei formalmente più difficile, ma più importante per capire. Si può forse pensare che Sara abbia cercato di "tenere sotto controllo" e "dare significato" alla dimensione formale attraverso quella epistemologica.

"Studiare la fisica, almeno dal mio punto di vista, è un po' pesante, perché è un insieme di formule, di concetti mentre facendo anche questo lavoro [le discussioni sul questionario] rende tutto un po' diverso, più interessante [...]"

Il disallineamento sembra essere non tanto tra le diverse dimensioni cognitive e/o epistemologiche, quanto piuttosto tra quella emotiva – più difficile da accettare e riconoscere – e quella cognitiva, tra la percezione che Sara ha su che cosa lei è "in grado di capire" e la sua idea di che cosa invece è importante capire.

Sara sembra essere in grado di accettare che l'apprendimento implichi problemi di *"span e allineamento/confrontabilità"*, sembra essere in grado di accettare la *"mancanza di chiusura"* così come di *"prendersi cura"* delle proprie difficoltà di apprendimento; tuttavia non riesce ancora a trovare e applicare consapevolmente un *suo* criterio per risolvere le difficoltà e non riesce pertanto a costruire una narrazione personale del suo processo di apprendimento. Si può ragionevolmente dire che Sara, "in

cammino” nel suo processo di appropriazione, lo è anche nella maturazione di abilità metacognitive.

6.4. Conclusioni

Si potrebbe concludere che le abilità metacognitive che si sono individuate non sembrano essere necessarie per una appropriazione anche profonda della fisica: Paolo infatti non le ha.

Tuttavia si può sostenere che *quelle* abilità metacognitive sono fondamentali a *quel* particolare processo di appropriazione che, in una visione transdisciplinare più complessa in cui si intrecciano diverse dimensioni culturali, implica la ricerca di una propria posizione personale rispetto alla conoscenza fisica.

Quel processo di appropriazione a medio e lungo termine, inoltre, coinvolge non solo diverse dimensioni culturali ma anche quelle affettive ed emotive; per intrecciare tutte queste dimensioni sono necessarie *quelle* abilità metacognitive in particolare la capacità di sapere aspettare e la fiducia nella possibilità di trovare con le proprie risorse soluzioni personali a problemi veri di conoscenza.

Si può inoltre ragionevolmente sostenere che *quelle* abilità non sono causalmente precedenti al processo di appropriazione, ma piuttosto si sviluppano e si rafforzano, in una relazione circolare, contestualmente al processo di appropriazione man mano che si acquista padronanza e consapevolezza delle diverse dimensioni.

CAPITOLO 7

L'orchestrazione dell'insegnante

Il processo di appropriazione è certamente un processo personale, strettamente legato alla dimensione individuale ma, come già dicevano anche Vygotskij, Bakhtin, Rogoff e Sfard, è un processo che non può che avvenire in una interazione dialogica tra persone, all'interno di una comunità sociale, e che quindi è in stretta relazione con la dimensione collettiva della comunità.

In questo capitolo, l'attenzione si sposta pertanto ad indagare le dinamiche di classe e l'interazione tra dimensione collettiva e dimensione individuale, per cercare di comprendere se e come le strategie di orchestrazione dell'insegnante possono favorire e sostenere il processo di appropriazione.

In tutta la sperimentazione del percorso, la modalità di interazione e mediazione con la classe si è articolata in un gioco tra vincoli e libertà di espressione, tra richieste di essere capaci di stare all'interno dei vincoli disciplinari e proposte di esprimere liberamente la propria posizione. Le lezioni si sono generalmente articolate alternando richieste di ripensare ed esprimere concetti e legami tra concetti già trattati in lezioni precedenti e proposte di apertura e introduzione di nuovi concetti o dimensioni diverse rispetto a quella disciplinare (ad esempio quella epistemologica). Nel primo caso è l'insegnante a condurre il ragionamento, il ritmo degli interventi è serrato e gli studenti devono rispondere alle domande sapendo che la risposta è giusta o sbagliata: devono stare strettamente dentro i vincoli della disciplina. Per usare una metafora, "l'insegnante tira la corda". Nel secondo caso il ritmo è più lento, gli studenti possono esprimersi più liberamente, sono loro a condurre il ragionamento, il giudizio dell'insegnante è sospeso. Per usare una metafora "l'insegnante lascia andare la corda".

La metafora "tirare la corda e lasciarla" l'ho usata spesso, nel gruppo di ricerca, quando mi si chiedeva come avrei descritto il mio modo di stare in classe e di gestire le

dinamiche collettive. Il problema del tempo collettivo e del suo raccordo coi tempi individuali degli studenti è un aspetto dell'insegnamento che ho sempre percepito come fondamentale e che curavo in modo particolare, anche se lo facevo essenzialmente ad intuito. A partire da questa mia sensazione si è deciso, nel gruppo di ricerca, di condurre un'analisi specifica finalizzata ad esplorare il significato di questa metafora e a capire se e come, nella pratica di classe, la mettevo effettivamente in atto. A questo scopo, sono state scelte due lezioni (lezione A e lezione B) molto diverse tra loro. La lezione A è stata scelta come emblematica della prima modalità di interazione, la lezione B della seconda.

Lavorando sulle registrazioni e sui transcript di queste lezioni, è stata prima di tutto analizzata la dimensione collettiva. L'attenzione è stata rivolta all'intera classe e, confrontando le due lezioni, si è analizzata la loro struttura generale – ad esempio tempi, ritmi, modalità di interazione (studente-studente o studente-insegnante) – per poi considerare i contenuti degli interventi di specifici studenti.

Una volta costruita una descrizione delle dinamiche collettive, si è passati ad analizzare se e come le modalità di interazione con la classe potevano essere considerate un fattore rilevante per innescare e/o sostenere i processi individuali di appropriazione. Per studiare l'impatto sulla dimensione individuale, sono stati scelti 3 studenti e, di questi, sono state analizzate l'interazione sia con l'insegnante sia con i compagni. Sono stati, in particolare, analizzati singoli estratti di transcript delle due lezioni e si è poi allargata l'analisi a tutta la storia dello studente così da situare i momenti selezionati di interazione dentro una storia più ampia, una storia personale ma anche una storia di classe.

I numerosi incontri e le proficue discussioni all'interno del gruppo di ricerca durante l'analisi dei dati mi hanno obbligato ad esplicitare le scelte, a volte implicite, da me effettuate, sia durante la progettazione delle lezioni, sia durante la conduzione nell'interazione con gli studenti con i quali, essendo insegnante della classe già da tre anni, avevo una relazione consolidata (sia a livello individuale – i singoli studenti – sia a livello collettivo – il gruppo classe nella sua interezza). Queste mie scelte, intenzioni,

consapevolezze sono state messe in comune con il gruppo di ricerca e sono diventate a tutti gli effetti parte del corpus di dati.

7.1. Le lezioni

La lezione A è stata una lezione di sintesi, svolta alla fine del percorso con lo scopo di ripercorrere il significato del secondo principio della termodinamica e del concetto di entropia così come erano emersi durante le lezioni precedenti. La lezione, però, non ha avuto solo l'obiettivo di consolidare concetti disciplinari riconosciuti particolarmente ostici per gli studenti, come il concetto di entropia, ma anche, e direi forse soprattutto, quello di condividere all'interno della comunità classe una costruzione di conoscenza disciplinare ben precisa.

L'obiettivo era quello di fare emergere, dalla voce stessa degli studenti, che il secondo principio e il concetto di entropia hanno preso significato proprio grazie al rispetto dei vincoli disciplinari, ma si inquadrano all'interno di un discorso più ampio che non può fermarsi alla semplice analisi e applicazione di una formula o di un enunciato. Si è voluto, in altre parole, che la classe condividesse l'idea che i concetti fisici prendono significato se inseriti all'interno di un discorso disciplinare che si articola su diversi piani (contenuto e meta-contenuto). Per questo si è sviluppato ad esempio il discorso della modellizzazione che, per una scelta esplicita, ha considerato separati, ma complementari, l'approccio macroscopico e l'approccio microscopico.

L'obiettivo di questa lezione richiedeva la ricostruzione completa del percorso svolto sul secondo principio, ma questa ricostruzione non poteva essere spezzata in due incontri, in quanto il tempo intercorso tra un incontro e l'altro (nel calendario scolastico qualche giorno) avrebbe fatto perdere continuità ed efficacia al discorso stesso. Il tempo a disposizione è stato quindi quello di una lezione-scuola (60 minuti) indubbiamente stretto e limitato e che imponeva un ritmo incalzante agli interventi; la scelta di svolgere la lezione nei 60 minuti a disposizione si è tuttavia rivelata a posteriori produttiva: la tensione conoscitiva è rimasta alta per tutto il tempo, così come l'attenzione e la

concentrazione necessarie per rispondere, in un tempo ridotto, a precise domande che gli studenti non sapevano a chi sarebbero state rivolte.

Va inoltre sottolineato che gli studenti erano a conoscenza, dalla condivisione di precise norme di classe, del fatto che era richiesto a ciascuno di loro di contribuire, con il proprio intervento orchestrato dall'insegnante, alla costruzione di un discorso collettivo e condiviso: un discorso in cui non c'era posto per posizioni personali, ma in cui ciascuno poteva giocare un ruolo importante sia rispetto alla disciplina, sia rispetto alla classe.

L'insegnante ha incominciato la lezione andando subito al punto.

“Vediamo un po' di riprendere il discorso, parlate voi, cercate di farmi capire che cosa abbiamo appreso, da tutto il percorso, sul secondo principio. Chiara, dal punto di vista macro, [...]?”

L'uso dei verbi (*parlate voi / cercate di farmi capire/ cosa abbiamo appreso*) sottolinea il fatto che i protagonisti sono sì gli studenti ma la dinamica di interazione, nel gioco del capire e ricostruire il percorso disciplinare in tutte le sue diverse dimensioni, è tra loro e l'insegnante: devono rendere conto delle loro risposte prima di tutto all'insegnante.

Completamente diverso era l'obiettivo della lezione B, in cui si è voluto avviare una riflessione aperta e una discussione sulle interpretazioni personali degli studenti relativamente ai testi di carattere epistemologico che erano stati loro proposti nel questionario iniziale (testi relativi alla distinzione metodologica tra approccio macroscopico e approccio microscopico, compreso il testo di Einstein sulla distinzione tra Teorie Costruttive e Teorie di Principi). In questa lezione gli studenti erano chiamati ad esprimere loro posizioni personali ed erano consapevoli che non ci sarebbe stata valutazione in termini di voto. L'incontro è iniziato con le seguenti parole dell'insegnante che mostrano come l'obiettivo e le modalità della lezione siano stati subito resi espliciti.

“Riprendiamo la discussione che avevamo fatto all’inizio del percorso sul questionario, alla luce di tutto il percorso e quindi speriamo con ulteriori riflessioni rispetto a quelle iniziali. Alla lavagna abbiamo scritto delle domande: Quali punti/frasi/aspetti oggi sottolineeresti maggiormente? Quali frasi/termini oggi ti sembrano più chiari? Cambieresti qualcosa delle considerazioni scritte allora?”

“Oggi” significa dopo aver fatto il percorso, dopo aver riflettuto sull’approccio macro e su quello micro alla TD. Quello che vi si chiede è che voi esprimiate il vostro punto di vista in modo sereno, tranquillo, ma che vi esprimiate e parliate; cercate di fare questo sforzo [...], serve a voi per aiutarvi a ragionare sul vostro pensiero, è importante per voi. Chi vuole può incominciare e poi vediamo che piega prende il dibattito.”

7.2. Analisi della dimensione collettiva

Osservando la Tabella 3 si può constatare, come si è detto, che nella lezione A, lezione di sintesi, si ricostruisce il significato della seconda legge della termodinamica,⁴⁶ mentre nella lezione B si avvia una riflessione basata sulle interpretazioni degli studenti relative ai testi di carattere epistemologico che erano stati loro proposti. Molto diversa è pertanto la natura delle domande: nella lezione A le domande sono di natura strettamente disciplinare e ammettono una risposta giusta o sbagliata; nella lezione B sono di natura epistemologica e interpretativa, non vi sono risposte giuste o sbagliate.

Osservando la mappa⁴⁷ della lezione A (Mappa1), si può affermare che è sempre l’insegnante a guidare la lezione, non vi sono momenti di silenzio, le risposte sono rapide, il ritmo serrato in una dinamica di interazione insegnante – singolo studente. Incrociando poi la lettura della mappa 1 con quello della tabella 3 è evidente che è

⁴⁶ Nella tabella sono riportati gli argomenti di discussione. Per la lezione A sono riportate solo le domande relative alla prima parte della lezione, in cui si è ricostruito il significato della seconda legge seguendo l’approccio macroscopico.

⁴⁷ Dal transcript delle lezioni si sono quantificati i tempi dei singoli interventi (ogni intervento viene indicato come un turno con un precisa durata temporale) e si sono costruite, con un foglio elettronico, delle mappe (la mappa della lezione B è stata divisa in quattro figure, una per ogni fase in cui è stata suddivisa la lezione). Ogni mappa riporta in verticale i singoli studenti (i nomi sono stati esplicitati solo per gli otto studenti oggetto di analisi) e in orizzontale il tempo (l’unità di tempo è 2 secondi). Dalle mappe si può “vedere” la struttura delle lezioni: chi interviene, qual è il ritmo degli interventi, quali e quanti i tempi di silenzio

l'insegnante a stabilire chi deve intervenire, a determinare il flusso delle risposte e il contenuto della discussione chiedendo, ad uno specifico studente, di sviluppare una precisa parte del percorso concettuale.

La rapidità delle risposte, la mancanza di momenti di silenzio, il ritmo serrato sono senz'altro indici del fatto che gli studenti non solo stanno seguendo la ricostruzione disciplinare e sono in grado di partecipare, ma anche hanno capito che questo tipo di interazione richiede risposte precise e mirate. Si osservano dalla mappa anche alcuni cambiamenti di ritmo che dipendono dal tipo di studente chiamato a rispondere.

La modalità dell'interazione si può spesso ricondurre alla modalità del *revoicing* (O'Connor, Michaels, 1996) con la quale l'insegnante, dando voce al contributo di uno studente, può legittimarlo e riposizionarlo sia rispetto alla classe sia rispetto alla disciplina. Con il *revoicing* si può riformulare un ragionamento senza aggiungere contenuto oppure farlo espandere, ripetere in modo più succinto o più completo, cambiare registro comunicativo e girare all'intera classe ciò che spesso è rivolto all'insegnante.

Un esempio è il seguente scambio di battute, 11 turni per una durata di circa un minuto e mezzo.

I: *“Giovanni, che cosa intendiamo per trasformazione reversibile?”*

G: *“È una trasformazione.... ideale”*

I: *“Bravo, ideale perché è una... (si sente brusio e a voce bassa “una costruzione”) non sento...”*

G: *“È una costruzione mentale”*

I: *“È una costruzione mentale, cioè nel senso che è il fisico che si inventa, tra virgolette, queste trasformazioni per poterle studiare, come diceva il Prof. Zanarini, non ci sono nella realtà trasformazioni reversibili... una trasformazione ideale quindi è...”*

G: *“Quasi-statica e non dissipativa”*

I: *“Bravo, quasi statica e non dissipativa, cosa vuol dire quasi-statica?”*

G: *“Che è molto lenta, è un processo molto lento.....”*

I: *“Un processo molto lento cioè... se io passo nella trasformazione attraverso...”*

G: (si sente molto piano) *“Stati di equilibrio.”*

I: *“Parla forte..”*

G: *“Attraverso vari stati di equilibrio”*

I: *“Che passa attraverso vari stati di equilibrio quindi è una trasformazione ideale, bene. Il fatto che il rendimento sia minore di 1 in un ciclo reversibile, reversibile Paolo, in un ciclo reversibile, in una macchina termica reversibile, il rendimento minore di 1, dà indicazioni su che cosa?”*

La lezione B può essere pensata, in base all'argomento di discussione e alla tipologia delle domande, divisa in quattro fasi (nella tabella 3 sono indicati i tempi e i turni di ogni fase).

Osservando la mappa – divisa in quattro figure, una per ciascuna fase – si vede come le quattro fasi abbiano diversi tempi e diversi ritmi di intervento, sia dell'insegnante, sia degli studenti, con diverse modalità di interazione caratterizzate da:

- numerosi momenti di silenzio (fase 1);
- brevi tentativi di intervento (fase 2);
- silenzio (fase 3);
- forte interazione tra gli studenti (fase 4).

Questa dinamica collettiva è strettamente legata agli argomenti di discussione, ma anche alla qualità delle risposte attese.

Nella fase 1 gli studenti sono chiamati a ripensare alle loro riflessioni epistemologiche, a esplicitarle e condividerle, a mettere sul tavolo i loro pensieri; compito dell'insegnante è quello di incoraggiare e sostenere i singoli studenti nell'argomentare il proprio punto di vista. In questa fase, i singoli studenti hanno mostrato una certa timidezza ed esitazione nel rompere il ghiaccio: sapevano che potevano esprimersi liberamente, ma erano anche consapevoli della necessità di dare alla loro argomentazione una coerenza interna.

Nella fase 2, gli studenti sono chiamati a risolvere un problema epistemologico di incoerenza: molti di loro avevano pensato alla Teoria della Relatività come ad una

Teoria Costruttiva, mentre per Einstein è una Teoria di Principi. Ma l'obiettivo dell'insegnante non era quello di stabilire la risposta giusta o sbagliata, quanto piuttosto quello di aiutarli ad argomentare la loro posizione iniziale o un loro eventuale cambiamento di punto di vista.

“[...]Einstein [...] mette la Relatività tra le Teorie di Principi... molti di voi l'avevano messa tra le Teoria Costruttive. Ora, voglio dire.... non stiamo dicendo giusto o sbagliato, stiamo chiedendo, siete ancora di questa idea? [...]”

Dalla mappa si può osservare una precisa struttura: brevi tentativi di intervento fino a Chiara che, come si vedrà in seguito, ha acceso la discussione su come distinguere una Teoria Costruttiva da una Teoria di Principi facendo riferimento anche all'approccio macroscopico e a quello microscopico della termodinamica. Ma l'insegnante obbliga ad andare ancora più a fondo nel ragionamento e a prendere maggiore coscienza di un problema di coerenza interna del discorso (circa a metà della fase 2).

“Voi avete detto che la Termodinamica microscopica la vedete come Teoria Costruttiva, perché si fanno delle ipotesi su come è la materia, il gas come un insieme di particelle puntiformi, ecc. no? Quindi ci rifacciamo alle leggi della dinamica, della meccanica e facciamo delle ipotesi a monte su questi costituenti dei gas. Einstein mette tra le Teorie Costruttive anche la meccanica classica (breve pausa) Come mai? (breve pausa) Allora non so se mi sono spiegata, se avete capito cosa voglio dire ...”

Nella fase 3 è stato chiesto agli studenti di entrare ancora più profondamente in questioni di carattere epistemologico, per fare maggiore chiarezza sul problema sollevato nella fase 2.

“La parola modello, facendo questo percorso, si è illuminata in qualche modo? Ha acquistato nuovi significati oppure non è successo niente nella vostra riflessione su questo punto?”

Ma, così come è stata posta, la domanda ha suscitato imbarazzo e silenzio.

Nella fase 4, l'insegnante aiuta a ritrovare la coerenza portando il discorso su un terreno più vicino agli studenti.

“C'è stata una discussione molto interessante, secondo me, all'inizio, che vi vedeva in diverse posizioni rispetto a quale tipo di teoria [...] arrivava più vicino al vero, al reale. Mi sembra che su questo punto ci fossero [...] tra di voi diverse prospettive tra una teoria costruttiva e una teoria di principi, quale delle due tipologie riesce... è più vera, è più vicina al reale. Dopo aver fatto questo percorso avete cambiato la vostra posizione su questo punto? C'è un approccio che vi sembra più vero dell'altro, più profondo?”

In questa fase gli studenti erano chiamati a difendere e argomentare punti di vista personali e l'interazione tra studente-studente è stata serrata. Questo è stato volutamente orchestrato dall'insegnante e dalla ricercatrice O. Levrini presente alla lezione, perché sapevano della differente posizione epistemologica tra gli studenti (ad es. tra Matteo e Michele).

7.3. Analisi della dimensione individuale

Per analizzare la dimensione individuale dell'interazione all'interno della comunità classe, l'attenzione è rivolta a tre studenti: Chiara, Matteo e Sara.

