



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

TIROCINIO FORMATIVO ATTIVO

a.a. 2014-2015

*La realtà come ci appare: il Tempo*

Classe A060

Corsista:

Elisa Corteggiani Carpinelli

N. matricola: I02748

Relatore:

Prof. Ilenia Giuseppina Rossetti

## ***Inquadramento teorico***

### ***La realtà come ci appare***

Per molti di noi che amano descrivere e capire il mondo con un metodo razionale, il pensiero logico-scientifico affonda le sue radici nella culla del mediterraneo. Dalle testimonianze che sono giunte fino a noi infatti crediamo che furono i milesi i primi a comprendere che usando in maniera accorta l'osservazione e la ragione, evitando di cercare nella fantasia, nei miti antichi e nella religione le risposte a quello che non sappiamo, possiamo formare e correggere ripetutamente un nostro punto di vista sul mondo, scoprire aspetti della realtà che a uno sguardo comune restano invisibili e imparare cose nuove<sup>1</sup>. In questo stile di pensiero l'allievo o il pensatore non è vincolato a rispettare e a condividere le idee del maestro che lo ha preceduto, ma può costruire su queste idee senza esitare a scartare e a criticare le parti che ritiene migliorabili. Il criterio di attendibilità è la ragionevolezza di una idea e chiunque ha il diritto di valutare la ragionevolezza mettendo l'idea alla prova con tutti i mezzi che ha a disposizione. Il mondo può essere compreso con la ragione e il nostro livello di comprensione può cambiare nel tempo per aggiunte successive di informazioni o di nuove interpretazioni dell'informazione di cui disponiamo.

In ogni momento una teoria rappresenta la migliore descrizione dei fenomeni che osserviamo ed è tanto più valida quanto più è generale e quanto più fornisce una interpretazione dei fenomeni osservati, cioè non si limita a descrivere ma contiene anche elementi di spiegazione e comprensione delle dinamiche di questi fenomeni. Per lo più il punto di partenza delle nostre teorie sono le osservazioni e le razionalizziamo in visioni generali che spieghino in modo ragionevole tutto quello che abbiamo osservato fino a quel momento. Le teorie che sottendono una spiegazione portano con sé previsioni, e testare queste previsioni è il mezzo più potente che abbiamo per mettere in discussione la validità di una teoria. A volte le teorie cambiano perché aggiungiamo

nuove osservazioni, alla luce delle quali le vecchie teorie non sono più sufficienti a spiegare la realtà così come la osserviamo; a volte cambiano perché troviamo un modo semplicemente più efficace di descrivere tutto quello che sappiamo, magari superando delle piccole o grandi incoerenze o riuscendo a mettere insieme un numero maggiore di fenomeni sotto lo stesso tetto.

Il pensiero scientifico esplora e ridisegna il mondo, ce ne offre immagini via via migliori, ci insegna a pensarlo in modo più efficace.

Più scopriamo, più ci rendiamo conto che quello che ancora non sappiamo è più di quanto abbiamo già capito.

### ***Un viaggio nel tempo***

Il mondo è continuo o discontinuo? Esistono uno Spazio ed un Tempo sopra ai quali tutto scorre (materia e avvenimenti) oppure gli eventi fisici sono lo Spazio e il Tempo stesso?

In quasi tutte le equazioni della fisica classica compare il tempo. E' la variabile che tradizionalmente si indica con la lettera  $t$ . Noi misuriamo la grandezza di alcune variabili, come ad esempio la posizione di un oggetto o la temperatura di un altro, e le misuriamo più volte a distanza di tempo. Le equazioni che descrivono i fenomeni che stiamo misurando ci dicono come cambiano nel tempo queste variabili e ci permettono di predire ciò che succederà in un tempo futuro, se sappiamo ciò che è successo in un tempo passato. Per ottenere queste misure e queste predizioni dobbiamo misurare due cose: la variabile di interesse e il tempo che trascorre. Ma come facciamo a misurare il tempo in queste osservazioni e che cos'è il Tempo? Noi in realtà non misuriamo mai il tempo in sé, misuriamo sempre e solo delle variabili fisiche, come ad esempio le oscillazioni di un pendolo o il battito cardiaco, e confrontiamo le variabili fra di loro. Quello che osserviamo non è mai direttamente il Tempo, ma come cambia una variabile