Chiara e Matteo, come si è messo in evidenza nei capitoli precedenti, anche se in modo diverso perché diverso è il loro rapporto con la disciplina e il ruolo giocato all'interno della classe, sono due casi di appropriazione.

Chiara è una studentessa curiosa e interessata, alla quale piacciono le diverse discipline proprio per la pluralità delle prospettive che offrono; in particolare, ama la sfida intellettuale, ama scoprire cosa caratterizza il punto di vista di ciascuna disciplina e come contribuiscono a gestire la complessità del mondo. Chiara è riuscita ad appropriarsi del discorso termodinamico in quanto è riuscita a guardare lo stesso

concetto fisico da diverse prospettive – quella macroscopica e quella microscopica – trovando il modo per compararle e allinearle. Chiara inoltre non ha difficoltà a padroneggiare gli aspetti formali della fisica, è riconosciuta dai compagni di classe come una “pensatrice generosa” e profonda e il suo parere è tenuto in seria considerazione. Proprio per questa sua capacità di riconoscere differenze e similarità, nelle attività di classe le è spesso riconosciuto il ruolo di chi è in grado di mediare e/o allineare i diversi punti di vista.

Matteo è riuscito, per dirlo con Bakhtin, a “popolare le parole” – parole fisiche a lui in generale ostiche – di significati, gusti e intenzioni personali, grazie ad suo specifico interesse per la filosofia. In particolare, la distinzione filosofica tra “essere e divenire” lo ha aiutato non solo a riconoscere che cosa gli è piaciuto di più della termodinamica (la freccia del tempo), ma anche a entrare nel significato dei concetti. Va sottolineato che Matteo, guardando l’intero curricolo di fisica e tutta la sua storia, ha sempre cercato di fuggire dagli aspetti più tecnici e formali e, in particolare, non gli è mai piaciuto risolvere problemi, soprattutto quando erano richieste competenze matematiche di livello più elevato. Matteo quindi non rappresentava per la classe un riferimento disciplinare, anche se gli era riconosciuta una posizione intellettuale proprio per la sua abilità nel padroneggiare argomenti filosofici e la sua disponibilità a cercare confronti con altri studenti i cui interessi erano più legati agli aspetti tecnici e applicativi della fisica. Per l’insegnante, Matteo era uno studente che andava tenuto costantemente “sull’argomento”.

Sara invece alla fine del percorso era ancora in cammino per l’appropriazione. Durante tutto il curricolo di fisica, ha sempre mostrato di essere una studentessa interessata e ha sempre lavorato duramente per dare il meglio di sé sia nelle prove scritte che orali, ottenendo risultati discreti. Tuttavia Sara ha proiettato sui risultati scolastici alte aspettative culturali, con un forte coinvolgimento emotivo che spesso l’hanno ostacolata nel giocare liberamente con le proprie idee. Durante le attività di classe è stata sempre in una posizione di secondo piano, dalla quale però ha seguito attentamente, disponibile a dare il suo contributo se richiesto dall’insegnante; raramente ha preso parte alle attività di classe in modo autonomo.

Al termine del percorso di termodinamica Sara aveva ancora bisogno di un sostegno emotivo e culturale, ma ha mostrato un evidente progresso nel riconoscere ed esprimere il suo disagio in relazione alle sue aspettative.

Lezione A

Chiara è la prima studentessa coinvolta, e questo non è un caso. L'insegnante vuol fare comprendere quale deve essere il tipo di interazione tra lei e la classe, una interazione all'interno dei vincoli disciplinari, strettamente legata all'obiettivo della lezione. Per questo chiama subito Chiara, convinta che possa seguirla in un ragionamento stretto, senza troppe difficoltà sia dal punto di vista disciplinare sia emotivo; Chiara può essere una buona spalla per l'insegnante e un buono specchio per la classe. A Chiara viene chiesto l'enunciato e il significato, da un punto di vista macroscopico, del secondo principio.

C: *“Non è possibile in un ciclo avere come unico risultato che l'energia interna introdotta in modalità calore venga completamente trasformata in modalità lavoro. Quindi.. cioè.. appunto...”*

appunto questo è un principio al negativo, questa disuguaglianza che c'è. Prima avevamo visto delle uguaglianze nei principi, per la prima volta vediamo che c'è una disuguaglianza. E appunto cioè avevamo un discorso legato a Maxwell e Boltzmann e..“

I: *“Calma. ok c'è una disuguaglianza, quindi abbiamo detto... pausa di pochi secondi... tu hai definito il 2° principio in questo modo e noi lo abbiamo trattato con un approccio macroscopico. Cosa significa che abbiamo trattato il 2° principio della termodinamica con un approccio macroscopico?”*

Questo primo scambio di battute dura pochi secondi ma è significativo per comprendere la dinamica dell'interazione. Chiara, che non ha ancora ben capito quanto può divagare nel ragionamento, vuol fare vedere che ha studiato, cerca di andare avanti portando il discorso verso l'approccio microscopico, e dopo l'enunciato del secondo principio continua introducendo Maxwell e Boltzmann. L'insegnante la riporta al punto, la ferma, ma al tempo stesso la sostiene (“ ok”): Chiara ha enunciato bene il secondo principio,

ma adesso deve continuare nel ragionamento così come richiesto, senza dimenticare che è rivolto all'intera comunità classe – come si nota, nella voce dell'insegnante, dall'uso dei verbi: la persona passa dal tu (tu lo hai enunciato) al noi (noi lo abbiamo trattato) –; la pausa di qualche secondo inoltre è un modo per dare il tempo a Chiara di ritornare alla richiesta (dare significato al secondo principio da un punto di vista macroscopico) e riprendere il ragionamento.

Chiara capisce subito e continua passando ad una dimensione meta-disciplinare

C: *“Cioè che comunque abbiamo trattato i fenomeni, cioè una teoria di principi, cioè attraverso i fenomeni quello che vediamo, non ci soffermiamo sull'aspetto micro, sulle particelle, sulla struttura della materia.”*

Le ultime parole (*sulla struttura della materia*) sono ripetute dall'insegnante quasi sovrapponendosi alla voce di Chiara in un *revoicing* che permette di far comprendere a Chiara che si è riposizionata rispetto al ragionamento (alla disciplina) ma anche per quanto riguarda la sua credibilità rispetto alla classe.

Ora è l'insegnante che, facendo riferimento ad una lezione precedente⁴⁸, si sposta verso l'approccio microscopico e sulla “necessità” del fisico di passare dall'aspetto macroscopico a quello microscopico. Subito Chiara riprende:

C: *“Perché per spiegare, per capire proprio cosa ci sia sotto c'è questa necessità di usare la meccanica, come mai serve.. si usa la meccanica per capire quello che c'è dietro.”*

I: *“Diciamo la necessità di interpretare (la voce viene calcata sulla parola interpretare) questa legge”*

C: (quasi si sovrappone) *“Sì, di interpretare”*

I: *“Di dare un'interpretazione ad una legge che abbiamo visto (leggera pausa) una legge fenomenologica (calcando la voce)”*.

⁴⁸ Lezione tenuta per la classe dal Prof. Gianni Zanarini dell'Università di Bologna sulla figura e sull'opera scientifica di Ludwig Boltzmann.

C: “Sì”

Questa sequenza di battute è, dal punto di vista dell'interazione individuale, ma anche collettiva, interessante. L'insegnante e Chiara fanno a vicenda un *revoicing*: Chiara dicendo “sì” per due volte dà credito alle parole dell'insegnante rafforzando la sua posizione anche rispetto alla classe; l'insegnante interviene non per correggere o riposizionare Chiara, ma per rafforzare certe sue affermazioni e al tempo stesso espandere il ragionamento.

C'è ancora qualche scambio di battute, poi la domanda viene rivolta a Matteo chiedendo l'enunciato del secondo principio secondo Clausius. Matteo ha, come si è detto, una posizione molto diversa da Chiara, sia rispetto alla disciplina, sia rispetto alla classe.

Lo scambio di battute tra Matteo e l'insegnante dura poco (circa un minuto), ma è molto serrato.

Matteo incomincia con voce sicura.

“Ci sono due termostati uno caldo ed uno freddo e non è possibile che ci sia un trasferimento di calore dal termostato freddo al termostato caldo senza ...”

Ma alla prima incertezza (pausa della voce di qualche secondo) l'insegnante interviene subito e inizia con Matteo una sorta di *revoicing* con il duplice obiettivo di puntualizzare ciò che dice Matteo dal punto di vista disciplinare, ma anche farlo andare avanti; in questo modo Matteo viene gradualmente posizionato.

I: *“E questo sia l'unico risultato no?”*

M: “Sì”

I: *“E quindi c'è un verso privilegiato”*

M: “Sì”

I: *“C'è un verso privilegiato. Bene... Matteo... Matteo... , quando abbiamo parlato con un approccio macroscopico del secondo principio alla Kelvin....”*

Il ritmo della voce dell'insegnante è rallentato, il ragionamento con Matteo è arrivato ad un punto fermo ma ora il discorso sta per essere aperto.

M: “Sì”

I: *“Cioè il primo enunciato che ha detto Chiara”*

M: *“Certo”*

I: [ripete l'enunciato alla Kelvin senza finire, tanto per ricordare] *“Abbiamo visto che da qui derivano le macchine termiche e che il rendimento...”*

L'insegnante sospende la voce e Matteo, che è ben posizionato, continua subito al posto suo

M: *“Che il rendimento di un ciclo non può essere maggiore di 1, ma... però.. questo anche in un ciclo ideale”*

I: *“Bravo, non può essere... in un ciclo ideale, consideriamo un ciclo ideale reversibile alla Carnot ... “*

Matteo è sostenuto e incoraggiato (l'insegnante gli dice bravo), ma al tempo stesso gli è richiesto di prendere consapevolezza che la sua risposta non è del tutto precisa

M: *“Deve per forza essere minore di 1”*

I: *“Ecco, minore di 1, non maggiore ma neanche uguale”*

M: *“Sì, si neanche uguale”*

I: *“Se fosse uguale.... dettami a cosa è uguale il rendimento...”*

Matteo che è entrato nel ragionamento è in grado di sostenere l'aspetto più formale del discorso e spiega in modo sicuro e corretto i termini della formula mostrando anche di essere in grado, dalla lettura di una formula matematica, di riconoscere quanto prima era stato puntualizzato, cioè che il rendimento non può essere uguale a 1.

M: *“Il rendimento è lavoro fratto il calore assorbito...”*

I: *“Bravo, il lavoro a che cosa è uguale in termini di calore...”*

M: *“Il calore assorbito meno calore ceduto...”*

L'insegnante scrive alla lavagna, sotto dettatura, la formula

$$\eta = \frac{L}{Q_{ass}} = \frac{Q_{ass} - Q_{ced}}{Q_{ass}}$$

I: *“Se il rendimento fosse 1, quale di questi termini sarebbe zero?”*

M: *“Il calore ceduto...”*

I: *“Il calore ceduto, e questo(voce sospesa)”*

M: *“E questo non è possibile”*

Diversa è l'interazione con Sara, che viene chiamata a rispondere dopo circa 10 minuti dall'inizio della lezione quando, dopo avere messo in evidenza la diversa "qualità" tra calore e lavoro, viene introdotto il concetto di entropia.

Sara è chiamata a rispondere sull'entropia perché durante le lezioni precedenti era emerso che questo era per lei un concetto particolarmente ostico e aveva lei stessa chiesto all'insegnante, in una relazione personale, delle spiegazioni fuori del contesto classe. Fare domande proprio sull'entropia poteva essere emotivamente caricato, da parte di Sara, di un doppio e contraddittorio significato: da una parte continuare un discorso già avviato in una relazione comunicativa personale e privilegiata con l'insegnante, dall'altra essere sottoposta a una sorta di verifica per vedere se proprio quei concetti erano stati da lei compresi.

Tuttavia, come si potrà dedurre dallo scambio di battute, ancora una volta in una sorta di *revoicing*, l'obiettivo dell'insegnante era quello di ri-puntualizzare il concetto da un punto di vista disciplinare, sia per l'intera classe sia per Sara, ma soprattutto di guidare Sara nel ragionamento, fornirle una stampella intellettuale, di cui Sara ha bisogno, per portarla a costruire un discorso completo; solo alla fine, quando Sara, in questo ritmo serrato, avrà la consapevolezza di avere sviluppato un ragionamento coerente, verrà gratificata e la sua posizione rinforzata.

La domanda è diretta:

I: *"In un sistema isolato in cui si hanno cicli reversibili, cosa succede alla grandezza entropia, Sara?"*

S: *"L'entropia dell'universo è uguale a zero"*

I: *"Dillo bene, non l'entropia dell'universo la... (voce sospesa)"*

S: *"La variazione dell'entropia dell'universo è uguale a zero"*

I: *"La variazione dell'entropia dell'universo è uguale a zero, quindi in questo caso la grandezza entropia ci dice..."*

S: *"La quantità dell'irreversibile, cioè..."*

Alla pausa di Sara l'insegnante interviene subito

I: *“In che senso? Siamo in processi reversibili, quindi il fatto che la variazione di entropia dell’universo sia uguale a zero, (si sente anche la voce di Sara che ripete “vuol dire..”), vuol dire che “uno dà e l’altro prende”. OK. E quindi l’entropia come grandezza che è stata introdotta l’entropia è una...?”*

S: *“Variabile di stato”*

I: *“Variabile di stato, cosa significa variabile di stato?”*

Sara, con sicurezza, interviene subito

S: *“Che dipende dalla situazione in cui si trova, iniziale e finale.”*

I: *“Dallo stato iniziale e dallo stato iniziale e non dal tipo di processo così come.. dimmi un’altra variabile di stato?”*

S: *“L’energia interna.”*

I: *“Benissimo, brava .”*

Qualche veloce scambio di battute con un’altra studentessa e poi ancora il ritorno a Sara per aprire il ragionamento verso i processi irreversibili: ora Sara può farlo.

I: *“Bene. E quando invece abbiamo processi irreversibili? Donatella, la variazione di entropia dell’universo...”*

S: *“Sì, è positiva”*

I: *“È positiva, è positiva e qui viene fuori la freccia(voce sospesa)*

S: *Del tempo*

I: *Del tempo, cioè nei processi irreversibili e quindi l’entropia mi dà anche ragione di questa ulteriore perdita di possibilità di utilizzare energia sotto forma di calore...bene*

Le parole di Sara non aggiungono molto, ma in questo modo è stata reinserita nella discussione, con un rinforzo positivo.

Lezione B

Nella lezione B Chiara interviene, dopo circa 7 minuti dall’inizio della discussione cioè nella prima fase della lezione, perché sollecitata dall’insegnante in quanto la discussione sembrava languire. Il ruolo che l’insegnante assegna a Chiara è ancora una volta quello di sostegno (riavviare la discussione) e mediazione durante le attività didattiche, ma Chiara non sembra ora volere assumere questo ruolo. Infatti a bassa voce dice:

“Magari possiamo sentire quelli che l’altra volta non hanno parlato”

Ma l’insegnante la sollecita:

“Adesso di qualcosa tu poi sentiamo quelli che non hanno parlato.”

A questo punto Chiara assume il ruolo che le viene chiesto.

“Cosa posso dire? Che l’ho riletto [il questionario]... cioè ... magari dal punto di vista macro e micro l’altra volta, cioè ... molte cose non le avevo capite, le avevo prese un po’ così, [...]... alcune cose le avevo prese un po’ alla leggera ...

[...] Alla luce del macro e del micro eh ... forse ... riesco anche a capire...

[...] Cioè [Chiara fa riferimento alla Teoria Costruttiva] una entra nel merito della materia, dei costituenti della materia, quando dice “si fanno assunzioni su ipotetici costituenti della materia d’osservazione” oppure si dice anche “spiegare la natura nascosta del meccanismo” [Chiara riporta frasi dai brani del questionario] ... cioè si entra proprio nello specifico, si vuole capire, cioè non si basa solo su esperimenti empirici ma si cerca di capire cosa c’è dietro, insomma ...”

[...]

I: “Perché dici che alla luce del percorso, facendo riferimento alla distinzione tra macro e micro, riesci a capire ...”

L’insegnante spinge Chiara ad esplicitare il suo personale punto di vista, la via che ha seguito per capire

C: “... riesco a capirlo meglio perché ...abbiamo analizzato la termodinamica su tutti e due gli aspetti, vedendo le differenze e le somiglianze, cioè abbiamo anche due punti di vista differenti, è più forse... è più completo osservare, analizzare un fenomeno o comunque qualsiasi cosa che ci sia attorno da due punti di vista differenti piuttosto che in una visione, e quindi forse mi amplia questo percorso che abbiamo fatto, mi ha ampliato le mie vedute ...”

Ma ancora l’insegnante spinge Chiara ad entrare di più nel suo ragionamento, a metterlo in relazione con il percorso di termodinamica

I: *“Però, riferendoti proprio a quello che stai dicendo ai costituenti della materia, hai fatto un esempio specifico, come lo agganci? In che punto lo ritrovi nel percorso che hai fatto? Non so se hai capito la domanda...”*

[...]

C: *“Beh, anche quando abbiamo fatto la teoria cinetica dei gas ... che abbiamo analizzato le particelle di materia, è quello, forse, un esempio che abbiamo fatto noi.”*

Questo scambio di battute di circa 3 minuti è abbastanza serrato, senza pause, finché un altro studente chiede la parola e la discussione continua spostandosi su altri studenti. Chiara ha esplicitato il suo pensiero sviluppandolo a voce alta, con l'aiuto dell'insegnante. Il ruolo dell'insegnante è completamente diverso rispetto a quello assunto nel corso della lezione A: non è quello di guidare un discorso che è già nella mente dell'insegnante, bensì quello di aiutare a esplicitare un discorso che è nella mente dello studente.

Chiara non solo ha sviluppato un suo personale ragionamento, ma è anche riuscita, con gli stimoli dati dal suo intervento, a fare ciò che l'insegnante implicitamente le aveva richiesto: riaccendere la discussione .

Chiara interviene ancora dopo circa 26 minuti dall'inizio della lezione, verso la fine della seconda fase, durante una discussione sul perché la Meccanica Classica è, secondo Einstein, una Teoria Costruttiva e la Relatività una Teoria di Principi. Quando Chiara interviene, la discussione è incentrata sul fatto che, secondo uno studente, la Meccanica Classica sarebbe una Teoria di Principi e non Costruttiva; lo studente, ribadendo la sua convinzione, cerca tuttavia di fare delle ipotesi per capire perché si possa considerare la Meccanica Classica una Teoria Costruttiva, ma ha un procedere incerto, intervallato da pause e brevi silenzi.

Dopo una pausa di qualche secondo interviene Chiara che, forte comunque del suo ruolo all'interno della classe, non esita a mostrare le sue perplessità:

“Non mi sono chiari certi passaggi.... mentre stava parlando facevo ...non mi torna la risposta in generale ... per la termodinamica va bene ma per la teoria della meccanica classica non ho capito...”

Lo studente, parlando rivolto a Chiara, cerca allora di spiegare il suo punto di vista, ma, ancora una volta, non riesce ad argomentare in modo fluido e convincente la sua posizione.

“Secondo me fa parte delle Teorie di Principi però volendo metterla fra le teorie costruttive ... se la vogliamo mettere ...potrebbe essere quella sugli esperimenti ideali Per cercare di trattarla, comunque secondo me fa parte della teoria di principi ... “

In questa interazione, che ora è con un suo pari, riprende la parola Chiara, per cercare di trovare nuove argomentazioni e rafforzare il punto di vista del compagno, ma anche il suo.

“Cioè ... senza nulla togliere ad Einstein, anch'io la metterei nella Teoria di Principi....perché comunque cioè ... le ipotesi a monte non le vedo così necessarie, io vedo degli esperimenti, da questi esperimenti, cioè dai dati matematici riesco a capire se il principio è giusto o meno e quindi cioè mi faccio il mio sistema di riferimento, vedo il mio corpo che, se è soggetto ad una forza, questo avrà una accelerazione e una velocità, e capisco qual è il principio ma non vedo delle ipotesi a monteeh, l'ipotesi su come magari è fatta la materia perché tanto alla fine la considero già un punto materiale ...”

Interessante è notare che proprio dal suo ragionamento, dalle sue stesse parole, Chiara si accorge che la sua convinzione (la Meccanica Classica come Teoria di Principi) potrebbe essere rivista.

Matteo fa un primo breve intervento nella seconda fase della lezione dopo circa 22 minuti dall'inizio, durante la discussione se considerare la Meccanica Classica una Teoria Costruttiva, qualche minuto prima dell'intervento di Chiara. Matteo prova a spiegare perché la Meccanica Classica si può considerare una Teoria Costruttiva.