rispetto ad un'altra. L'esistenza della variabile tempo è un'assunzione, non una osservazione. Newton per primo chiarisce questa idea sostenendo che il "vero" Tempo  $t$  non lo possiamo misurare, ma se assumiamo che esista, abbiamo la possibilità di costruire uno schema efficacissimo per comprendere e descrivere la natura<sup>2</sup>.

La descrizione migliore del mondo che riusciamo a dare in questo momento, assume l'esistenza di un Tempo e di uno Spazio veri e distinti sui quali tutto esiste e tutto si modifica e interagisce?

Nel mondo di Newton e Galileo non c'erano mai velocità fisse, erano principalmente le accelerazioni ad entrare nelle formalizzazioni matematiche che servivano a descrivere la realtà e le velocità erano sempre velocità di qualcosa rispetto a qualcos'altro. Questa visione mal si conciliava con la scoperta di Maxwell che la velocità della luce è costante. Fu Albert Einstein a riconciliare teorie ed osservazioni proponendo una nuova teoria della realtà dove le nozioni di spazio e di tempo venivano profondamente cambiate per tenere tutto il buono della meccanica newtoniana e includere anche le nuove informazioni e teorie che derivavano dal lavoro di Faraday e Maxwell: lo spazio ed il tempo non esistono come entità distinte e la forza di gravità non è un attore che si muove nello spazio, al contrario spazio e tempo sono una funzione dell'altro, e vengono deformati dalla presenza di massa. Il tempo perde il suo status di variabile distinta, la contemporaneità assoluta non esiste più, così come non esiste più il tempo assoluto. Esiste lo spazio-tempo che diventa "campo gravitazionale" e così il tempo scorre a velocità diverse in punti dove lo spazio-tempo è diversamente incurvato. La variabile  $t$  scompare dalle equazioni fondamentali, ma il concetto di Tempo esiste ancora, sebbene profondamente mutato.

Mentre il mondo dello spazio, del tempo e dei campi di forze prendeva una nuova forma nella teoria della relatività generale, la materia che esiste in questo mondo, le particelle elementari o gli atomi di Democrito si dischiudevano alla nostra conoscenza

pieni di caratteristiche inimmaginabili alla luce delle teorie interpretative che avevamo usato fino a quel momento. La materia e l'energia si rivelavano intrinsecamente granulari, non esiste l'infinitamente piccolo e pertanto l'informazione, per quanto immensa, è contabile. Il mondo è un susseguirsi di eventi quantistici discreti, granulari, individuali, il cui futuro è genuinamente imprevedibile, anche le più rigide fra le regolarità che vediamo sono in realtà solo statistiche. La teoria non descrive come le cose sono, descrive come le cose accadono e come influiscono l'una sull'altra. Il mondo delle cose esistenti è ridotto al mondo delle interazioni possibili: la realtà è ridotta a relazione. Che fine fa quindi il Tempo in questa teoria del reale? Il tempo come entità a sé stante, sia pure nella forma di spazio-tempo deformabile, non esiste più, il tempo nasce come conseguenza delle interazioni, ogni oggetto nell'universo è un tempo. Nella fisica dei fenomeni che avvengono uno rispetto all'altro sono i fenomeni stessi a creare il tempo: al livello fondamentale il tempo non c'è. Non c'è lo spazio che contiene il mondo non c'è il tempo lungo il quale scorrono gli eventi.

Se immaginassimo che lo stesso spazio-tempo descritto dalla relatività fosse quantistico, e quindi granulare, indeterminato e fatto esclusivamente di relazioni, il tempo nascerebbe esclusivamente come conseguenza delle interazioni fra quanti di gravità, che per loro caratteristica non sarebbero eventi ordinati da uno scorrere del tempo<sup>1</sup>. Quindi il Tempo infine, non esisterebbe proprio più! Ed è proprio in questa direzione che stiamo andando.

### ***Il Tempo non esiste?***

Ma se il tempo al livello fondamentale non esiste, perché nella nostra quotidianità non abbiamo abbandonato la nozione di tempo? Non credo che si tratti solo di un ritardo di comunicazione fra chi si occupa di scienza e chi si occupa di altro nella vita, la realtà è che noi facciamo esperienza dell'esistenza del tempo ogni giorno: la caratteristica più peculiare del tempo è che ha una direzione, gli eventi macroscopici che

osserviamo ogni giorno avvengono con un certo ordine e non sono reversibili, o almeno la gran parte di quelli che ci riguardano non lo sono. Tutti i fenomeni meccanici che osserviamo in cui non entra il calore sono sempre reversibili, al contrario tutti i fenomeni in cui si produce o si scambia calore non lo sono. Quanti sono i fenomeni di questo secondo tipo nella nostra quotidianità? Sono i più numerosi e anche i più importanti. Quello che osserviamo è che gli eventi di fatto vanno sempre spontaneamente verso la produzione di calore e che per riorganizzare questo calore in una forma di energia ordinata serve quantomeno informazione e questo non è spontaneo. E' sempre il calore in ultima analisi a distinguere il passato dal futuro, a dare una direzione irreversibile agli eventi. E questa regola generale riguarda la nostra stessa vita: noi siamo sistemi biologici che mantengono ordine al loro interno disperdendo calore verso l'esterno, fin quando è possibile.

Proviamo a fare un passo indietro nelle nostre osservazioni, abbandoniamo per un attimo l'analisi dei fenomeni che costituiscono il limite minimo delle dimensioni del reale e allarghiamo lo sguardo verso tutti quei fenomeni per i quali, se a piccolissima scala il tempo non sembra esistere, esiste tuttavia una regolarità quando guardiamo l'effetto macroscopico generato dalla miriade dei piccolissimi eventi. Boltzmann per primo ha proposto un modello teorico per descrivere la dinamica del calore mettendo in relazione i fenomeni microscopici con quelli macroscopici: il calore è il risultato del movimento microscopico casuale delle molecole, ad un certo livello energetico tutti gli stati possibili per quelle molecole sono ugualmente probabili, pertanto ciascuna casualmente occuperà ciascuno di quegli stati, il risultato finale sulla media degli eventi sarà il valore medio fra tutti gli stati possibili, non fra un sottogruppo di essi. Se abbiamo una tazza di tè caldo in un ambiente un po' più freddo, le molecole del tè si muoveranno casualmente in tutti i modi possibili in accordo con la loro energia cinetica e muovendosi urteranno casualmente le molecole dell'aria e del contenitore a contatto con essi scambiando energia. Il numero di stati possibili del sistema tè-ambiente è più

alto se l'energia è distribuita casualmente fra tutte le molecole invece che concentrata sulle sole molecole di tè, è per questo che nel tempo vediamo sempre il tè raffreddarsi e scaldarsi un pochino l'ambiente, mentre non vediamo mai il sistema concentrare il calore sul tè, anche se il comportamento di ogni singola molecola non è prevedibile e non è ordinato su una scala dei tempi. Che cosa ha quindi il calore di così speciale rispetto alle altre forme di energia per determinare la direzione degli eventi? Il calore non è una diversa forma di energia è semplicemente energia senza informazione e quello che vediamo accadere ogni giorno intorno a noi è la perdita di informazione che trasforma tutte le forme di energia spontaneamente in calore, ovvero solo energia casuale. Questo è il Tempo. La termodinamica codifica questa perdita di informazione in una serie di leggi e di formalizzazioni matematiche che riportano prepotentemente l'esistenza del Tempo nel nostro mondo. La perdita dell'informazione che può coordinare i tanti eventi puntiformi e senza tempo determina la direzione inesorabile della media degli eventi, da organizzati a squisitamente casuali o entropici. Sarà il prossimo passo conciliare la gravità quantistica con la meccanica statistica e rivedremo il Tempo uscito dalla porta rientrare dalla finestra con il nuovo nome di informazione?