“Nel senso che noi ... eh ...mettiamo a monte che ci sia una forza che applicata ad un corpo provochi a questo lo spostamento [sic!] e quindi la chiamiamo forza, cioè ci sono queste forze che magari noi dobbiamo fare in modo che ci siano per spiegare tutto quello che non spieghiamo ... così (pausa)... il concetto stesso della forza magari è un

nostro ... un nostro modello quindi, e quindi si può ricollegare alla prima tipologia [Teoria Costruttiva]”

Queste sue argomentazioni non vengono però riprese dai compagni, neanche da Chiara quando interviene alcuni minuti dopo.

Matteo interviene poi lungamente nella fase finale della lezione quando si discute se sia l'approccio macroscopico o quello microscopico il più "vicino alla realtà". Quando Matteo interviene, lo studente maggiormente coinvolto nella discussione è Michele, che ha una visione della scienza molto diversa da quella di Matteo. Michele infatti, come si è visto, ama la fisica perché gli dice come funziona il mondo, gli indica come entrare nel cuore delle cose. Matteo, in una sorta di contrapposizione intellettuale, interviene con un'argomentazione di impronta filosofica.

“ La Teoria Costruttiva, che è quella basata su ipotesi a monte, cioè su modelli che facciamo noi, cioè dipende ... cioè il fatto che sia vera o no dipende anche da come noi stessi intendiamo la verità, [...] cioè un uomo può pensare che siano vere le cose che non hanno riscontro nella realtà, però magari per lui è vero lo stesso poiché il mondo lo costruiamo noi e quello che vediamo è a seconda di come lo pensiamo noi, di come viviamo noi il mondo.[...]

La Teoria Costruttiva ha l'adattabilità delle cose appuntocioè possiamo vedere una cosa e spiegarla secondo quello che noi... come vediamo il modello cioè noi, come faceva Aristotele, possiamo dire che la penna cade perché il suo luogo naturale è la terra, cioè ... questo ... questa adattabilità ci permette comunque di spiegare le cose anche magari se le loro vere cause sono delle altre ... comunque le possiamo spiegare lo stesso grazie ai modelli che abbiamo fatto a monte.”

Il suo intervento accende una discussione su cosa si intenda per vero e reale, subito colta da Caterina a cui questo tema è caro, e che infatti riprenderà anche nell'intervista. Ora l'interlocutore è Caterina, alla quale la classe riconosce autorevolezza anche disciplinare; Matteo, forte del carattere di stampo epistemologico della discussione, interviene ancora in risposta a Caterina: ribadisce la sua opinione e rafforza il ruolo intellettuale che ha all'interno della classe, in quanto riesce, con argomentazioni filosofiche, a prendere parte a una discussione in campo scientifico.

Anche Sara interviene verso la fine della lezione (dopo circa 44 minuti dall'inizio). Dopo che l'insegnante e la ricercatrice hanno sollecitato interventi, alcuni silenzi e un breve intervento di una studentessa, Sara prende la parola in modo autonomo per esprimere una sua personale opinione.

“Secondo me quella [la teoria] più veritiera è [quella che segue] l'approccio microscopico, perché comunque si entra nel merito della struttura e quindi si riesce a capire ... ad esempio nella termodinamica attraverso il modello discreto abbiamo supposto che le particelle del gas siano dei punti materiali e quindi possano muoversi secondo le leggi della meccanica e, diciamo, da questo punto di partenza si è riuscito a ricavare tutto, quindi secondo me è un punto di partenza fondamentale. Poi è chiaro che quello che interessa più l'uomo è il riscontro con la realtà perché comunque noi non viviamo in un modello e quindi è chiaro che ... quello ... la teoria dei principi sia, come posso dire ... in un certo caso più gettonata, perché comunque ha un riscontro con la realtà e quindi ci interessa di più.”

L'intervento di Sara non è all'interno di un confronto serrato con altri compagni come è stato il secondo intervento di Chiara o di Matteo; non è un intervento che, con l'esplicitazione della propria opinione, vuole rafforzare quella di un compagno (Chiara) o entrare in contrasto con questa e contrapporsi ad essa (Matteo). L'intervento di Sara avviene in un momento di stallo della discussione, è l'espressione di un personale modo di vedere che, forse, viene esplicitato non tanto per mettersi in relazione con le opinioni degli altri, quanto piuttosto per chiarire, quasi alla fine del dibattito, a se stessa il proprio punto di vista e riceverne in qualche modo legittimità. Questo aspetto infatti viene colto da parte della ricercatrice:

“Questo è interessante, perché in effetti non esiste una posizione. Sono proprio temi questi che dovrebbero far discutere, ma non esiste una posizione ...”[...]

L'intervento di Sara è particolarmente significativo: Sara è riuscita ad intervenire senza essere sollecitata, è riuscita ad esprimere il suo personale parere e a riceverne sostegno.

7.4. Relazione con l'appropriazione

Allargando lo sguardo sulla storia dello studente, si può dire che Chiara era emotivamente ed intellettualmente pronta per far sì che lo studio della termodinamica non si riducesse ad una trasmissione meccanica di concetti, conoscenze, abilità in cui si acquisiscono, si accumulano, si memorizzano elementi esterni di conoscenza immagazzinate dal di fuori.

L'insegnante ha assecondato e incoraggiato il ruolo che già Chiara aveva all'interno della classe, continuando a darle credibilità verso se stessa e verso la classe. Il ruolo di Chiara è infatti stato importante per tutta la comunità classe, un punto di riferimento. Chiara non si contrappone, ma cerca di spiegare e comprendere anche il punto di vista degli altri (come nel suo secondo intervento della lezione B).

Questo ruolo l'aiuta anche ad esplicitare e diventare consapevole delle proprie idee. Ad esempio, durante il primo intervento della lezione B, Chiara, in un ragionamento a voce alta, esplicita la necessità di guardare da due punti di vista: qui comincia ad emergere quella che si rivelerà essere la sua idea idiosincratca, cioè che comprendere significa *vedere* nello sforzo di cercare e mettere alla prova diversi punti di vista.

Matteo, come si è detto, aveva bisogno che la sua credibilità rispetto alla classe da un punto di vista filosofico fosse accompagnata anche da una credibilità disciplinare: questo era necessario perché i suoi interventi in campo epistemologico su temi scientifici fossero presi con la dovuta considerazione all'interno della comunità classe.

Nella lezione A si è rafforzata la sua posizione disciplinare, e infatti Matteo ritornerà sull'argomento discusso durante la lezione nell'intervista finale: sulla distinzione tra calore e lavoro e sul concetto di irreversibilità negli scambi di calore. Egli costruisce su questo la riflessione filosofica tra essere e divenire; riflessione che diventa una risorsa anche per imparare contenuti fisici.

Nella lezione B Matteo è molto attivo e ha spazio per esprimere in modo libero il proprio punto di vista: lo fa con determinazione e giocando fino in fondo il suo ruolo anche in contrapposizione con altri studenti (Michele e Caterina).

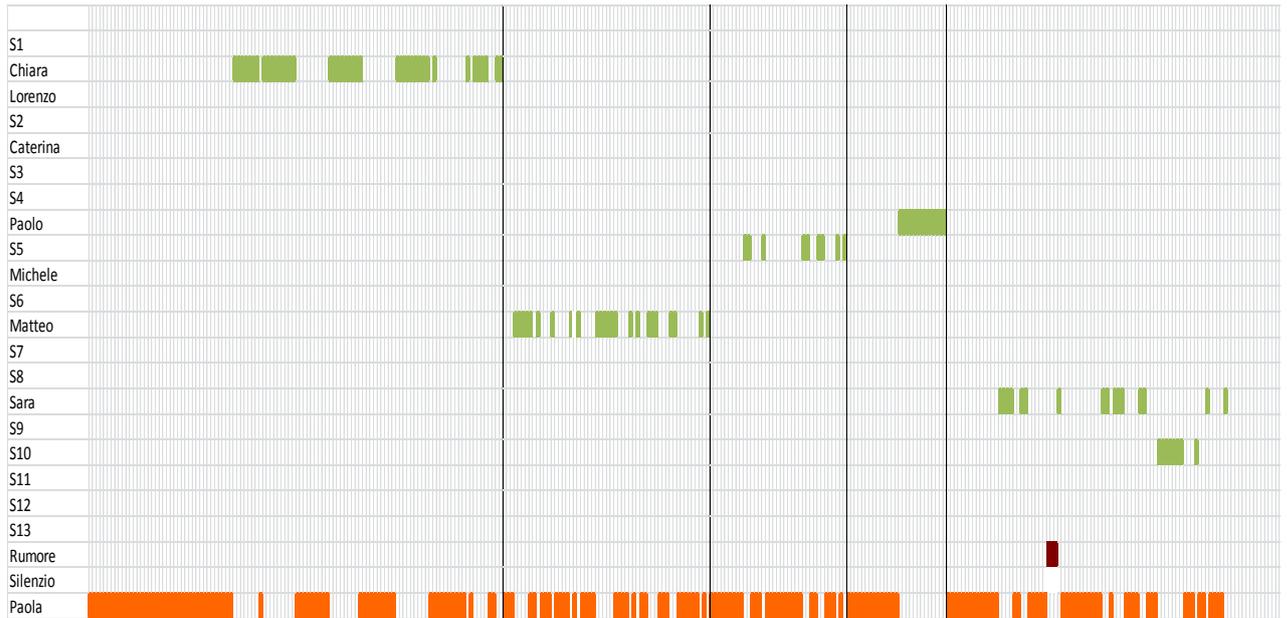
Infine, Sara, come si è visto nei capitoli precedenti, è “in cammino” nel suo processo di appropriazione. Sara ha bisogno di ancorarsi, come emerge nell’intervista finale, a concetti che lei crede di avere compreso e riesce a trattare in modo sicuro: la reversibilità e l’irreversibilità dei cicli a livello macroscopico e il concetto di entropia, cioè i temi oggetto di discussione nella lezione A.

L’incrocio tra i due piani di analisi (quello collettivo e quello individuale) permette di ipotizzare che il “tirare la corda e lasciarla” nelle modalità sopra descritte possa aver influenzato, positivamente, i processi di appropriazione individuali. In particolare, facendo riferimento ai “marcatori” individuati per dare operatività alla definizione di appropriazione e alle diverse dimensioni da loro delineate, è possibile riconoscere, nelle due lezioni, come e quando tali aspetti della appropriazione siano stati incentivati e sostenuti. Nella lezione A si è data molta enfasi alla necessità di stare ancorati ai contenuti disciplinari ma, nelle interazioni individuali, si è anche offerta l’opportunità ad alcuni studenti di rafforzare e valorizzare alcuni aspetti emotivi coinvolti nell’apprendimento della fisica. Nella lezione B si è insistito molto sulla coerenza dell’argomentazione, il suo “spessore” epistemologico o metacognitivo e si è dato ampio spazio, oltre che sostegno, alla esplorazione ed esplicitazione del proprio personale, autentico, punto di vista, da confrontare con quello di altri.

Lezione	Fasi	Turni e tempi	Argomento di discussione	Pezzi di transcript per mostrare come sono stati introdotti gli argomenti
A	(i)	Turni: 1-16 Tempo: 0''-3'40''	Il secondo principio e il suo significato da un punto di vista macroscopico.	<i>Chiara, cosa significa studiare il secondo principio da un punto di vista macroscopico?</i>
	(ii)	Turni: 17-40 Tempo: 3'40''-5'36''	L'enunciato di Clausius e di Kelvin e la connessione di quest'ultimo con il teorema di Carnot e il rendimento ($\eta < 1$)	<i>Matteo, qual è la connessione tra le macchine termiche ideali e l'enunciato di Kelvin? Qual è, per una macchina ideale, l'espressione formale del rendimento?</i>
	(iii)	Turni: 41-52 Tempo: 5'36''-6'48''	Significato di "trasformazione reversibile"	<i>Giovanni, che cosa si intende per trasformazione reversibile?</i>
	(iv)	Turni: 53-54 Tempo: 6'48''-7'40''	Interpretazione del teorema di Carnot in termini di asimmetria tra calore e lavoro ($\eta < 1$)	<i>Igor, quando ci si riferisce ai cicli ideali e alle trasformazioni reversibili quali sono le implicazioni concettuali del fatto che il rendimento è sempre minore di 1 " $\eta < 1$ " ?</i>
	(v)	Turni: 55-76 Tempo: 7'40''-10'14''	Il concetto di entropia da un punto di vista macroscopico in trasformazioni reversibili e irreversibili.	<i>Donatella, qual è il significato del concetto di entropia in un ciclo reversibile? Arianna, cosa aggiungeresti? Donatella, qual è il significato del concetto di entropia in un processo irreversibile?</i>
B	(i)	Turni: 1-42 Tempo: 0''-10'20''	Differenza epistemologica tra l'approccio microscopico e quello macroscopico	<i>Quello che vi si chiede è che voi esprimiate il vostro punto di vista in modo sereno, tranquillo ma ...dovete esprimervi ...va bene?</i>
	(ii)	Turni: 43-148 Tempo: 10'20''-29'20''	Incongruenze nelle risposte degli studenti alla parte epistemologica del questionario	<i>Molti di voi hanno messo la Relatività nelle Teorie Costruttive mentre Einstein l'ha messa nelle Teorie di Principi. Alla luce di quello che abbiamo detto, siete ancora di questa idea? [...] Einstein mette in questo tipo di teorie [costruttive] anche la meccanica classica. (breve pausa) Perché?</i>
	(iii)	Turni: 149-156 Tempo: 29'20''-32'16''	Modelli in fisica	<i>La parola modello, facendo questo percorso, si è illuminata in qualche modo? Ha acquistato nuovi significati oppure non è successo niente alla vostra riflessione su questo punto.</i>
	(iv)	Turni: 157-244 Tempo: 32'16''- 52'	Approccio preferito	<i>C'è stata una discussione molto interessante, secondo me, all'inizio che vi vedeva in diverse posizioni rispetto a quale tipo di teoria [approccio macroscopico o microscopico] è più vera e più vicino al reale. [...] Dopo aver fatto questo percorso avete cambiato la vostra posizione su questo punto? C'è un approccio che vi sembra più vero dell'altro, più profondo?</i>

Tabella 3.

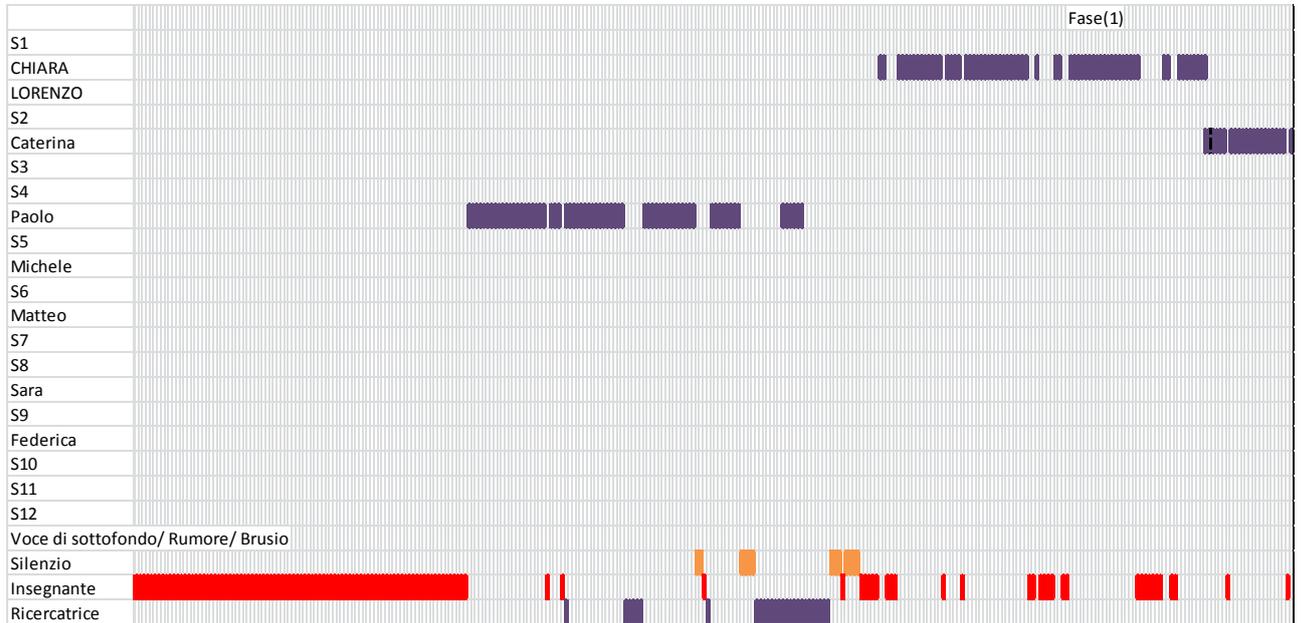
Lezione A



Mapa 1

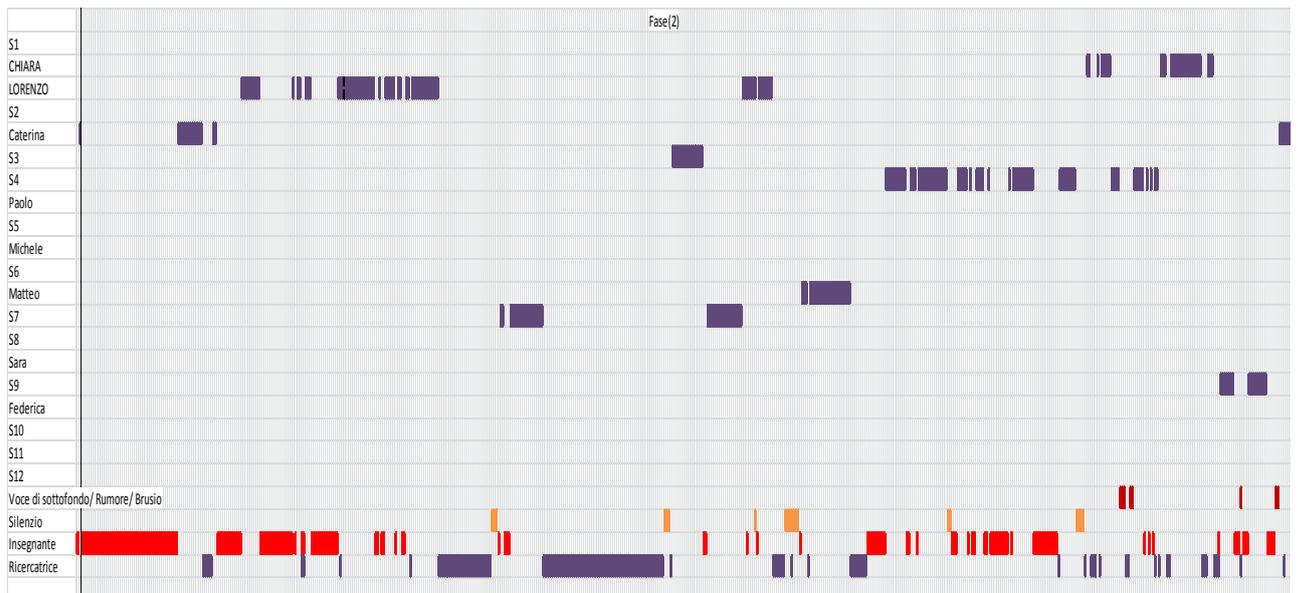
Lezione B

Fase 1)



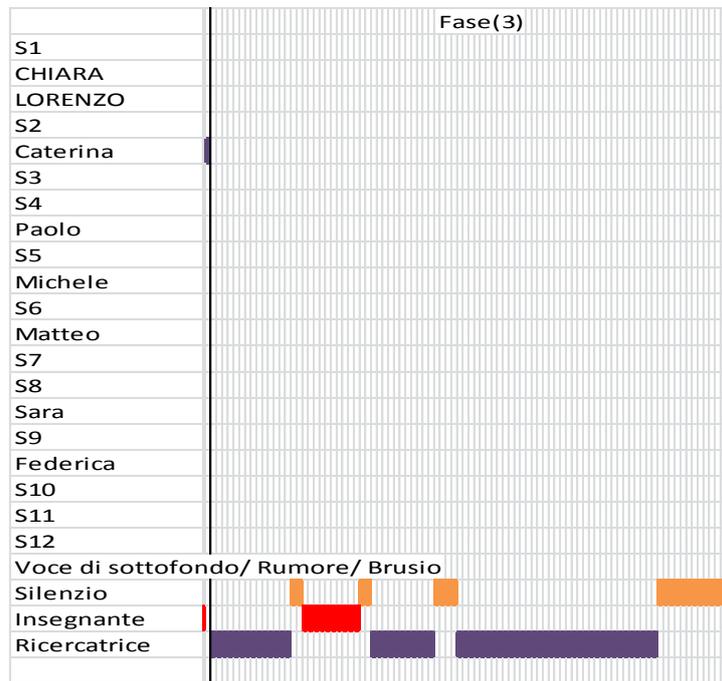
Mappa 2.1.