### ***La termodinamica: il tempo o calore***

La prima legge della termodinamica definisce il calore come una forma di energia, l'energia totale interna di un sistema è data dalla somma di lavoro più calore:

$$U = q + w$$

Mentre l'energia totale di un sistema isolato si conserva, non si conserva il calore per sé, le due forme di energia sono interscambiabili fra loro. Chiamiamo lavoro una forma di trasferimento di energia ordinata, in cui tutte le componenti microscopiche del sistema sono ordinate secondo un vettore, mentre il calore rappresenta una forma trasferimento di energia disordinata in cui tutte le componenti microscopiche si assortiscono in modo casuale. Che cosa osserviamo di fatto? In un sistema isolato lo

scambio fra lavoro e calore avviene continuamente senza un ordine e una direzione precisa?

Quello che osserviamo, e che esprimiamo con la seconda legge della termodinamica, è che se un sistema ha una data quantità di energia totale che corrisponde ad un dato numero di stati possibili per le sue componenti microscopiche quello che succede è che in media tutti questi stati verranno popolati<sup>3</sup>. In altre parole se a parità di energia posso avere una situazione macroscopica in cui ci sono pochi diversi stati microscopici possibili, come è il caso del lavoro in cui le componenti microscopiche devono essere orientate secondo una direttrice, e una situazione che invece corrisponde ad un numero maggiore di stati microscopici possibili, la seconda situazione si verifica. La termodinamica è la scienza del possibile, la nostra teoria su cosa avviene e cosa non avviene a partire da una determinata situazione di partenza, la predizione del futuro a partire dalle informazioni sul passato.

Quello che nel mondo degli eventi microscopici chiamiamo molteplicità degli stati, nel mondo macroscopico lo chiamiamo “entropia” e questa è l’equazione che li connette:

$$S = k \log W$$

dove S è l’entropia, k una costante di valore positivo (detta costante di Boltzmann) e W è la quantificazione della molteplicità degli stati possibili.

Un sistema tende spontaneamente al risultato macroscopico che corrisponde alla massimizzazione della molteplicità degli stati microscopici, o in altre parole all’aumento dell’entropia<sup>3</sup>. Se il calore è la forma di energia che massimizza la molteplicità degli stati microscopici, l’entropia è l’inverso dell’informazione, la perdita di informazione è la direzione che fa esistere il tempo nell’osservazione degli eventi macroscopici<sup>1</sup>.



Se il sistema infine non ha energia non ci sono molteplici stati possibili, non ci sono fluttuazioni microscopiche che portano all'occupazione di un diverso numero di stati, non c'è direzione degli eventi macroscopici e non esiste pertanto neanche il tempo.

### ***Energia e vita***

Ciò che chiamiamo vita sulla terra, e che cerchiamo con estrema curiosità anche su altri pianeti, è un insieme di sistemi aperti dove le interazioni chimiche danno luogo all'esistenza di unità funzionali fondamentali chiamate cellule. L'insieme delle reazioni che avvengono in questi sistemi porta all'aumento dell'entropia globale, tuttavia le cellule sono porzioni locali della realtà dove, in conseguenza a queste reazioni, l'ordine è estremamente alto. Nelle cellule c'è molta informazione. L'insieme delle reazioni cellulari ha il risultato netto di costruire costantemente ordine e accumulare energia potenziale (chimica o elettrica). Quando una cellula interagisce con il suo ambiente, l'energia potenziale viene rilasciata e l'ordine viene mantenuto, configurando una situazione che chiamiamo di "equilibrio dinamico". Come abbiamo notato nei paragrafi precedenti, l'informazione tende a diminuire, pertanto anche le cellule non rimangono eternamente nel loro equilibrio dinamico ma sono soggette a perdita di informazione, cioè al trascorrere del tempo. Ancora di più sono soggetti al cambiamento nel tempo gli organismi, che sono sistemi altamente organizzati di cellule.