Fase 2)



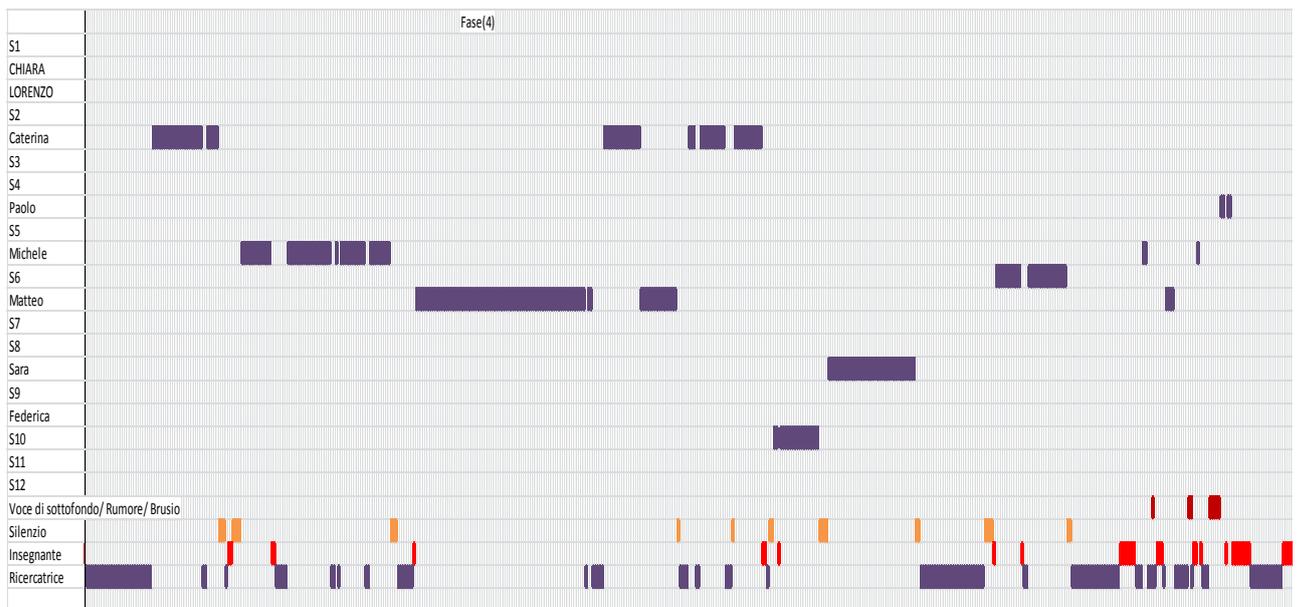
Mappa 2.2.

Fase 3)



Mappa 2.3.

Fase 4)



Mappa 2.4.

CAPITOLO 8

L'appropriazione di un discorso scientifico: rilettura dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati

“The really important kind of freedom involves attention, and awareness, and discipline, and effort, and being able truly to care about other people and to sacrifice for them, over and over, in myriad petty little unsexy ways, every day.

That is real freedom.

That is being taught how to think.

The alternative is unconsciousness, the default setting, the "rat race" — the constant, gnawing sense of having had and lost some infinite thing.”

(David Foster Wallace, *This is water*)

L'analisi dei dati sviluppata nei capitoli precedenti ha spostato l'attenzione dallo stretto problema legato alle difficoltà disciplinari e ai concetti ritenuti ostici per gli studenti⁴⁹ verso altri fattori che includono aspetti affettivi, culturali, emotivi e sociali.

Il percorso che ha portato a definire e a dare operatività al concetto di *appropriazione di un discorso scientifico* ha mostrato come l'apprendimento possa essere visto come un processo che va ben oltre la comprensione del contenuto disciplinare. L'apprendimento ha acquisito il significato più ampio di processo complesso di trasformazione del contenuto stesso che, rispettando le regole e i vincoli della disciplina, *il singolo individuo* opera per rendere quella conoscenza *sensata per se stesso e per il contesto sociale* di classe.

È sempre stata mia profonda convinzione professionale che l'insegnamento della fisica debba contribuire alla crescita di un progetto personale e culturale più ampio, e l'analisi

⁴⁹ Come messo in evidenza nel capitolo 1, questo è il campo maggiormente indagato nella ricerca in didattica della fisica.

sistematica dei dati sembra aver dato sostanza a questa mia convinzione allargandone e definendone il significato: l'apprendimento delle discipline scientifiche può contribuire alla costruzione di una identità personale intesa come progetto *autentico e consapevole* di cui l'individuo è responsabile, in una narrazione di sé che è creata e ricreata costantemente in una interazione dialogica tra le persone.

Già i sociologi Bauman e Giddens hanno messo al centro della loro interpretazione della modernità l'idea che il sé non è più percepito come qualcosa che viene consegnato o dato, ma piuttosto come qualcosa che ciascuno sceglie e sviluppa attraverso una narrazione consapevole della propria storia personale.

Anche la ricerca nel campo dell'educazione scientifica, in questi ultimi anni, si è interessata al concetto di identità personale. Sono stati condotti molti studi su come l'identità personale influenzi lo studio e l'apprendimento di una disciplina come, ad esempio, la matematica. (Sfard, 2007; Cobb et al., 2009).

Il presente lavoro di ricerca suggerisce invece di guardare all'identità percorrendo la strada in senso inverso: dallo studio *di e in* una disciplina alla costruzione di una identità personale. Il fatto che lo studio di una disciplina scientifica come la fisica possa contribuire alla formazione di un'identità personale non appartiene alla consapevolezza diffusa. Il regime di verità che si suppone avere la scienza, il suo linguaggio assunto come indubitabile, certo e oggettivo creano una barriera tra il discorso scientifico e la costruzione di una identità personale. Nella pratica diffusa d'insegnamento, il linguaggio scientifico, così freddo e apparentemente neutro rischia di rimanere un universo di discorso "esterno" a cui non è possibile attribuire significati personali.

"How can the modern subject be the locus of meaning, feeling, and intentionality if it has to talk, feel and intend through thoughts and words that are not its own?"(Radford, 2012)

Un'adeguata ristrutturazione disciplinare che restituisca un'immagine di fisica non come insieme di verità, ma come costruzione di pensiero, come narrazione di *storie di concetti* penso debba essere la base perché l'universo del discorso scientifico possa

essere trasformato da ciascuno, in modo da riuscire, per dirlo con Bakhtin, a fare diventare proprie le parole che sono sulla bocca di altri.

Come è emerso anche dall'analisi dei dati, un'immagine di scienza che permetta di coglierne la polifonia in un gioco esplicito di conciliazione tra vincoli disciplinari e possibili forme di espressione personale e creatività, tra realtà fisica e possibili strade di modellizzazione e costruzione di conoscenza, può diventare una grande opportunità per trasmettere il meta-messaggio che rispettare i vincoli non esclude lo spazio per posizioni personali, ma anzi, i vincoli stessi possono diventare le necessarie basi per stimolare specifiche forme di creatività personale.

La ristrutturazione disciplinare proposta in questo lavoro di tesi (cfr. capitolo 2), ha permesso questo gioco, mettendo in campo diverse forme di complessità che tengono conto sia della complessità intrinseca del pensiero scientifico, sia della complessità del processo di apprendimento come processo personale.

Queste forme di complessità, che abbiamo chiamato di complessità produttiva, hanno infatti permesso di introdurre nuove dimensioni (disciplinare, epistemologica, meta-cognitiva ed emotiva), e hanno contribuito a costruire un ambiente di apprendimento che ha facilitato un coinvolgimento produttivo sul piano disciplinare.

Nella letteratura di ricerca, l'espressione "productive disciplinary engagement" fa solitamente riferimento ai lavori di Engle e Conant, che hanno studiato le condizioni che un ambiente di apprendimento deve avere per favorire un coinvolgimento efficace *per la comprensione* dei concetti disciplinari⁵⁰. (Engle, Conant, 2002)

Il discorso sul coinvolgimento disciplinare produttivo può essere ampliato e arricchito di significato. I risultati della nostra analisi sembrano infatti indicare che è possibile creare le condizioni per un coinvolgimento disciplinare che sia produttivo anche per la

⁵⁰ Un coinvolgimento disciplinare produttivo è in grado di:

problematizzare: incoraggiare gli studenti a intraprendere problemi intellettualmente stimolanti;

dare autorità: dare agli studenti il potere di lavorare sui problemi;

dare responsabilità: rendere responsabili gli studenti per il loro lavoro, sia verso gli altri sia verso le norme disciplinari;

assegnare risorse: fornire accesso alle risorse e tempo sufficiente per investigare i problemi.

costruzione dell'identità. Questo però è possibile se si crea, in classe, un ambiente in cui, con tempi e modalità da definire di volta in volta, si aprono le diverse dimensioni che contribuiscono alla costruzione di un universo di discorso sufficientemente ricco e accogliente da permettere a ciascuno studente di scoprire e coltivare i propri interessi culturali e di affrontare le proprie sfide.

Un punto merita di essere sottolineato. Le attività che si svolgono in classe e le modalità di interazione insegnante/studente e studente/studente, se pensate solo da un punto di vista metodologico, tenendo presente principalmente l'aspetto sociale/relazionale, indipendentemente dalla disciplina insegnata, sono zoppe: ancora una volta, in una relazione circolare, l'immagine di scienza che si vuole trasmettere, le attività di classe e le modalità di interazione dovrebbero darsi sostanza a vicenda.

Alcune attività che, come è stato messo in evidenza dall'analisi dei dati, sono state importanti per l'appropriazione, non sarebbero state possibili se l'intero percorso non si fosse costruito su una precisa ristrutturazione disciplinare basata su multi-dimensionalità, multi-prospettiva e longitudinalità.

Ad esempio la discussione in classe sulle risposte al questionario iniziale (cfr. capitolo 7, Lezione B), si è retta e articolata su queste forme di complessità produttiva. Il questionario infatti era stato costruito con l'obiettivo di stimolare la riflessione sul fatto che dentro un quadro epistemologico più ampio (approccio macroscopico e microscopico; Teorie Costruttive e Teorie di Principi) c'è spazio per riflessioni e posizioni personali (multi-prospettiva), tenendo presente che studiare la termodinamica vuol dire anche mantenere uno sguardo sulle teorie già studiate come la Meccanica Classica e la Relatività (longitudinalità).

Questo ha permesso di gestire e orchestrare, direi quasi in modo naturale, la lezione in diverse fasi: si sono potuti alternare momenti in cui gli studenti erano chiamati ad esprimere – in un clima di fiducia e distribuzione di responsabilità – le loro riflessioni a momenti in cui erano chiamati a prendere sul serio, condividere e risolvere collettivamente, guardando indietro alle teorie precedentemente studiate, problemi di

incoerenza (situazioni di disallineamento). Era loro richiesto sia di entrare più a fondo in questioni di carattere epistemologico sia di cercare una coerenza personale.

La discussione sul questionario ha permesso di condividere collettivamente il fatto che l'apprendimento stesso implica situazioni di disallineamento e la conseguente necessità di riallineare e confrontare.

È emerso inoltre (cfr. capitolo 6) che gli studenti che si sono appropriati del discorso termodinamico sono stati in grado, in un percorso personale, di riconoscere le proprie incoerenze e difficoltà (situazioni di disallineamento); sono stati, intellettualmente ed emotivamente in grado di accettarle invece di rifiutarle subito, mostrando un atteggiamento di fiducia verso se stessi e verso tutta la comunità classe; sono stati in grado di prendersi cura delle proprie difficoltà, di considerarle al momento opportuno cercando e applicando consapevolmente un criterio personale per risolverle (allineamento come atto creativo); sono stati in grado di costruire consapevolmente una narrazione personale con l'obiettivo di rielaborare il modo in cui è stato risolto il loro problema.

Le dinamiche individuali con cui gli studenti hanno potuto risolvere le loro difficoltà e incoerenze, mettendo in campo abilità metacognitive, sembrano mutate dalle dinamiche collettive in cui si è condivisa una precisa idea di apprendimento che implica il riconoscimento di situazioni di disallineamento e la necessità di farsi personalmente carico, in una ricerca di coerenza, di riallineare e di confrontare. Sembra, in un'ottica Vygotskijana, che vi sia stata una fusione creativa di azione collettiva e coscienza personale.

Le dinamiche collettive hanno influenzato le dinamiche personali e hanno favorito lo svilupparsi di *quelle particolari* abilità meta-cognitive che hanno contribuito a *quel particolare* processo di appropriazione. Gli studenti che si sono appropriati del discorso termodinamico sono stati disponibili a riconoscere, nello scenario concettuale, lo spazio per diversi possibili percorsi di conoscenza, sono stati capaci di muoversi longitudinalmente da dettagli locali a visioni globali, si sono messi nell'atteggiamento

emotivo giusto per farsi carico del proprio apprendimento e per cercare di immaginare e anticipare dove i diversi percorsi di conoscenza potevano condurre.

Inoltre, in una sorta di circolarità, le dinamiche personali dei singoli studenti hanno positivamente influenzato la gestione e l'orchestrazione delle dinamiche collettive (cfr. capitolo 7)

Le modalità di interazione e mediazione con la classe che, come si è detto, si è articolata in un gioco tra vincoli e libertà di espressione, tra richieste di essere capaci di stare all'interno dei vincoli disciplinari e proposte di esprimere liberamente la propria posizione, hanno preso voce con quella particolare modalità di orchestrazione emersa dall'analisi della struttura delle lezioni (tempi, ritmi, momenti di silenzio, *revoicing*, ecc...) (cfr. capitolo 7) e espressa dalla metafora "lasciare la corda e tirare la corda".

Queste modalità di orchestrazione sono senz'altro dovute a fattori contingenti e strettamente legati alla personalità e allo stile dell'insegnante. Il gioco tra vincoli e possibilità è invece parte fondamentale della ristrutturazione disciplinare, dei materiali e delle attività didattiche preparate, un criterio ineliminabile di progettazione reso possibile dall'aver messo in gioco diverse forme di complessità.

Per valutare l'esportabilità di questo percorso didattico, si è ripetuta la sperimentazione, come verrà illustrato nel capitolo successivo, in un'altra classe quarta di liceo scientifico con un altro insegnante, che condivide questa visione di scienza e la filosofia di fondo della progettazione del percorso, ma che ha ovviamente un stile d'insegnamento diverso.

L'insegnante che si è reso disponibile a riproporre il percorso nella sua classe e ha condiviso la necessità di mettere in gioco diverse forme di complessità per creare quel particolare ambiente di apprendimento che è condizione necessaria perché ciascuno trovi il proprio modo per raccontare la sua storia; ma poi, usando una metafora, ha orchestrato le attività popolando di intenzioni, accenti e propositi personali la lettura dello spartito.

CAPITOLO 9

Il trasferimento del percorso di termodinamica

Il percorso di termodinamica è stato riproposto dal Prof. Fabio Filippi⁵¹ in una classe quarta di Liceo Scientifico nel periodo Gennaio/Aprile 2012.

La classe, composta da 16 studenti (10 maschi e 6 femmine), è stata così descritta dall'insegnante:

Una classe ordinata composta da studenti studiosi ma che hanno una caratteristica abbastanza evidente: mostrano difficoltà a farsi coinvolgere e a mettere in gioco idee personali che non siano quelle riportate sul libro e che devono studiare. Nella esposizione orale sono trasmissivi, entrando nella parte di chi cerca di accontentare l'insegnante. Preferiscono essere accompagnati nel ragionamento piuttosto che muoversi in modo autonomo.

La sperimentazione del percorso di termodinamica è stata ripetuta con il duplice obiettivo di mettere alla prova e ri-valutare quanto emerso dall'analisi dei dati della prima sperimentazione, e di riflettere sulla trasferibilità della proposta didattica. I due obiettivi sono strettamente legati tra loro in quanto non si può mettere alla prova quanto emerso dalla prima sperimentazione senza fare considerazioni sulla trasferibilità del percorso e viceversa.

Il gruppo di ricerca⁵² ha condiviso con il Prof. Filippi non solo la filosofia di fondo con cui è stato costruito il percorso di termodinamica, ma anche l'idea di insegnamento/apprendimento emersa nei precedenti capitoli.

Sono stata presente a un buon numero di lezioni⁵³, prendendo appunti su quanto stava succedendo in classe (note sul campo) sia sul modo in cui si stavano sviluppando i contenuti disciplinari, sia sulle dinamiche insegnante/studenti e studente/studente; le

⁵¹ Insegnante del Liceo Scientifico A. Einstein di Rimini.

⁵² Il gruppo di ricerca era costituito da me, Olivia Levrini e Giulia Tasquier.

⁵³ Ho assistito al maggior numero di lezioni possibile, in accordo con l'insegnante, cercando di non turbare, con la mia presenza, il clima della classe e le relazioni interpersonali.

note da me prese sono state poi commentate con l'insegnante al termine dell'ora di lezione. Le lezioni sono state audio-registrate.

Con i componenti del gruppo di ricerca si sono svolti regolari incontri (ogni settimana) per analizzare i primi dati e triangolare le impressioni, i punti di vista, le opinioni in modo da: condividere ciò che stava succedendo; individuare eventuali problemi; adattare, in itinere, le attività progettate a monte.

Il primo problema, che si è presentato all'inizio della sperimentazione, è un problema metodologico, ma non solo. È stato necessario riflettere sul problema della **confrontabilità** delle due sperimentazioni: le "condizioni iniziali" dovevano essere tali da non snaturare o togliere significato all'idea di mettere alla prova e ri-valutare quanto emerso dalla prima sperimentazione per poi riflettere sulla trasferibilità della proposta didattica.

I due contesti possono ritenersi confrontabili per:

- scuola: il medesimo liceo scientifico;
- classe: stessa età degli alunni, stesso tipo di sperimentazione all'interno della scuola, stesso curriculum di fisica e stessa preparazione disciplinare;
- argomenti trattati precedentemente: stessi argomenti trattati, stessa capacità di risolvere problemi con risultati, rispetto alle valutazioni standard, confrontabili.

Diversi sono invece non solo gli insegnanti, ciascuno con il proprio stile di insegnamento, ma soprattutto i profili delle due classi e, pertanto, è diversa la "comunità" all'interno della quale ciascuno studente sviluppa e costruisce il proprio percorso personale di crescita culturale ed emotiva.

È stato allora importante costruire situazioni didattiche *ad hoc* che permettessero di mettere in campo, anche in questo contesto, le stesse forme di complessità introdotte nella prima sperimentazione e aprire, anche qui, non solo la dimensione disciplinare, ma anche quella meta-disciplinare, epistemologica, affettiva ed emotiva.

Per garantire la realizzazione di alcune condizioni ritenute cruciali per la confrontabilità e, nello stesso tempo, per tener conto delle peculiarità del nuovo contesto, sono state

programmate alcune attività specifiche: alcune in fase di progettazione con l'obiettivo specifico di caratterizzare il percorso, altre *in itinere* con l'obiettivo di "aggiustare il tiro".

Quindi, da un punto di vista metodologico sono state portate avanti, in parallelo e in modo intrinsecamente circolare, sia la valutazione della confrontabilità del contesto, sia l'analisi di ciò che stava emergendo in classe in relazione alla prima sperimentazione.

9.1. Attività svolte prima di iniziare il percorso. Analisi delle condizioni iniziali

L'analisi delle condizioni iniziali si è presentata particolarmente delicata perché, come si è detto, non aveva tanto lo scopo di valutare i "prerequisiti" della classe – così come si fa quando si inizia un nuovo intervento – ma, soprattutto, quello di delineare più specificatamente il profilo della classe in relazione alle peculiarità del percorso. Questo avrebbe permesso di progettare specifiche attività e mettere in atto specifiche strategie in grado di aiutare i ragazzi ad entrare in quel "regime di competenze" (disciplinari, epistemologiche, meta-disciplinari...) necessario per innescare il processo di appropriazione.

Incontro con il prof. Gianni Zanarini: "Einstein ricercatore appassionato"

Il percorso è cominciato con un incontro tenuto dal prof. Gianni Zanarini⁵⁴ dell'Università di Bologna, ed è stato programmato con l'obiettivo di aprire verso la dimensione affettiva della scienza.

Gli studenti erano stati preventivamente invitati a leggere due testi, scritti dallo stesso prof Zanarini, sulla figura di Einstein, uomo e scienziato, così come poi sarebbe stata trattata durante l'incontro. L'obiettivo era far riflettere sul ruolo della dimensione emozionale nella costruzione della conoscenza.

Al termine della conferenza non ci sono stati interventi, e alla specifica domanda di Olivia Levrini su quale è il loro rapporto con lo studio, in particolare lo studio della scienza, e quale il loro coinvolgimento emotivo, le uniche risposte sono state⁵⁵:

⁵⁴ Il Prof. Gianni Zanarini è docente di Fisica nell'Università di Bologna.

“*Preferisco le materie umanistiche*” (Eleonora);

“*Ho bisogno di pensarci*” (Cesare);

“*Non ho mai pensato alla soddisfazione che mi dà studiare*” (Davide)

Questionario iniziale

A questo punto è stato proposto un questionario (come nella prima sperimentazione) a cui ha fatto seguito, partendo dalle risposte, una discussione in classe.

Scopo principale del questionario era aprire il discorso verso la dimensione epistemologica e metacognitiva, con il duplice obiettivo di aiutare la comprensione delle peculiarità degli approcci macroscopico e microscopico, e di creare le premesse per potere poi aprire discussioni in cui gli studenti potessero esprimere liberamente i loro punti di vista.

Il questionario, somministrato all’inizio del percorso, è stato svolto singolarmente da ogni studente a casa.

È stata proposta la lettura di due brani di Einstein: il primo un articolo pubblicato sul quotidiano *Berliner Tageblatt* il 25/12/1919, con alcune riflessioni sulla sua visione di fisica e su che cosa sia una teoria fisica; il secondo tratto dal testo *Come io vedo il mondo* con alcune riflessioni sulle caratteristiche delle teorie fisiche, classificate in Teorie Costruttive e Teorie di Principi.

Il questionario, proprio per le difficoltà degli studenti già segnalate dall’insegnante relativamente alla capacità di esprimersi rispetto a ciò che non è strettamente disciplinare, è stato strutturato in modo più semplice rispetto alla prima sperimentazione.⁵⁶

⁵⁵ I nomi degli studenti sono di fantasia.

⁵⁶ Le richieste del questionario rispetto ai due brani proposti sono le seguenti:

I Brano:

1. *Quali sono i punti che hai trovato più interessanti? Perché?*
2. *Ci sono termini e/o espressioni che ti sembrano ambigui e/o poco chiari? Se sì, quali?*
3. *Quali espressioni e/o termini sono, secondo te, cruciali per caratterizzare e distinguere il modello induttivo e quello deduttivo?*
4. *Einstein, nel brano, scrive: “possono esistere allo stesso tempo diversi sistemi di pensiero in grado di connettere gli stessi fatti noti. Se ci sono due teorie, entrambe in accordo con i dati sperimentali, il solo criterio per preferire una all’altra è lo sguardo intuitivo del ricercatore.”
Facendo riferimento a ciò che hai già studiato e riportando esempi specifici, come interpreti le varie affermazioni contenute in queste due frasi?*

II Brano:

Analisi delle risposte al questionario

L'analisi delle risposte date dagli studenti ha messo in evidenza uno stile degli scritti impersonale e distaccato in cui non viene espressa una propria idea, ma piuttosto si riportano parti di brano senza alcun tentativo di lettura critica.

La maggior parte degli studenti ha dichiarato di aver trovato i testi chiari esprimendosi con frasi del tipo:

Non ho trovato termini difficili da comprendere (Massimo)

Non ci sono termini che mi sono sembrati ambigui o poco chiari (Cesare)

I termini *analitico-sintetico*, *deduttivo-induttivo*, più volte ripetuti all'interno dei brani, sono risultati "facili" e gli studenti non hanno sentito la necessità di ulteriori approfondimenti o chiarimenti; più ambigua è sembrata invece la parola *pregiudizio* che, come scrive Davide, può creare qualche problema di comprensione.

Nel complesso, il testo è scritto con un linguaggio non specifico e quindi di facile comprensione; l'unico termine che mi ha creato qualche problema per la comprensione è stato "pre-giudizio", ma solo per il fatto che non è usuale trovarlo in questi ambiti (Davide)

Quasi tutti hanno utilizzato con disinvoltura termini legati alla verità o falsità di una teoria, mentre nessuno ha citato o si è soffermato sulla sottile distinzione riportata da Einstein (I brano) tra teoria *falsa* e teoria *inadeguata*, e neppure ha riflettuto su cosa significa sostenere che una teoria è "semplice".

Einstein con queste parole vuole mettere in luce che, seguendo un metodo logico-deduttivo, non si giunge per forza ad un'unica teoria, ma si sceglie quella più elementare, non pensata come "facile", ma come semplice da spiegare. In questo caso, Einstein, introduce il cosiddetto "sguardo intuitivo del ricercatore". (Massimo)

-
1. *Quali sono i punti che hai trovato più interessanti? Perché?*
 2. *Ci sono termini e/o espressioni che ti sembrano ambigui e/o poco chiari? Se sì, quali?*
 3. *Quali espressioni e/o termini sono, secondo te, cruciali per caratterizzare e distinguere le due tipologie di teoria indicate da Einstein come "Teorie Costruttive e Teorie di Principi"?*
 4. *Dopo aver selezionato espressioni e/o termini usati da Einstein per caratterizzare e distinguere le due tipologie di teoria, come li ri-elaboreresti, ampliaresti e/o chiariresti per poter spiegare, con parole tue e facendo riferimento a ciò che hai già studiato, che cosa significano, secondo te, le espressioni "Teoria Costruttiva" e "Teoria di Principi"?*

Alla richiesta di fare riferimento a ciò che avevano studiato precedentemente riportando esempi specifici (domanda n°4), sono quasi tutti rimasti aderenti ai testi, come se non si sentissero liberi o in grado di mettere alla prova le loro idee in ambiti e modi diversi da come riportato nei brani. Ad esempio, alla richiesta di fare riferimento a quanto già studiato per interpretare la frase di Einstein *“Possono esistere allo stesso tempo diversi sistemi di pensiero in grado di connettere gli stessi fatti noti. Se ci sono due teorie, entrambe in accordo con i dati sperimentali, il solo criterio per preferire una all’altra è lo sguardo intuitivo del ricercatore”*, hanno fatto riferimento solo alla relatività di Einstein e a quella di Galileo, citate nei brani. La nostra ipotesi era invece che frasi evocative come *“sistemi di pensiero”* potessero stimolare la fantasia e permettere di osare delle interpretazioni che facessero riferimento alla propria storia culturale.

Interessante è una delle risposte di Bruno, peraltro uno dei più bravi della classe e con ottimi voti nelle verifiche di fisica. Per legare il termine analitico al termine induzione, Bruno scrive:

*“Il metodo utilizzato [per la teoria costruttiva] è quello **sintetico**: si assumono come principi le cause scoperte e provate e, mediante queste, si spiegano i fenomeni che ne derivano e si provano tali spiegazioni (**metodo deduttivo**).*

*Una “teoria di principi”, invece, usa il metodo **analitico**: si fanno esperimenti e osservazioni e si traggono da questi, mediante l'**induzione**, conclusioni generali (si procede dalle cose composte alle cose semplici, dai movimenti alle forze che li producono e in generale dagli effetti alle loro cause, e dalle cause particolari a quelle più generali). Alla base vi sono, dunque, proprietà generali dalle quali derivano criteri formulati matematicamente, ai quali i processi devono adeguarsi”.*

Bruno non si rende conto della incoerenza tra quanto scritto da lui e quanto scritto da Einstein che, nel primo brano, facendo riferimento al metodo induttivo, scrive:

La più elementare rappresentazione che si può dare dello sviluppo delle scienze sperimentali è basata sul metodo induttivo. Secondo tale metodo, singoli fatti che mostrano tra loro connessioni conformi a una legge vengono selezionati e raggruppati. Raggruppando a loro volta queste leggi se ne possono trovare altre

più generali, fino a formare un unico sistema che descrive la totalità dei fatti, in modo tale che ciascuno di essi può essere spiegato.

Tuttavia, anche uno sguardo superficiale insegna che solo la minima parte dei grandi progressi della conoscenza scientifica ha avuto origine in questo modo.....

E ancora, nel secondo brano:

Queste, [le teorie di Principi] anziché il metodo sintetico usano quello analitico. Il punto di partenza e la base non sono costituiti da elementi di costruzione ipotetica, ma da proprietà generali di processi naturali determinate empiricamente, dalle quali derivano in seguito criteri formulati matematicamente, ai quali i processi particolari o le loro immagini teoriche devono adeguarsi.

Dall'analisi emerge che in generale lo sguardo della classe è sul “*qui e ora*”: non ci sono tentativi di mettere in relazione i due brani, cercando di dare significato ad alcune affermazioni di un brano in relazione a quelle dell'altro o di mettere in gioco le proprie conoscenze relative ad altro che non sia ciò che è riportato o citato nei testi.

L'apparente chiarezza dei termini pare poi derivare dal fatto che i termini abbiano una certa vicinanza a termini usati in ambito fisico. Le parole non sono percepite facili o difficili per la loro intrinseca problematicità – che peraltro non vedono –, ma per la loro appartenenza a un codice che c'entra o non c'entra con quello che si sta studiando. I termini *analitico-sintetico*, *deduttivo-induttivo* sono forse abbastanza familiari perché risuonano con il loro atteggiamento intellettuale e, in ogni caso, etichettano due modi di procedere intuibili e rassicuranti, chiusi in quel contesto.

A conferma di questo, è risultato poco chiaro, in quel contesto, il termine *pregiudizio* perché, come scrive Cesare, non è un termine usato in ambito fisico. Non ha invece destato alcuna perplessità nella comprensione l'espressione *sguardo intuitivo del ricercatore* (brano I). E' opinione diffusa che il ricercatore possieda una “acutezza” nel “guardare” il mondo da giustificare e accettare espressioni come *sguardo intuitivo*; il

termine “pregiudizio” invece porta con sé una accezione negativa che richiama piuttosto uno sguardo miope non capace di “esplorare” il mondo.

Discussione in classe sulle risposte al questionario.

La discussione che si è svolta in seguito in classe ha avuto come obiettivo principale quello di cercare di incentivare un atteggiamento di *maggior coinvolgimento personale* in cui:

- il ragionamento potesse *estendersi* (dal primo e dal secondo brano);
- nuove idee potessero diventare chiavi per rileggere le conoscenze già acquisite e coglierne nuove sfumature e nuovi significati (*guardare indietro*);
- si potessero aprire problemi/curiosità/spunti di riflessione per anticipare, avere aspettative verso ciò che si doveva ancora studiare (*guardare avanti*).

La discussione è stata condotta da me e Olivia Levrini. Sono stati subito resi noti gli obiettivi della discussione e si è adottata la strategia di discutere facendo esplicito riferimento alle loro risposte che erano state riportate su slide.

Ad esempio facendo riferimento alla risposta di Bruno, (legame induzione/metodo sintetico e deduzione/metodo analitico) si è chiesto se loro vedevano delle incoerenze rispetto ai brani letti. Le risposte sono state poche e frammentarie.

Si è mostrato allora che, se si cercano coerenze più ampie, le cose sono meno banali di quanto possano apparire e questo ha permesso di mostrare che la ricerca di una nuova coerenza può/deve passare attraverso un cambiamento di discorso (ad esempio il ruolo dei pre-giudizi e dell’intuizione).

A commento delle risposte alla domanda 4, che chiedeva di fare riferimento a ciò che avevano già studiato per interpretare alcune affermazioni contenute nei brani, sono stati inclusi nella discussione altri esempi, altri temi di fisica da loro studiati precedentemente e non citati nei brani (ottica, Michelson Morley, sistema tolemaico vs sistema copernicano). Ancora con l’obiettivo di aprire nuovi spazi e ri-cercare altre coerenze, si è cercato di spingerli a vedere se e come fosse possibile applicare le nuove idee introdotte nei brani a quanto già studiato.

La strategia che si è quindi scelta per la discussione è stata quella di individuare punti specifici di discussione che potessero sollecitarli ad esprimersi e a mettersi alla prova. E' stato ribadito più volte che non ci sarebbe stata nessun tipo di valutazione. Ad esempio:

“Proviamo a condividere le vostre idee circa la possibilità di “co-esistenza di diversi sistemi di pensiero”, pensando a quale significato può avere, a seconda del contesto che si prende a riferimento, questa espressione.

Vedete una differenza tra considerare la coppia “Galileo_Einstein” e la coppia “Einstein-Minkowski”⁵⁷?

Dalle vostre risposte ci sembra che i due sistemi di pensiero possano confrontarsi essenzialmente con il criterio “dal particolare al generale”, pensando ad un’evoluzione della fisica in cui le nuove teorie inglobano le vecchie.

Non vi viene in mente un contesto fisico che avete studiato che può dare un contributo a riflettere su altre sfumature circa il significato di “co-esistenza tra diversi sistemi di pensiero”?

Gli interventi degli studenti sono stati pochi e, nel tentativo di ricordare il già fatto, poco personali.

Come dichiarato dagli stessi studenti a fine percorso, il questionario e la relativa discussione non hanno avuto un ruolo particolarmente importante nel ricostruire e cercare significati durante i lavori (come invece era successo durante la prima sperimentazione); sono piuttosto serviti per far cogliere loro che aprire dimensioni diverse da quella strettamente disciplinare richiede un coinvolgimento personale ed emotivo, la necessità di farsi carico delle proprie idee: a questo non erano abituati.

Dalle prime osservazioni in classe.

Il profilo delineato dall’insegnante è stato confermato non solo dall’analisi del questionario, dalle reazioni degli studenti alla discussione e alla conferenza del Prof. Zanarini, ma anche dalle mie prime osservazioni in classe.

⁵⁷Gli studenti avevano trattato con il loro insegnante durante il I quadrimestre il dibattito sullo spazio-tempo tra Einstein e Minkowski, quando avevano studiato la relatività ristretta,.

Ad esempio, al termine di una lezione⁵⁸, dopo la trattazione delle variabili calore e lavoro (Q e L) come variabili di processo e l'enunciazione del primo principio (nella forma $Q = L + \Delta U$), l'insegnante ha esortato gli studenti a far domande, ma l'unico intervento è stato quello di Simona. Non si ritrovava con la definizione del libro e allora ha chiesto: *va bene per il primo principio la definizione che c'è sul libro o ce n'è un'altra più precisa?* per poi leggere la definizione. Elena, a sua volta: *a che pagina?* E senza nessuna sollecitazione chi aveva il libro chiuso lo ha aperto.

Dalle mie osservazioni in classe ritengo di poter dire che l'atteggiamento, comune al gruppo classe, di ricercare subito, ancora prima di riflettere su quanto detto, la definizione da potere ripetere senza possibilità di errore, non va inteso banalmente come "per avere un buon voto cerco di ripetere ciò che va bene all'insegnante". Piuttosto sembra espressione di un preciso modo di vedere l'apprendimento: qualcosa di "neutro" e "oggettivo", la progressiva ricerca di ciò che è *più preciso*. Non ci sono diversi modi di guardare uno stesso concetto, c'è un solo modo che è quello giusto svincolato da aspetti meta-disciplinari o emotivi/affettivi.

9.2. Attività significative svolte durante il percorso

Intervento di sintesi, ma con una visione globale

L'intervento, programmato in itinere, è stato tenuto da me al termine della trattazione macroscopica del primo principio della termodinamica, con l'obiettivo principale di contribuire al formarsi di una visione più globale ripensando al *già fatto*, inseguendo la domanda "*Come cambia il concetto di oggetto e di interazione – e quindi la loro modellizzazione – passando dalla Meccanica Classica alla Termodinamica?*"

Dalla lettura dei questionari infatti era già emersa la necessità di accendere una prospettiva longitudinale (guardare indietro al *già fatto*, ma anche guardare in avanti) e di problematizzare i concetti per incoraggiare un atteggiamento di ricerca di significati che non fosse solo locale.

⁵⁸ Lezione del 23 gennaio 2012.

Nel programmare l'attività si è tenuto però presente anche un secondo obiettivo: garantire che le principali caratteristiche della ricostruzione disciplinare fossero un invariante delle varie sperimentazioni (obiettivo di confrontabilità). Si era infatti avvertita la necessità di puntualizzare alcuni passaggi disciplinari significativi ed esplicitare alcuni *elementi critici* necessari per implementare le forme di complessità caratteristiche della ricostruzione disciplinare.

Dalla mia osservazione in classe era emerso che il percorso realizzato dal Prof. Filippi per trattare il primo principio da un punto di vista macroscopico era, per alcuni dettagli critici, diverso da quello già sperimentato.

Tali dettagli, anche se locali e apparentemente marginali, non erano secondari, in quanto toccavano proprio quei punti sui quali la ricostruzione giocava le sue *forme di complessità produttiva*.

In particolare:

- nella trattazione del I principio, l'accento era stato posto più sul calore ($Q=L+\Delta U$) che sulla energia interna ($\Delta U=Q-L$). Porre l'accento sull'energia interna ($\Delta U=Q-L$) era stata una precisa scelta del percorso per sottolineare il legame tra la Termodinamica trattata con un approccio macroscopico e la Meccanica;
- nell'introduzione del gas perfetto, non era stata fatta una specifica riflessione su quegli aspetti che possono mettere in forte evidenza il cambiamento di modellizzazione dell'oggetto passando dalla Meccanica alla Termodinamica. Questo, nella costruzione del percorso, era stato ritenuto importante per riflettere poi sulla differenza tra modellizzazione nell'approccio macroscopico e in quello microscopico;
- non sembrava essere stato sottolineato con sufficiente forza il concetto di variabile di processo per mettere in relazione i concetti di calore e lavoro con quello di energia interna. Questo, nella costruzione del percorso, era stato ritenuto importante per ripensare alla relazione tra Q e L quando si sarebbe poi introdotto il concetto di entropia.

L'attività è stata condotta con lo scopo esplicito di stimolare gli studenti a riflettere sul fatto che, pur trattando leggi e principi fisici (in questo caso il primo principio scritto nella forma $Q=L+\Delta U$ o $\Delta U=Q-L$), si può porre l'accento su aspetti diversi e questo può implicare precise scelte di significato della legge o del principio trattato. Questo ha permesso anche di riprendere il filo dell'intervento del Prof. Zanarini che aveva fatto riferimento a come diverse teorie fisiche possano sottendere diverse visioni del mondo, aiutando a ripensare al già fatto e ad accendere nuove prospettive.

“Saggio guidato”

È stato chiesto agli studenti di scrivere, in classe e singolarmente, un breve “saggio guidato” per ripercorrere quanto studiato sul primo principio da un punto di vista macroscopico, ma con l'obiettivo di ripensare, seguendo Einstein, alla termodinamica macroscopica come “Teoria di Principi”.

Il saggio è stato strutturato per aiutare lo studente a trovare quella coerenza interna tra i vari *ingredienti* messi in luce nel percorso così da poter giustificare l'approccio macro come una teoria in sé, distinguibile - anche se strettamente connessa - dall'approccio micro che si sarebbe affrontato in seguito.⁵⁹

Al saggio è seguita una discussione gestita da me e dall'insegnante di classe con l'obiettivo di rivedere/ripuntualizzare alcuni nodi/concetti “oggettivi” che dovevano essere chiari e condivisi – per i quali non c'era spazio per interpretazioni personali –, e contestualmente con l'obiettivo di aprire verso possibili interpretazioni personali per dare ad essi significato – sui quali ognuno poteva/doveva prendersi il suo spazio di libertà e creatività per metterci del proprio –.

⁵⁹*Testo*: Le tappe del percorso fin qui seguito possono essere individuate dai principi e dalle relazioni seguenti:

1. Principio zero
2. Legge della calorimetria
3. I principio
4. Legge dei gas perfetti

Sviluppa ciascuna tappa del percorso, esplicitando:

- a) il significato fisico che le grandezze fisiche assumono nella specifica relazione considerata;
- b) le ipotesi a monte che riconosci, se ci sono;
- c) il legame tra il principio e/o la relazione con l'osservazione e gli esperimenti;
- d) la connessione, se c'è, con il modo di definire *sistema*, *stato* e *processo* in termodinamica.