Quando guardiamo al metabolismo cellulare, le reazioni possibili, ovvero quelle che avvengono e che rientrano all'interno dei nostri modelli termodinamici, sono le reazioni che producono una forma di aumento dei gradi di libertà oppure una produzione di calore, che si traduce a sua volta nell'aumento di gradi di libertà delle componenti microscopiche dell'ambiente. L'effetto macroscopico che noi misuriamo è la media di tanti eventi microscopici casuali, per cui quando diciamo che una reazione avviene non significa che ogni urto utile produca sempre lo stesso risultato, ma che gli eventi che producono un aumento della molteplicità degli stati sono quelli che vanno

accumulandosi, e di fatto sono quelli di cui osserviamo gli effetti. Alla temperatura a cui esistiamo nulla è immobile, tutto è in costante attività.

## ***Come si affrontano a scuola le teorie della realtà e l'idea del Tempo in particolare***

Durante la mia esperienza di tirocinio ho notato che gli studenti, portando avanti materie di studio molto diverse nello stesso tempo, ricevono un numero incredibile di stimoli culturali differenti che elaborano con fantasia e curiosità. Se da un lato però mille pensieri girano per la loro testa, dall'altro sembra che non abbiano o non si prendano mai il tempo per riflettere a fondo e per collegare un pensiero all'altro a formare in un sapere poliedrico, organico e complesso. Nonostante la loro voglia di pensare e la loro incredibile curiosità, i ragazzi non riescono ad uscire dalla logica dell'elenco di argomenti da studiare per entrare in quella della formazione di un pensiero sul mondo. Forse questo riflette il nostro modo di proporre loro gli argomenti, forse dovremmo preoccuparci di più di accompagnarli verso la scoperta, di cui i nostri argomenti di studio sono solo i frammenti, piuttosto che guidarli a raccogliere una collezione di frammenti.

Per quanto riguarda lo studio della termodinamica, ho notato che la trattazione che ne è stata fatta durante le ore di chimica ha avuto un impatto particolarmente poco significativo sul modo in cui gli studenti hanno affrontato poi i temi di biochimica e di biologia, e ha portato con sé poche riflessioni in relazione agli argomenti trattati durante le ore di fisica. Eppure stiamo tutti parlando della stessa realtà!

La termodinamica normalmente si studia in quarta e viene brevemente ripresa in quinta nelle ore di scienze. A me piacerebbe coordinare la trattazione del problema che viene fatta nelle ore di chimica con quella che viene fatta nelle ore di fisica e portare

avanti un piccolo progetto in quinta che consenta agli studenti di confrontarsi con grandi scoperte e meravigliose idee, ma anche con grandi interrogativi ancora aperti.

## ***Elementi progettuali per il tema del Tempo***

### ***Analisi del contesto***

Nei paragrafi introduttivi ho definito il tempo come la direzione degli eventi quando i cambiamenti non sono reversibili, a muovere le lancette in avanti è la produzione di calore. Le trasformazioni energetiche che coinvolgono il calore si studiano durante le ore di fisica e durante quelle di chimica in classe quarta nei licei. E' interessante studiare la termodinamica nelle ore di chimica perché è una parte importante del quadro generale che descrive come gli atomi e le molecole che costituiscono la materia interagiscono fra loro. In quarta si imparano a descrivere le soluzioni, si studiano le reazioni chimiche e si scopre che per descrivere gli eventi non basta la materia ma bisogna fare i conti con un altro attore: l'energia. L'energia che le molecole possiedono e che consente ai loro atomi di associarsi e dissociarsi, e quella che gli dà la possibilità di muoversi. Si tratta della stessa energia che si studia durante le ore di fisica e viene descritta con le stesse leggi. Anche in questo caso c'è una descrizione degli eventi al livello microscopico che va conciliata con quella al livello macroscopico e per farlo possiamo usare la stessa matematica e in particolare la matematica nuova dei sistemi probabilistici che si studia proprio in quarta. Solo che gli oggetti e gli eventi su cui concentriamo il nostro interesse sono diversi nelle varie lezioni.