(Facoltativo)

Facendo riferimento a quanto hai già scritto nei punti precedenti, costruisci un tuo ragionamento che sottolinei quello che, secondo te, può significare il I principio.

Ancora una volta si è voluto rendere esplicito che il gioco non è quello del *qui e ora* sul singolo concetto/relazione, ma piuttosto quello di cercare di muoversi *in profondità*, scoprendo sempre nuovi nessi e relazioni, *in avanti* cercando di anticipare come possono evolvere questi ragionamenti sulla modellizzazione e *indietro* guardando le teorie già studiate (La termodinamica è un altro modo di guardare rispetto alla meccanica? A quali concetti ci si può ancorare e cosa invece occorre guardare in un modo diverso?).

Come emerge da quanto descritto, durante tutto il percorso le dinamiche di classe sono state gestite e guidate da noi insegnanti, ma con uno sforzo visibile, da parte degli studenti, di comprendere quanto richiesto loro e cercare di entrare nel gioco.

9.3. Analisi della discussione finale in classe

La discussione finale è stata programmata perché gli studenti raccontassero e condividessero, alla fine del percorso, le loro riflessioni sulla modellizzazione (dalla meccanica, alla termodinamica, al tema del riscaldamento globale). Si voleva che la discussione fosse condotta da loro con un duplice obiettivo: da una parte, far sì che fossero loro i protagonisti delle dinamiche di classe sia collettive sia individuali; dall'altra, aprire la dimensione meta-cognitiva per condividere i momenti – illuminanti o fastidiosi – in cui la fisica ha risuonato con i loro interessi culturali e/o in cui sono state toccate delle corde emotive (riflettere sul loro processo di apprendimento).

Agli studenti era stato reso noto qualche giorno prima il titolo della discussione “*Il ruolo della modellizzazione nella comprensione della realtà*”, come pure gli obiettivi della discussione stessa.

Il risultato, come mostra l'analisi⁶⁰, è stato superiore alle aspettative.

9.3.1. Analisi della discussione finale

⁶⁰ La trascrizione della discussione è stata analizzata anche da Prof. Zanarini che aveva conosciuto la classe durante i suoi interventi. I risultati dell'analisi sono il frutto della triangolazione di tutte le diverse osservazioni.

L'incontro è iniziato con una mia breve introduzione, che ha proposto di riflettere sul percorso appena concluso. A differenza di ciò che accadeva spesso negli incontri di classe, la mia introduzione non è stata seguita da silenzio, ma subito il primo studente ha preso la parola e ha raccontato una sua esperienza cognitiva (*ho riguardato... ho cercato di capire... mi sono accorto...*) che ha proposto anche agli altri. Si è configurata quindi fin dall'inizio una situazione che potremmo definire di pensiero collettivo che resterà tale fino alla fine.

Bruno: Ho riguardato le varie modellizzazioni che abbiamo visto durante il percorso (le trasformazioni quasi statiche, i gas ideali...) e ho cercato di capire gli elementi che hanno in comune: sono delle semplificazioni di alcuni fenomeni che avvengono nella realtà. Perfezionando queste modellizzazioni possiamo avvicinarci sempre più alla realtà, ma sono sempre delle semplificazioni. Quando facciamo dei modelli tendiamo a escludere certi effetti che sono presenti nella realtà.... Guardando la modellizzazione dei gas ideali, mi sono accorto che cercando di riferirsi al movimento delle particelle si è pensato a uno studio statistico, quindi anche di probabilità, e si è guardato all'entropia in un modo diverso: non è impossibile che un sistema evolva da stati più disordinati a stati più ordinati, ma è meno probabile, c'è una piccola probabilità... Questa modellizzazione permette di guardare da un punto di vista diverso, e anche più originale...

E' inattesa, ma molto interessante, la qualifica di "originale" attribuita a un modello. Sembra di cogliere dietro questa parola del linguaggio comune una allusione al lavoro creativo che sta dietro le teorie scientifiche.

Subito dopo Bruno, interviene un altro studente. La dinamica non è contrappositiva, e nemmeno si può cogliere in questo secondo intervento l'intenzione di fare miglior figura nei riguardi dei docenti. Lo studente infatti non si rivolge in primo luogo a loro, ma a tutto il gruppo, e il suo intervento non si pone come alternativo, ma piuttosto come complementare a quello di Bruno (*oltre a quello che ha detto... quello che ha detto è vero...*). E' un altro segno della dinamica di pensiero collettivo che si sta instaurando.

Davide: *Oltre a quello che ha detto Bruno, si può dire anche che da sempre usiamo la modellizzazione, fin da quando siamo piccoli: la stella con le punte, il sole con i raggi, la terra come una palla. La modellizzazione aiuta a capire ciò che si sta studiando, che si sta guardando, senza dover tenere conto di molti fattori.... Quello che ha detto Bruno è vero, e poi ci sono delle materie più adatte alla modellizzazione, come la meccanica e la termodinamica, e altre come la fisica dell'atmosfera, dove i feedback sono talmente tanti da non poter essere considerati tutti, e quindi la previsione fatta su questi calcoli immaginari, ipotetici, non è....*

L'accento ai problemi di modellizzazione dei sistemi complessi (pur non usando queste parole) è pertinente, e dà un contenuto significativo a quella che è stata proposta come una aggiunta al discorso di Bruno. Si può notare anche l'accento all'infanzia, che propone l'attività scientifica come uno sviluppo adulto della modellizzazione infantile per capire il mondo.

L'intervento, immediato, di un terzo studente sviluppa ulteriormente questa riflessione, sia in termini psicologici che in termini storici. Ancora una volta, il discorso è rivolto a tutto il gruppo (*una cosa che forse loro...*), non in termini contrappositivi, ma piuttosto in uno sforzo comune di comprensione, in una esperienza di pensiero collettivo.

Massimo: *Una cosa che forse loro non hanno sottolineato è una considerazione filosofica: l'uomo ha sempre avuto paura di non riuscire a comprendere la realtà, e questo lo ha portato a cercare modelli, perfezionandoli man mano, basandosi o sull'esperienza o sull'astrazione. All'inizio forse più sull'esperienza... vedevano un effetto e risalivano alla causa... poi hanno cominciato a pensare a una astrazione, a modelli più astratti... Ma bisogna stare attenti, perché a volte i modelli più astratti possono allontanarci dalla realtà...*

E' interessante sottolineare questo verbo (*allontanarci*) che sposta alla seconda persona plurale le riflessioni fatte fin qui sull'uomo del passato. Questo significa che qui gli studenti stanno parlando anche di loro, della loro esperienza – ricordiamo anche l'intervento di Davide – ma che cercano di capire il mondo con l'aiuto dei grandi

scienziati che li hanno preceduti. E soprattutto con l'aiuto di quelli che hanno impresso una svolta alla ricerca scientifica.

Massimo: *Già dal medioevo i filosofi cominciavano a pensare la possibilità dell'astrazione.....*

Elena: *Il luminare dell'astrazione è Galileo. Ad esempio, studiando la caduta dei gravi non poteva creare uno spazio vuoto, e allora ha supposto che, potendo avere uno spazio vuoto, una roccia e una piuma cadessero con la stessa velocità....*

Dopo questi scambi così stretti e così arricchenti, sembra che il pensiero collettivo si sia un po' fermato, come se si fosse arrivati a un accordo ma fosse difficile sviluppare ulteriormente l'argomento. Poi però la discussione riprende analizzando il rapporto tra modellizzazione ed esperimento.

Filippo: *... I modelli si utilizzano quando l'uomo non è in grado di tenere conto di tutti gli aspetti... ad esempio, l'atmosfera è troppo imprevedibile, mentre ad esempio lo studio della caduta dei gravi ai tempi di Galileo era complesso, mentre oggi possiamo realizzare il vuoto e studiare l'attrito dell'aria... Nel senso che al tempo di Galileo, sia per le conoscenze che per la tecnologia questo fenomeno era molto più complesso...*

Il pensiero espresso è ancora un po' confuso, nel senso che mescola conoscenze teoriche e conoscenze sperimentali. Ma è comunque l'avvio per un ulteriore sviluppo da parte di un altro studente.

Francesco.: *Adesso la caduta dei gravi possiamo sperimentarla veramente: possiamo creare il vuoto dentro una campana di vetro, lasciare cadere due oggetti di peso diverso e verificare che cadono alla stessa velocità. Galileo invece doveva per forza fare una modellizzazione....*

Questa riflessione – nota l'insegnante – sembra implicare che nella meccanica di oggi non c'è nessuna modellizzazione. Ma Francesco non intendeva dire questo.

Francesco *Noi abbiamo i mezzi – sia per i calcoli che per la conoscenza sperimentale – per una modellizzazione meno semplificativa della realtà....*

Anche in questo intervento si pone il tema del rapporto tra esperimenti e modelli, che si svilupperà ancora nel seguito, così come quello dell'evoluzione storica dei modelli.

Simona: *... Le situazioni che studiava Galileo sono molto semplici da riprodurre oggi in laboratorio, mentre adesso magari studiamo problemi che possono sembrare difficilissimi, ma magari tra mille anni...*

Davide: *Nel senso che si modella ciò che è difficile....*

Simona: *Esatto...*

Davide: *Per Galileo la caduta dei gravi era difficile, quindi ha modellizzato, per noi oggi è realizzabile, e quindi il modello non serve più....*

Segue a questa affermazione un parlare piuttosto confuso, da cui emerge uno scambio diretto tra due studenti, sempre volti a capire meglio, piuttosto che a contrapporsi.

Francesco: *Insomma, noi l'esperimento della caduta dei gravi possiamo farlo realmente....*

Massimo: *Ma....*

Francesco: *Non hai bisogno di fare una modellizzazione, cioè....*

Massimo: *Ma rifletti, non è che tu....*

Francesco: *E' ovvio che ci rifletto, ma Galileo non ha potuto farlo concretamente: lui ha tolto l'attrito nel suo ragionamento, noi possiamo farlo fisicamente....*

Massimo: *Ma tu hai il concetto di attrito!*

A fronte di un tentativo di contrapporre modelli ed esperimenti, emerge così la consapevolezza che anche il progetto di un esperimento richiede un modello. Segue poi una riflessione sul grado di certezza del risultato di un esperimento, che deve venire ripetuto molte volte per poter dare origine a una legge. Ma la relazione tra realtà e modelli non viene ulteriormente approfondita finché non intervengo a richiamare le due prospettive complementari sotto le quali è stata studiata la termodinamica. La

prospettiva macroscopica parte dall'esperienza dei processi irreversibili e poi introduce un modello relativo ai processi reversibili; la prospettiva microscopica, invece, parte dal modello del gas come costituito da molecole puntiformi per arrivare poi a una interpretazione dell'entropia.

Francesco, che aveva assunto in precedenza una posizione radicale a favore del superamento dei modelli da parte dell'esperimento, coglie ora meglio la complementarità e la relazione tra questi due momenti dell'attività scientifica. E lo dice. Questo è interessante, perché segnala ancora una volta che la dinamica del gruppo non è contrappositiva, ma collaborativa all'interno di un processo di pensiero collettivo nel quale non ci sono identificazioni esasperate dei singoli partecipanti con una affermazione o un punto di vista. Nel suo discorso la parola *realtà* si può intendere come osservazione o addirittura come esperimento sulla realtà, ma questo punto non è ancora abbastanza chiarito. Lo sarà un po' meglio nell'intervento successivo.

Francesco: *La realtà e la modellizzazione sono due cose: se non riusciamo a comprendere la realtà ricorriamo alla modellizzazione, oppure possiamo anche fare il viceversa, partendo da un'ipotesi e confrontandola con la realtà per vedere se va modificata... Sono collegate, vanno viste in relazione.*

Davide: *Partire da una modellizzazione, da una legge, e trovare le prove sperimentali, oppure partire dall'esperienza e trovare una legge.... Quando siamo partiti dalla realtà e abbiamo visto che è troppo complicata per riuscire a descriverla allora abbiamo modellizzato... Ma poi siamo partiti da un modello dei gas per arrivare alle loro proprietà....*

Si pone ora, soprattutto con riferimento al percorso all'interno della termodinamica, il problema del rapporto tra livelli diversi di modellizzazione.

Bruno: *... Quando trovi una legge dal punto di vista macroscopico devi cercare di andare anche a livello microscopico....*

Davide: *Per comprendere a fondo l'argomento...*

Simona: ... *Vedere l'altra faccia della medaglia....*

Bruno: *Secondo me, per capire a fondo un fenomeno bisogna guardarlo sia macroscopicamente che microscopicamente...*

Guardandolo microscopicamente siamo riusciti a spiegare che l'irreversibilità non è impossibilità ma è improbabilità, cosa che non avremmo potuto scoprire solo a livello macroscopico.... Quindi si capiscono più cose, secondo me...

Davide: *Magari anche guardare l'uomo... ha una testa, due braccia, due gambe, un busto, ma se ci guardi dentro ha i tendini, il sangue, i diversi organi.... Più si scoprono parti più piccole, più si va avanti nell'affinare il ragionamento...*

Alessandro: *Andare nel microscopico vuol dire cercare le cause di ciò che succede nel macroscopico... Quindi magari, se alzo il braccio, vado nel microscopico per vedere perché alzo il braccio, e a questo concorrono i tendini, le ossa, i muscoli... fino ad arrivare magari alle cellule...*

Bruno: *Sì, sì...*

Olivia Levrini è preoccupata che la convergenza su questa prospettiva lasci in ombra qualcosa che invece già in precedenza, con riferimento alla fisica dell'atmosfera, era stato accennato. Decide dunque di intervenire per chiedere se tutti sono d'accordo su questa prospettiva, e la chiama con il suo nome tecnico, epistemologico: *riduzionismo*. Bruno, che in precedenza aveva assentito al discorso di Alessandro, cerca di sostenere la verità della sua argomentazione.

Bruno: *Forse non è sempre possibile, ma quando è possibile riesci a capire a fondo il macroscopico...*

Ma l'intervento di Olivia Levrini ha richiamato immagini e concetti già incontrati. In un brusio di fondo si sentono le parole *il tutto non è....*, evocative dell'approccio della complessità: un approccio più olistico, più complesso, più lontano dalla prospettiva di dissezione implicito nell'esempio del braccio.

Elena: *Se lo fai a pezzi e poi lo rimetti insieme rischi di perdere la visione globale... dell'oggetto che stai analizzando... forse devi anche considerarlo nella sua globalità....*

Davide: ... *La frase... non ricordo chi... ha detto che il tutto è sia più che meno delle parti...*

La frase si può certamente attribuire a Edgar Morin, anche se è diventata molto comune e molto citata. Ma l'esempio del braccio è il più adatto a illustrare questo pensiero?

Elena: ... *Se tolgo i vari strati non ho una cipolla...*

Simona: *I vari strati formano la cipolla, ma se divido la cipolla in vari strati non ho più una cipolla, ma strati di cipolla.....* (dopo uno scambio un po' confuso, in cui molti parlano insieme) *Prendiamo una torta... se la guardo così magari è tonda, ha delle strisce e roba dl genere, però per fare quella torta ho usato diversi ingredienti, che presi separatamente non fanno una torta, non posso dire che la farina è una torta... mi serve per fare la torta, come gli strati per la cipolla... Così il corpo umano non è fatto di organi, se io prendo un cuore e lo metto sul tavolo non posso dire che quello è un uomo, così come se prendo una molecola non posso dire che quello è il corpo....*

Si sta andando verso discorsi un po' generici, che suscitano brusii di fondo, sovrapposizione di voci, qualche risata, un commento del loro insegnante (*Si vede che l'ora di ricreazione è vicina...*). Un mio intervento propone di rifocalizzare la discussione sul rapporto tra micro e macro nella termodinamica (*Questa metafora della cipolla, quella della torta.... sono molto appropriate... ma torniamo al discorso del micro e macro in termodinamica...*). L'insegnante, io (e anche Olivia Levrini, come vedremo) siamo forse preoccupati per l'andamento un po' disordinato della discussione, oltre che per il poco tempo disponibile. Si torna così a riflettere sulla termodinamica, ma l'intervento dei docenti non sembra venire accolto come una forzatura: si mantiene una dinamica di scambio tra i ragazzi, di pensiero collettivo.

Bruno: *E' ovvio che la particella di gas non coincide con il gas, ma è utile per comprendere....*

Simona: *E' utile, indubbiamente...*

Bruno: *Ma ho detto che non coincide....*

Alessandra: *Però studiamo il microscopico per studiare le cause del macroscopico: c'è questo effetto, allora andiamo nel microscopico per vedere che cosa ha prodotto questo effetto... secondo me...*

Alessandro: *Il braccio, il braccio...*

Alessandra: *Ad esempio, macroscopicamente l'oggetto si riscalda. Perché? Vai nel microscopico e vedi che le particelle sono in movimento, e quindi... c'è un aumento di calore.*

Il microscopico, dunque, sembra sempre spiegare il macroscopico, nonostante gli accenni prima fatti in tono un po' scherzoso alla irriducibilità reciproca dei livelli di descrizione. Questa, d'altra parte, è la prospettiva classica della fisica, dagli atomisti in poi: spiegare il macroscopico con quello che sta sotto, che magari non si vede: col microscopico, insomma. Dunque, magari senza saperlo, i ragazzi - pensando insieme - ritrovano una prospettiva che ha segnato profondamente la storia della scienza.

Ma è sempre vero che si può scendere quanto si vuole nel microscopico per trovare spiegazioni dei comportamenti macroscopici?

Filippo: *Non sono d'accordo che col micro si può sempre spiegare... se vado a finire nella quantistica cambiano le leggi, quindi... non è sempre trasportabile....*

Comunque, la prospettiva riduzionistica sembra trovare conferma anche nella termodinamica, o meglio, nella teoria del calore attraverso la teoria cinetica dei gas... Ma questo è vero anche per l'entropia? Olivia Levrini pone la questione in modo diretto: *L'entropia si può interpretare come proprietà delle particelle, così come l'energia cinetica?*

Elena: *Secondo me è una cosa che non ha senso: non puoi capire perché succede così, non puoi analizzare il fenomeno nei minimi particolari... è una cosa che non ha senso... sarebbe una cosa difficile da vedere nel microscopico, secondo me....*

Davide: Il disordine... non dico che sia una proprietà della particella, però dico che il movimento di una singola particella può determinare il cambiamento di questa proprietà del sistema... la particella fa parte del sistema...

La fine dell'ora pone forzatamente termine alla discussione che, a giudicare del clima che si era creato, avrebbe potuto proseguire ancora ragionando sulla relazione tra i livelli di descrizione, sulla loro relazione (come ha segnalato Davide), ma anche sulla loro irriducibilità reciproca (come diceva Bruno all'inizio dell'incontro: la modellizzazione a livello microscopico *permette di guardare da un punto di vista diverso, e anche più originale*).

L'analisi ha messo in evidenza come gli studenti siano stati in grado di gestire la discussione mettendo in atto dinamiche non contrappositive, ma di pensiero collettivo anche appassionato. Sono emerse dinamiche personali e interpersonali molto diverse da quelle evidenziate nelle attività all'inizio del percorso; dinamiche che hanno mostrato un coinvolgimento che va ben oltre la dimensione disciplinare e in cui ciascuno si è sentito libero di esprimere la propria posizione personale.

9.4. La voce dell'insegnante

Alla fine del percorso è stato intervistato l'insegnante per capire quali motivazioni lo hanno spinto a intraprendere la sperimentazione, che cosa ha significato per lui mettersi nelle condizioni di "confrontabilità", e quale è stato il bilancio finale.

Le motivazioni che hanno spinto ad intraprendere la sperimentazione.

C'è stata certamente un'esigenza di carattere generale legata alla difficoltà di coinvolgere, appassionare, interessare una generazione sempre più lontana e demotivata rispetto ad un insegnamento trasmissivo.

“La voglia di rinnovare la didattica, perché è ormai evidente che le nuove generazioni parlano un linguaggio di conoscenza-apprendimento a noi insegnanti in gran parte oscuro.”

Ma c'è stata anche un'esigenza più strettamente disciplinare legata al modo in cui si insegna fisica, sempre più trasmissiva e sempre meno palestra di pensiero. Infine, un'esigenza, secondo la mia esperienza di insegnante, avvertita da molti docenti: la voglia di sentirsi parte di un gruppo in cui la propria professionalità e il proprio ruolo siano tenuti in seria considerazione.

“La voglia di lavorare in équipe.”

I dubbi e le perplessità prima di iniziare.

Prima di iniziare la sperimentazione l'insegnante sentiva certamente l'esigenza di un rinnovamento ma tanti erano anche i dubbi e le perplessità, legati soprattutto al fatto di dovere portare in classe un percorso condiviso certamente nella struttura generale, ma del quale sfuggivano i dettagli, alcuni dei quali critici.

Era presente una perplessità, se così si può dire, rispetto a un percorso al quale non ero abituato e che andava portato in classe già in gran parte metabolizzato da parte mia.

Il percorso non è strutturato in modo da poter essere trasmesso a un altro insegnante come avviene per l'utilizzo di tutorial per la comprensione di concetti che sono locali (cfr. capitolo 2). C'è la necessità da parte dell'insegnante di appropriarsi di questo percorso nel senso che deve essere in grado di renderlo *sensato per se stesso* e per *il contesto sociale* della classe. Deve trovare i propri spazi di libertà per rendere il percorso compatibile con i propri gusti e il proprio modo di stare in classe, ma questo deve avvenire entro i vincoli del percorso che non possono essere snaturati.

Deve essere consapevole dei nodi concettuali da sciogliere/analizzare (sia quelli legati alle difficoltà degli studenti, sia quelli interni alla disciplina); deve trovare coerenze locali-globali: dare senso a ciò che si fa localmente in una prospettiva/programmazione più ampia; deve essere in grado di muoversi su piani diversi (epistemologico, metacognitivo ...), e non solo su quello strettamente disciplinare.

Sulla ristrutturazione disciplinare

Dalle parole dell'insegnante si coglie come il percorso sia stato vissuto non solo per ripensare ai contenuti disciplinari, ma anche come un modo nuovo e diverso di stare in classe.

La ristrutturazione disciplinare mi è parsa utile.

Per ristrutturazione disciplinare ho inteso: un ripensamento della successione dei nodi concettuali relativi alla termodinamica che, rispetto alla scansione seguita solitamente, risulta differente; il coinvolgimento degli studenti in maniera più diretta rispetto alla loro relazione con i concetti; il coinvolgimento di più voci (docenti) che hanno lavorato al percorso. [...]

Mi ero già posto il problema di valorizzare le potenzialità che ciascuno studente ha, in modo tale da sfruttarle ai fini della comprensione dei vari argomenti, ma senza mai trovare soluzione, probabilmente per una mancanza di condivisione di intenti con i colleghi.”

La ristrutturazione disciplinare è tale da permettere di mettere in campo quelle particolari attività di classe che determinano specifiche modalità di interazione insegnante/studente e studente/studente.

“ La ristrutturazione, nel senso detto sopra, è di per sé una nuova strategia, con la quale ho avuto modo di osservare forse meglio l'interazione tra studenti. Questo percorso certamente cambia le dinamiche all'interno della classe, perché impone agli studenti di prendere posizioni personali, cosa alla quale non sono abituati.

Le relazioni tra studenti sono cambiate: non so dire con certezza se la causa principale sia legata al percorso di fisica, ma senza dubbio questo ha giocato un suo ruolo a mio giudizio importante. Non ho mai riscontrato negli studenti sentimenti di repulsione verso questo percorso, pur faticoso.

In definitiva, è la ristrutturazione disciplinare che, mettendo in campo precise forme di complessità produttiva (basata su multi-dimensionalità, multi-prospettiva e

longitudinalità), sotto l'orchestrazione dell'insegnante, diventa mediatrice delle dinamiche individuali e collettive all'interno della classe.

Conclusioni

Le teorie sono il nostro modo caratteristico di guardare razionalmente il mondo e di correlarci con esso; non ci danno l'obiettività della realtà, ma ce ne danno una comprensione che deve essere fonte di meraviglia. La nostra civiltà finirà solo quando smetteremo di produrre teorie. Lo ripeto: la teoria è il segno dell'atteggiamento della nostra cultura verso ciò che ci circonda, un continuo stupore, una meraviglia, che genera desiderio di conoscenza.

(Giordano, 2012)

Il lavoro di ricerca si colloca all'interno dell'area "Didattica della Fisica" e ha alla base la convinzione – sostenuta sia dalla mia professione di insegnante sia dalla ricerca del gruppo in Didattica della Fisica dell'Università di Bologna con cui si è condiviso il lavoro – che l'apprendimento *di e in* una disciplina scientifica possa andare ben oltre la comprensione del solo contenuto disciplinare e acquisire un significato più ampio: contribuire alla costruzione di un progetto di crescita personale culturale e sociale. Questa convinzione sottende una precisa immagine di scienza e, in particolare, della fisica: la fisica come disciplina sufficientemente complessa da poter essere modellata e ricostruita seguendo scopi e gusti personali, pur rimanendo aderenti alle regole e ai vincoli disciplinari; la fisica pertanto, non come un insieme di verità indiscusse e indiscutibili, ma come costruzione di pensiero, come *storie di concetti*.

Il lavoro di ricerca analizza sperimentazioni di percorsi di termodinamica in classi quarte di liceo scientifico. I percorsi sono stati progettati seguendo precisi criteri che, in accordo con l'immagine di scienza che si vuole trasmettere, permettano di creare un ambiente di apprendimento sufficientemente ricco e stimolante così che ogni studente possa integrare le conoscenze specifiche in un percorso personale più ampio. I materiali sono stati progettati in modo da valorizzare alcune forme di complessità – forme di *complessità produttive* – in grado di tener conto sia della complessità intrinseca del pensiero scientifico, sia della complessità del processo di apprendimento come processo

personale. Queste forme di complessità, permettendo di introdurre, oltre alla dimensione strettamente disciplinare, altre dimensioni, quali quella epistemologica, meta-cognitiva ed emotiva, si sono rivelate produttive per favorire un coinvolgimento proficuo anche sul piano strettamente disciplinare.

Le forme di complessità sono state rese operative mettendo in campo diversi approcci: l'*approccio multi-prospettico* – gli stessi contenuti (fenomenologia) analizzati da diverse prospettive confrontati sistematicamente, in modo da mostrare le loro peculiarità e la loro compatibilità –; l'*approccio multi-dimensionale* – le diverse prospettive analizzate e confrontate a diversi livelli, per le loro implicazioni concettuali, sperimentali e formali, ma anche per le loro peculiarità filosofiche ed epistemologiche–; l'*approccio longitudinale* – il “gioco della modellizzazione” affrontato mettendo in atto un sistematico confronto con altre modellizzazioni già studiate –; l'*approccio trasversale* – le implicazioni in altri ambiti disciplinari sottolineando gli aspetti culturali della conoscenza fisica.

Per potere mettere in campo i diversi approcci, dopo un'analisi dettagliata della letteratura in didattica della fisica sull'insegnamento/apprendimento della termodinamica, è stato necessario farsi guidare da quello che si può chiamare “*un gioco di coerenza locale – globale*”: dare senso a ciò che si fa localmente – disciplinarmente – in una prospettiva culturale più ampia e viceversa. Il “*gioco locale – globale*” si è esplicitato in una sorta di intreccio circolare tra l'analisi delle peculiarità disciplinari e l'analisi di come, quando e perché introdurre certe forme di complessità.

Una parte molto consistente del lavoro riguarda l'analisi sistematica dei dati raccolti durante le sperimentazioni.

L'analisi, accompagnata da attente riflessioni sul piano metodologico, ha portato in primo luogo a definire e dare operatività al concetto di *appropriazione di un discorso scientifico*.

Triangolando la letteratura di ricerca riguardante il termine *appropriazione* con quanto stava emergendo dall'analisi sistematica dei dati, si sono definiti dei costrutti teorici

operativi – *marcatori* – che hanno reso la definizione di appropriazione più chiara, ricca di significato e applicabile ad altri corpi di dati.

Nello specifico i marcatori riconosciuti nei dati relativi agli studenti che si sono appropriati del discorso termodinamico sono i seguenti:

il discorso di ciascuno studente è espressione di un'idea *autentica* e *idiosincratica* (marcatore A); è *fondato sul piano disciplinare* (marcatore B); è “*spesso*” nel senso che include elementi che appartengono alla dimensione meta-cognitiva ed epistemologica (marcatore C); *non è occasionale* nel senso che è coerentemente portato avanti nelle diverse attività di classe (marcatore D); è veicolo *di relazioni sociali* nel senso che posiziona lo studente all'interno della comunità di classe (marcatore E).

I marcatori hanno permesso di specificare e rendere operativa la definizione di *appropriazione di un discorso scientifico*:

Appropriazione come processo denso e complesso (C) in cui il discorso scientifico (parole e frasi della scienza) è trasformato al fine di essere *incorporato* all'interno di una propria storia personale (D).

Questo processo è caratterizzato dal fatto che ogni singolo studente:

- popoli il discorso scientifico di scopi, gusti e intenzioni personali (A);
- rispetti le regole e i vincoli disciplinari (B);
- si posizioni in dinamiche sociali e inter-personali (E).

I marcatori che sono stati individuati mostrano come l'appropriazione avvenga all'interno di uno spazio multidimensionale che coinvolge la dimensione concettuale/disciplinare (marcatore B) ma anche quella metacognitiva/ epistemologica (marcatore C), “biografica” (marcatori A e D) e sociale (marcatore E).

L'analisi sistematica dei dati ha, in sostanza, mostrato come lo studio *della e nella* fisica possa contribuire alla costruzione di un'identità personale di cui l'individuo è responsabile, in una narrazione di sé creata e ricreata costantemente in una interazione dialogica tra le persone. Le parole e le espressioni, scelte dagli studenti per esprimere le loro idee idiosincratiche e allineare le diverse dimensioni, non sono state *prese in prestito* dall'insegnate, ma sono scaturite da una narrazione personale e dalle relazioni interpersonali all'interno della storia di classe.

Il fatto che lo studio di una disciplina come la fisica possa contribuire alla formazione di una identità personale non appartiene alla consapevolezza diffusa. Nella pratica dell'insegnamento, il regime di verità che si suppone avere la scienza, il suo linguaggio assunto come indubitabile, certo, oggettivo, rischiano di creare una barriera tra il discorso scientifico, che rimane un universo di discorso "esterno" a cui non è possibile attribuire significati personali, e la costruzione di un'identità personale.

L'analisi dei dati si è quindi focalizzata sia sulle dinamiche di classe – individuali e collettive – sia sul loro intreccio e si è mossa verso la costruzione di una "teoria locale" dell'appropriazione (*come, quando e perché* avviene l'appropriazione).

A livello di dinamiche individuali, l'analisi ha mostrato che gli studenti che si sono appropriati del discorso termodinamico sono stati in grado di mettere in campo abilità meta-cognitive. Sono stati in grado, in un percorso personale, di riconoscere le proprie incoerenze e difficoltà (riconoscere situazioni di disallineamento); sono stati intellettualmente ed emotivamente in grado di accettarle mostrando un atteggiamento di fiducia verso se stessi e verso tutta la comunità classe; sono stati in grado di prendersi cura delle proprie difficoltà, di considerarle al momento opportuno cercando e applicando consapevolmente un criterio personale per risolverle (allineamento come atto creativo); sono stati in grado di costruire consapevolmente una narrazione personale con l'obiettivo di rielaborare il modo in cui sono state risolte le loro difficoltà e incoerenze.

Le dinamiche individuali messe in campo dagli studenti sembrano mutate dalle dinamiche collettive in cui si è condivisa una precisa idea di apprendimento che implica sia il riconoscimento di situazioni di disallineamento sia la necessità di farsi personalmente carico, in una ricerca di coerenza, di riallineare e confrontare le diverse dimensioni (concettuale-disciplinare, epistemologica, emotiva).

Gli studenti che si sono appropriati del discorso termodinamico sono stati disponibili a riconoscere, nello scenario concettuale, lo spazio per diversi possibili percorsi di conoscenza, sono stati capaci di muoversi longitudinalmente da dettagli locali a visioni

globali, si sono messi nell'atteggiamento emotivo giusto per farsi carico del proprio apprendimento e per cercare di immaginare e anticipare dove i diversi percorsi di conoscenza potevano condurre.

In un'ottica Vygotskijana, sembra esserci stata una fusione creativa tra azione collettiva e coscienza personale.

In sintesi, l'analisi dei dati ha messo in luce come le dinamiche collettive hanno influenzato le dinamiche personali e hanno favorito lo svilupparsi di *quelle particolari* abilità meta-cognitive che hanno contribuito a *quel particolare* processo di appropriazione e, in una sorta di circolarità, come le dinamiche personali dei singoli studenti hanno positivamente influenzato la gestione e l'orchestrazione delle dinamiche collettive. La gestione e l'orchestrazione delle dinamiche collettive è tuttavia stata possibile proprio per le particolari attività messe in campo e rese possibili grazie alla specifica ristrutturazione disciplinare che sottende una precisa visione epistemologica di scienza.

Nell'ultima parte del lavoro è stato affrontato lo spinoso problema della trasferibilità e riproducibilità di un'esperienza d'insegnamento: la sperimentazione è stata riproposta da un insegnante che non aveva partecipato alla progettazione del percorso, ma che condivide la filosofia di fondo della ristrutturazione disciplinare e la visione di insegnamento/apprendimento che aveva guidato la prima sperimentazione.

Da un punto di vista metodologico sono state portate avanti, in parallelo e in modo intrinsecamente circolare, sia la valutazione della confrontabilità del contesto, sia l'analisi di ciò che stava emergendo in classe in relazione alla prima sperimentazione.

Le dinamiche individuali e collettive della classe, messe in luce dall'analisi iniziale del contesto, sembravano sottendere uno stile di apprendimento impersonale e distaccato in cui non c'è posto per una propria idea, ma è sufficiente riportare parole e frasi dell'insegnante o del libro di testo senza coinvolgimento emotivo e senza alcun tentativo di lettura critica.

L'analisi ha mostrato come il coinvolgimento degli studenti sia stato positivo e sia andato crescendo durante tutta la sperimentazione.

Il percorso, aprendo altre dimensioni rispetto a quella strettamente disciplinare, ha permesso di creare situazioni che potremmo definire di pensiero collettivo e in cui le dinamiche personali e interpersonali hanno mostrato un coinvolgimento che va ben oltre la dimensione disciplinare.

Un'ultima riflessione riguarda l'apporto originale di questo studio rispetto alla realtà scolastica: la messa in campo di specifiche forme di complessità non è, come spesso si pensa, un fattore destabilizzante e demotivante, ma piuttosto aiuta gli studenti a mettersi in gioco sia rispetto a se stessi, sia rispetto alla classe; non solo è possibile, nell'ordinaria didattica in classe, aprire la dimensione meta-disciplinare (epistemologica, meta-cognitiva e affettiva della scienza) ma questa è importante per un apprendimento produttivo.

Bibliografia

Amin, T., Jeppsson, F., Haglund, J., Strömdahl, H. (2010). Metaphorical resources for understanding entropy and the second law of Thermodynamics. 7th Biennial Meeting of the Conceptual Change Special Interest Group, European Association for Research on Learning and Instruction. Leuven. Belgium. 24-27 May. 2010.

Anfara, V. A., Brown, K. M., Mangione, T. L. (2002). Qualitative Analysis on Stage: Making the Research Process More Public. *Educational Researcher*. 31(7). 28-38
DOI: 10.3102/0013189X031007028.

Azevedo, F. S. (2006). Personal Excursions: Investigating the Dynamics of Student Engagement. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*. 11. 57-98.

Bakhtin, M. (1981). Discourse in the novel (M. Holquist & C. Emerson, Trans.). In M. Holquist (Ed.). *The dialogic imagination*. Austin. University of Texas Press. 259-422.

Balzano, E., Guidoni, P., Minichini, C. (2008). I modi del pensare: comune, fenomenologico, per modelli..., In P. Guidoni & O. Levrini (Eds.). *Approcci e proposte per l'insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario, dal progetto PRIN F 21*. Udine. Italy. Forum Editrice. 87-95.

Bauman, Z. (2000). *Liquid Modernity*. Cambridge. Polity Press.

Bauman, Z. (2001). *The individualized society*. Cambridge. Polity Press.

Blumer, H. (1969). *Symbolic Interactionism. Perspective and Method*. Berkeley. University of California Press.

Bocchi, G., Ceruti M. (a cura di). (1985). *La sfida della complessità*. Feltrinelli. Milano.

- Brickhouse, N. W., Lowery, P. A., Schultz, K. (2000). What kind of girl does science? The construction of school science identities. *Journal of Research in Science Teaching*. 37. 441-458.
- Brookes, T. D., Etkina, E. (2007). Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*. 3(010105). 1-16.
- Brown, A. L. (1987). Metacognition, executive control, self-regulation, and other more mysterious mechanisms. In F. E. Weinert & R. H. Kluwe (Eds.), *Metacognition, motivation, and understanding*. Hillsdale. New Jersey. Lawrence Erlbaum Associates.
- Brousseau, C., Viard, J. (1992). Quelques réflexions sur le concept d'entropie issues d'un enseignement de thermodynamique. *Enseñanza de las Ciencias*. 10(1). 13-16.
- Bruner, J. (2003). *La mente a più dimensioni*. Editori Laterza. Roma-Bari.
- Cazden, C. B., Beck, S. W. (2003). Classroom discourse. In A. C. Graesser, M.A.
- Ceruti, M. (1989). *Il vincolo e la possibilità*. Feltrinelli. Milano.
- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: why some misconceptions are robust. *The Journal of the Learning Sciences*. 14(2). 161-199.
- Christensen, W. M., Meltzer, D. E., Ogilvie, C. A. (2009). Student ideas regarding entropy and the second law of thermodynamics in an introductory physics course. *American Journal of Physics*. 77. 907-917.
- Cipolla, C., de Lillo A. (a cura di). (1996). *Il sociologo e le sirene. La sfida dei metodi qualitativi*. Angeli Editore. Milano.

- Cipriani, R. (a cura di). (2008). *L'analisi qualitativa. Teorie metodi applicazioni*. Armando Editore.
- Cobb, P. J., Confrey, J., diSessa, A. A., Lehrer, R., Schauble, L. (2003). Design Experiments in Educational Research. *Educational Researcher*. 32(1). 9-13.
- Cobb, P. J., Gresalfi, M., Hodge, L. L. (2009). An interpretive scheme for analyzing the identities that students develop in mathematics classrooms. *Journal for Research in Mathematics Education*. 40(1). 40-68.
- Cochran, M. J., Heron, P. R. L. (2006). Development and assessment of research-based tutorials on heat engines and the second law of thermodynamics. *American Journal of Physics*. 74(8). 734.
- Confrey, J. (2006). The evolution of design studies as methodology. In Sawyer (eds.). *The Cambridge Handbook of The Learning Sciences*. Cambridge University Press. 135-152.
- Corbetta, P. (1999). *Metodologia e tecniche della ricerca sociale*. Il Mulino. Bologna.
- De Ambrosis, A., Levrini, O. (2010). How physics teachers approach innovation: An empirical study for reconstructing the appropriation path in the case of special relativity. *Physical Review*. STPER. 020107-1-11.
- De Gregorio, E., Lattanzi, P. F. (2011). *Programmi per la Ricerca Qualitativa*. Franco Angeli Editore.
- Denzin, N. K., Lincoln, Y. S. (1994). (2000 2nd ed.). *Handbook of qualitative research*. Thousand Oaks. CA. Sage.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*. 10. 272.

- diSessa, A. A., Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*. 20(10). 1155-1191.
- diSessa, A. A., Cobb, P. J. (2004). Ontological innovation and the role of theory in design experiments. *The Journal of Learning Sciences*. 13(1). 77-103.
- diSessa, A. A. (2007). An Interactional Analysis of Clinical Interviewing, *Cognition and Instruction*. 25(4). 523–565.
- Einstein, A. (1919). Time, Space, and Gravitation. *Times* (London). 28 November.
- Engle, R. A., Conant, F. R. (2002). Guiding Principles for Fostering Productive Disciplinary Engagement: Explaining an Emergent Argument in a Community of Learners Classroom. *Cognition and Instruction*. 20:4. 399-483.
- Erickson, G., Tiberghien, A. (1985). Heat and Temperature. In R. Driver, E. Guesne, A. Tiberghien (Eds.). *Children's Ideas in Science*. Open University Press. Milton Keynes. Philadelphia. 52-84.
- Fantini, P., Grimellini Tomasini, N., Levrini, O., Scorza, F. (2005). L'*Elettrodinamica dei corpi in movimento* in classe: studenti di Liceo a confronto con fisica, epistemologia e storia del pensiero scientifico. *La Fisica nella Scuola*. XXXVIII. N.1. 118-136.
- Fantini, P., Levrini, O., (2012). Metacognition in and for appropriating physics knowledge: An empirical study on thermodynamics. *Proceedings of the 5th Biennial Meeting of the EARLI Special Interest Group-Metacognition*. Milano.
- Fantini, P., Levin, M., Levrini, O., Tasquier, G., (2014). Pulling the rope and letting it go: analyzing classroom dynamics that foster appropriation. *E-Book Proceedings of the ESERA 2013 Conference*. Nicosia. Cyprus. 2-7 September. 2013.

- Feyerabend, P. K. (1975). *Against Method. Outline of an Anarchist Theory of Knowledge*. NBL Edition. London. (Trad. it. *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza*. Feltrinelli. Milano. 1979).
- Feyerabend, P. K. (1989). *Dialogo sul metodo*. Laterza. Roma-Bari.
- Gardner, H. (1993). *Educare al comprendere. Stereotipi infantili e apprendimento scolastico*. Feltrinelli. Milano.
- Gee, J. P. (2001). Identity as an analytic lens for research in education. *Review of Research in Education*. 25. 99-125.
- Giannetto, E., Tarsitani, C., Vicentini Missoni, M. (1992). The Relations between Epistemology, History of Science and Science Teaching from the Point of View of the Research on Mental Representations. Skip Hills (ed.). *History & Philosophy of Science in Science Education*. Queen's Univ. Kingston. 359-374.
- Giannetto, E. (2005). *Saggi di storie del pensiero scientifico*. Bergamo University press. Edizioni Sestante. Bergamo.
- Giannetto, E. (2010). *Un fisico delle origini. Heidegger, la scienza e la Natura*. Donzelli Editore.
- Giddens, A. (1991). *Modernity and Self-Identity: Self and Society in the Late Modern Age*. Stanford University Press.
- Giordano, G. (2012). *Storie di Concetti*. Le Lettere. Firenze.
- Glaser, B. G., Strauss, A. L. (1967). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Chicago: Aldine Publishing Company. (trad. it. *La scoperta della Gounded Theory. Strategie per la ricerca qualitativa*. A cura di Strati A., Armando Editore. 2009).

- Greco, P. (2011). *Le nuove grammatiche della fantasia. La scuola nell'era della tecnologia digitale*. Rivista Rocca. Vol. 1 Dicembre.
- Grimellini Tomasini, N., Segrè, G. (a cura di). (1991). *Conoscenze scientifiche : le rappresentazioni mentali degli studenti*. La Nuova Italia Scientifica. Firenze.
- Grimellini Tomasini, N., (2004). Teaching Physics from a cultural perspective: Examples from research on physics education. *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*. Course CLVI. E. F. Redish, M. Vicentini (Eds) IOS Press. Amsterdam.
- Guidoni, P., Levrini, O. (eds.) (2008). *Approcci e proposte per l'insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario, dal progetto PRIN F 21*. Udine. Italy. Forum Editrice.
- Gunstone, R. F. (1994). The Importance of Specific Science Content in the Enhancement of Metacognition. In: P. Fensham, R. Gunstone, & R. White (Eds.). *The Content of Science*. (London, Falmer).
- Haglund, J., Jeppsson, F., Strömdahl, H. (2010). Different Sense of Entropy – implications for Educations. Open Access. Entropy ISSN 1099-4300. www.mdpi.com/journal/entropy.
- Holland, D., Lachicotte, W., Skinner, D., Cain, C. (1998). *Identity and agency in cultural worlds*. Cambridge. MA: Harvard University Press.
- Jenkins, H. (2010). *Culture partecipative e competenze digitali*. Guerini Studio.
- Jeppsson, F., Haglund, J., Amin, T. G., Strömdahl, H. (2012). Exploring the Use of Conceptual Metaphors in Solving Problems on Entropy. *The Journal of Learning Sciences*.

- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., Komorek, M. (1996). Educational Reconstruction bringing together issues of scientific clarification and students' conceptions. Paper presented at the Annual Meeting of NARST. St. Louis (MI). April 1996.
- Kautz, H., Heron, P. R. L., Loverude, M. E., McDermott, L. C. (2005a). Student understanding of the ideal gas law, Part I: A macroscopic perspective. *American Journal of Physics*. 73. 1055–1063.
- Kautz, H., Heron, P. R. L., Loverude, M. E., McDermott, L. C. (2005b). Student understanding of the ideal gas law, Part II: A microscopic perspective. *American Journal of Physics*. 73. 1064–1071.
- Kesidou, S., Duit, R. (1993). Students' Conceptions of the Second Law of Thermodynamics – An Interpretive Study. *Journal Research Science Teaching*. 30(1). 85-106.
- Lakoff, G., Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago University Press. (Ed. It. *Metafora e vita quotidiana*. Bompiani Editore. 2004. 2 ed.)
- Lakoff, G. (1992). The Contemporary Theory of Metaphor. Ortony, A. (ed.) *Metaphor and Thought* (2nd edition). Cambridge University Press.
- Leff, H.S. (2007) Entropy, its language and interpretation. *Foundations of Physics*. 37. 1744-1766.
- Levrini, O. (2002). The substantialist view of spacetime proposed by Minkowski and its educational implications. *Science & Education*. 11. 6. 601-617.
- Levrini, O., diSessa, A. A. (2008). How Students Learn from Multiple Contexts and Definitions: Proper Time as a Coordination Class. *Physical Review*. STPER. 4. 010107-1-18.

- Levrini, O., Altamore, A., Balzano, E., Bertozzi, E., Gagliardi, M., Giordano, E., Guidoni, P., Rinaudo, G., Tarsitani, C. (2009). Looking at the physics curriculum in terms of framing ideas, *Proceedings GIREP 2008 International Conference*, MPTL 13th Workshop. Nicosia. Cyprus. 18-22 August. 2008.
- Levrini, O., Fantini, P., Pecori, B., Gagliardi, M., Tasquier, G., Scarongella, M. T. (2010). A Longitudinal Approach to Appropriation of Science Ideas: A Study of Students' Trajectories in Thermodynamics. In Gomez, K., Lyons, L., & Radinsky, J. (Eds.) *Learning in the Disciplines: Proceedings of the 9th International Conference of the Learning Sciences (ICLS 2010) - Volume 1, Full Papers*. International Society of the Learning Sciences: Chicago IL. 572-579. (ISBN: 978-0-578-06462-8).
- Levrini, O., Fantini, P., Gagliardi, M., Tasquier, G., Pecori, B. (2011 a). Toward a theoretical explanation of the interplay between the collective and the individual dynamics in physics learning. In C. Bruguière, A. Tiberghien & P. Clément (Eds.). *E-Book Proceedings of the ESERA 2011 Conference: Science learning and Citizenship*. Part 3 (co-ed. Editors of the strand chapter). (pp.102-108) Lyon. France. European Science Education Research Association.
- Levrini, O., Tasquier, G., Pecori, B., Fantini, P. (2011 b). From heuristics to humble theories in physics education: the case of modelling personal appropriation of thermodynamics in naturalistic settings. *Proceedings Twelfth International Symposium. Frontiers of Fundamentals Physics (FFP12)*. Udine. 21-23 November. 2011.
- Levrini, O., Fantini, P. (2013). What Metacognitive Competences Trigger and Support Personal Appropriation of Physics Content Knowledge?. NARST Annual International Conference. Rio Grande. Puerto Rico. 6-9 April. 2013.

- Levrini, O., Fantini, P. (2013). Encountering Productive Forms of Complexity in Learning Modern Physics. *Science & Education*. 22 (8). 1895–1910. DOI: 10.1007/s11191-013-9587-4.
- Levin M., Fantini P., Tasquier G., Levrini O. (2013). Tuning individual and collective dynamics in classroom discussions: An empirical study. Paper presented at *15th Biennial Conference EARLI 2013*. Munich. 27-31 August. 2013.
- Levrini, O., Fantini, P., Pecori, B., Tasquier, G. (accepted). Forms of productive complexity as criteria for educational reconstruction: the design of a teaching proposal on thermodynamics. *Procedia-Social and Behavioral Journal*.
- Lijnse, P., Licht, P., de Vos, W., Waarlo, A. (eds.) (1990), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*. Utrecht. Holland. CD-β Press.
- Lincoln, Y. S., Guba, E. G. (1985). *Naturalistic Inquiry*. Beverly Hills Sage.
- Loverude, M. E. (2009). Students understanding of basic probability concepts in an upper-division thermal physics course. Proceedings PERC.
- Loverude, M. E., Kautz, C. H., Heron, P. R. L. (2002). Student understanding of the first law of thermodynamics: Relating work to the adiabatic compression of an ideal gas. *American Journal of Physics*. 70. 137-148.
- Malterud, K. (2001). *Qualitative research: standards, challenges and guidelines*. The Lancet. 358. (9280). 483-488.
- Marradi, A. (2007). *Manuale di metodologia delle scienze sociali*. Il Mulino. Bologna.
- Meltzer, D. (2004). Investigation of students' reasoning regarding heat, work, and the first law of thermodynamics in an introductory calculus-based general physics course. *American Journal of Physics*. 72. 1432-1446.

- Morin, E. (1977). *La méthode I. La Nature della Nature*. Le Seuil. Paris. (trad. it. parz. *Il metodo. Ordine, disordine, organizzazione*. Feltrinelli. Milano. 1983)
- Morin, E. (1989). *La conoscenza della conoscenza*. Feltrinelli. Milano.
- Morin, E. (1993). *Introduzione al pensiero complesso*. Sperling e Kupfer. Milano.
- Morin, E. (2001). *I sette saperi necessari all'educazione del futuro*. Raffaello Cortina Editore.
- Nasir, N. S., Resebery, A. S., Warren, B., Lee, C. D. (2006). Learning as a Cultural Process. In Sawyer K. (ed.). *The Cambridge Handbook of The Learning Sciences*. Cambridge University Press. 489-504.
- Nasir, N. S., Hand, V. (2008). From the Court to the Classroom: Opportunities for Engagement, Learning, and Identity in Basketball and Classroom Mathematics. *Journal of the Learning Sciences*. 17:2. 143-179. DOI: 10.1080/10508400801986108.
- O'Connor, M. C., Michaels, S. (1996). Shifting participant frameworks: Orchestrating thinking practices in group discussion. In D. Hicks (Ed.), *Discourse, learning, and schooling* (pp. 63-103). New York. Cambridge University Press.
- Parnafes, O., diSessa, A. A. (2013). Microgenetic learning analysis: A methodology for studying knowledge in transition. *Human Development*. 56(1). 5–37.
- Pollock, E. B., Thompson, J. R., Mountcastle, D. B. (2007). Student Understanding Of The Physics And Mathematics Of Process Variables In P-V Diagrams. *Proceedings of the 2007 Physics Education Research Conference*. Greensboro. New York. AIP Conf. Proc. 951. 152-155.

- Prigogine, I., Stengers, I. (1979). *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la Science*. Gallimard. Paris. (trad. it. *La nuova alleanza. Metamorfosi della scienza*. Giulio Einaudi. Torino. 1981).
- Prigogine, I. (1980). *From Being to Becoming*. Freeman. San Francisco. (trad. it. *Dall'essere al divenire*. Giulio Einaudi. Torino. 1986).
- Prigogine, I., Stengers I. (1988). *Entre le temps et l'éternité*. Librairie Arthème Fayard. Paris (trad. it. *Tra il tempo e l'eternità*. Bollati Boringhieri. Torino. 1989).
- Prigogine, I. (1996). *La fin des certitudes. Temps, chaos et les lois de la nature*. Edition Odile Jacob. Paris. (Trad. it. *La fine delle certezze*. Bollati Boringhieri. Torino. 1997).
- Prigogine, I., Kondepudi, D. (2002). *Termodinamica*. Bollati Boringhieri. Torino.
- Radford, L. (2012). Education and the Illusion of Emancipation. *Educational Studies in Mathematics*. 80. 101-118. DOI: 10.1007/s10649-011-9380-8.
- Ricolfi, L. (a cura di) (1997). *La Ricerca Qualitativa*. La Nuova Italia Scientifica. Roma.
- Robertson, A. D., Shaffer, P. S. (2012). *Qualitative research: standards, challenges and guidelines*. University student and K-12 teacher reasoning about the basic tenets of kinetic-molecular theory, Part I: Volume of an ideal gas. *American Journal of Physics*. 81(4). 303-312.
- Rogoff, B. (1995). Observing sociocultural activity on three planes: Participatory appropriation, guided participation and apprenticeship. In J. V. Wertsch, P. del Rio & A. Alvarez (Eds.). *Sociocultural studies of mind*. Cambridge. England. Cambridge University Press. 139-164.

- Rozier, S., Viennot, L. (1991). Students' reasoning in thermodynamics. *International Journal Science Education*. 13. 159-170.
- Scarongella, M. T. (2009). *L'insegnamento della termodinamica a livello di scuola Secondaria Superiore: uno studio sull'efficacia didattica del confronto tra approccio macroscopico e approccio microscopico*. Tesi di laurea in Fisica. Dipartimento di Fisica. Università di Bologna.
- Schreiner, C., Sjøberg, S. (2007). Science education and youth's identity construction - two incompatible projects? In D. Corrigan, J. Dillon, & R. Gunstone, (Eds.), *The Re-emergence of Values in the Science Curriculum*. Rotterdam. Sense Publishers.
- Sfard, A. (2007). When the Rules of Discourse Change, but Nobody Tells You: Making Sense of Mathematics Learning From a Commognitive Standpoint. *The Journal of the Learning Sciences*. 16(4). 567–615.
- Sfard, A., Prusak, A. (2005). Telling Identities: In Search of an Analytic Tool for Investigating Learning as a Culturally Shaped Activity. *Educational Researcher*. 34: 14 DOI: 10.3102/0013189X034004014.
- Sjøberg, S. (2001). "Why don't they love us any more?" Science and Technology Education: A European high priority political concern!. *Proceedings Third International E.S.E.R.A. Conference*. Thessaloniki. Greece. 19-20.
- Sjøberg, S. (2002). Science and Technology Education - Current Challenges and Possible Solutions, in Jenkins E. (ed). *Innovations in Science and Technology Education*. Vol. VIII. Paris. UNESCO.
- Smith, J., diSessa, A. A., Rochelle, J. (1993). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Sciences*. 3(2). 115-163.

- Styer, D. F. (2000). Insight into Entropy. *American Journal of Physics*. 68(12). 1090-1096.
- Strauss, L., Corbin, J. (1990). *Basics of Qualitative Research. Grounded theory Procedures and Techniques*. Sage. Newbury Park. Ca.
- Tarsitani, C., Busini, D. (1996). Macroscopic vs. Microscopic: a problem of History, Epistemology and Teaching of Physics. In M. Michelini et al. (Eds.). *Proceedings of the GIREP-ICPE '95*. Udine. Italy. Forum Editrice. 281-286.
- Tarsitani, C., Vicentini, M. (1991). *Calore, energia, entropia: le basi concettuali della termodinamica e il loro sviluppo storico*. Franco Angeli. Milano.
- Tarsitani, C., Vicentini, M. (1996). Scientific Mental Representation of Thermodynamics. *Science & Education*. Kluwer Academic Publisher. 51-68.
- Tarsitani, C., Busini, D. (1996), Macroscopic vs. Microscopic: a problem of History, Epistemology and Teaching of Physics. *Proceeding of the GIREP-ICPE '95 Conference on Physics Education*. M. Michelini, S. Pugliese Jona, D. Cobai (eds.). FORUM. Udine. 281-286.
- Tarsitani, C. (1997). La seconda legge della termodinamica tra storia e didattica. *Giornale di Fisica*. XXXVIII. N.3.
- Tarsitani, C. (1997). L'interpretazione di Maxwell della seconda legge della termodinamica. *Quaderno di storia della fisica*. 132-148.
- Tarsitani, C. (2005). Dalla meccanica alla termodinamica: spunti per una riflessione didattica. Pre-Print.
- Tasquier, G. (2009). *Un esperimento di insegnamento della termodinamica in una classe IV liceo scientifico: analisi della fattibilità di un percorso innovativo*. Tesi di

laurea in Fisica. Dipartimento di Fisica. Università di Bologna.

Tasquier, G., Fantini, P., Levin, M., Levrini, O. (2013). "Pulling the rope and letting it go": Analyzing classroom dynamics that foster appropriation. Paper presented at the ESERA 13 Conference. Nicosia. Cyprus. September 2-7. 2013

Tasquier, G., Pongiglione, F., Levrini, O. (2013). Climate change: an educational proposal integrating the physical and social sciences. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 5th World Conference on Educational Sciences. Submitted.

Tyler, A., Evans, E. (2003). *The Semantics of English prepositions: Spatial Scenes, Embodied Meaning and Cognition*. Cambridge University Press. Cambridge. UK.

Wickman, P. O. (2005). *Aesthetic Experience in Science Education: Learning and Meaning-Making as Situated Talk and Action*. Psychology Press.

Wittgenstein, L. (1953). *Philosophische Untersuchungen*. Blackwell, Oxford. (Philosophical Investigations, G.E.M. Anscombe e R. Rhees (eds.). Oxford. 1953).

Wright, P. G. (1970). Entropy and disorder. *Contemporary Physics*. 11. 581-588.

Viennot, L. (1997). Experimental facts and ways of reasoning in thermodynamics: learner's common approach from: Connecting Research in Physics Education with Teacher Education. In A. Tiberghien, E. L. Jossem, J. Barojas (eds). *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*. An I.C.P.E. Book © International Commission Physics Education 1997,1998.

Vicentini Missoni, M. (1992). *Dal calore all'entropia*. La Nuova Italia Scientifica. Firenze.

Vicentini, M., Mayer, M. (a cura di). (1996). *Didattica della Fisica*. La Nuova Italia Scientifica. Firenze.

- Viglietta, L. (1989), Il secondo principio della termodinamica in un corso di fisica a livello di scuola secondaria superiore: un approccio macroscopico. *La fisica nella scuola*. XXII. N. 2.
- Vygotskij, L. S. (1934). Pensiero e linguaggio (ed. it), a cura di Mecacci, L.. Editori Laterza. Roma-Bari.1990.
- Zanarini, G., Serra, R. (1990). *Complex Systems and Cognitive Processes*. Springer Verlag. Heidelberg.
- Zanarini, G. (1990). *Diario di viaggio: auto-organizzazione e livelli di realtà*. Guerini. Milano.
- Zanarini, G. (1992). Immagini del sapere e formazione scientifica. *La fisica nella scuola*. XXV. N. 4.
- Zanarini, G. (1995). Livelli irriducibili: per una epistemologia della complessità. Nuova Civiltà delle Macchine. XIII. 1-2.
- Zanarini, G. (1996). L'entropia tra disordine e ignoranza. Nascita e sviluppo della prospettiva informazionale in fisica. *La fisica nella scuola*. XXIX. 5-18.

Ringraziamenti

Ringrazio l'Università di Bergamo, tutti coloro che in vario modo hanno contribuito alla mia formazione durante gli anni di dottorato e in particolare ringrazio Enrico Giannetto per le belle lezioni e le stimolanti discussioni che mi hanno dato l'opportunità di aprire gli occhi su nuovi mondi. In questi anni di dottorato mi sono arricchita sia come persona sia come insegnante, tornando "sul campo" con nuovi stimoli e maggiori consapovezze sul significato culturale della scienza nella formazione dei giovani.

Ringrazio tutto il gruppo di Didattica della Fisica dell'Università di Bologna, in particolare ringrazio Lella Grimellini Tomasini per avermi fatto comprendere come un insegnante in servizio possa e debba continuare a "ricercare", e Olivia Levrini con la quale ho condiviso tutto il lavoro di ricerca. Olivia mi ha regalato stimoli e occasioni indimenticabili di arricchimento culturale personale e professionale nonché la sua preziosa amicizia.

Ringrazio Giulia Tasquier e Mariana Levin per le belle discussioni e per avermi fatto sentire la loro vicinanza.

Ringrazio Fabio Filippi, insostituibile collega e amico, per avere condiviso con me parte della ricerca.

Ringrazio il preside della mia scuola, Giuseppe Prosperi, per avere sostenuto e apprezzato il mio lavoro.

Ringrazio tutti i dottorandi che ho conosciuto in questi tre anni e in particolare quelli del XXVI ciclo, miei indimenticabili compagni di viaggio.

Infine, ma certamente non per ultimo, un grazie particolare a Gianni Zanarini che mi ha incoraggiato nella scelta di lasciare temporaneamente la scuola per intraprendere questa avventura culturale e mi ha sostenuto durante tutto il percorso. Grazie per gli stimoli, gli interventi in classe durante le sperimentazioni e l'aiuto nella stesura della tesi.