Il concetto di tempo e quello di orizzonte delle probabilità e direzione degli eventi viene ripreso in quinta, quando nelle ore di scienze si studia la chimica dei sistemi biologici e in fisica si rivedono i concetti di spazio, tempo e materia alla luce delle più recenti teorie del reale.

## ***Scelta degli obiettivi***

Il concetto di Tempo è un tema trasversale. L'idea di introdurre una riflessione sul Tempo persegue in realtà l'obiettivo di aiutare i ragazzi a costruire un sapere unico e a collegare le conoscenze che nel loro percorso formativo apprendono da varie materie. Trattandosi di una questione fondamentale nella nostra percezione della realtà il progetto interdisciplinare sul Tempo mira anche a stimolare la riflessione critica, a dare un valore alle teorie e ai dati che apprendiamo a scuola. Il progetto si presta anche a sottolineare l'unità della scienza e del metodo scientifico, nonostante ogni settore scientifico si concentri su diversi argomenti di interesse. Nelle ore di scienze naturali l'idea del tempo è parte della trattazione della seconda legge della termodinamica, i cui obiettivi di apprendimento principali sono la definizione di entropia, il fondamento statistico del concetto di entropia, la definizione di energia libera, l'utilizzo dell'energia libera come strumento operativo per la biochimica e la biologia.

## ***Progettazione delle attività***

### ***Classe quarta***

#### ***Statistica e lattice models***

Studiando le probabilità e il calcolo combinatorio durante le lezioni di matematica gli studenti imparano che per una combinazione di eventi la composizione più varia è la più probabile e possono rappresentare questa idea tanto con una formalizzazione matematica quanto con una rappresentazione grafica a scatole e sferette, il *lattice model*. Utilizzando questo tipo di formalizzazione gli studenti possono affrontare durante le ore di fisica i fenomeni termici relativi al modello dei gas e generalizzare il concetto di calore ai fenomeni macroscopici, comprendendo così i principi della termodinamica. Durante le ore di chimica i *lattice models* possono essere usati attraverso la lavagna interattiva multimediale per rappresentare vari fenomeni interessanti, mostrando come per diverse quantità di energia disponibile ci siano diverse possibili combinazioni di eventi e

come a parità di energia ci siano combinazioni di eventi più o meno varie. Queste rappresentazioni sono molto intuitive. Si possono rappresentare così: i fenomeni di diffusione e quelli di dissoluzione di un soluto in un solvente; le possibili configurazioni di un polimero; una reazione in soluzione che libera calore aumentando la molteplicità degli stati del solvente; una reazione di rottura di un legame che aumenta il numero di molecole libere di muoversi in un certo ambiente.

Tutti questi modelli relativi a semplici fenomeni ideali possono essere spiegati alla LIM disegnando gli schemi insieme ai ragazzi, che verranno anche chiamati alla lavagna, e poi esportandoli in formato digitale come materiali di studio a casa. I disegni possono essere anche integrati con video di simulazioni dinamiche messe a disposizione on-line da varie università. Questa parte della trattazione, essendo basata principalmente su rappresentazioni grafiche, non presenta difficoltà per gli studenti con DSA o difficoltà linguistiche e può essere utilizzata in un'ottica inclusiva.

### *Dal micro al macro*

Molte delle schematizzazioni che ho nominato possono essere accompagnate da semplici dimostrazioni pratiche in cui possiamo effettivamente osservare e misurare i fenomeni che stiamo rappresentando. E' possibile fare delle semplici dimostrazioni alla cattedra o in laboratorio per: diffusioni (inchiostro in acqua), solvatazioni (acqua e sale), e reazioni di lisi colorimetriche (X-gal in soluzione in presenza di  $\beta$ -galattosidasi si scinde in galattosio e 5,5'-dibromo-4,4'-dicloro-indaco, un composto blu insolubile). Possiamo vedere quindi che un sistema termodinamico è una qualsiasi aggregazione di materia distinta dal suo intorno da barriere fisiche o immaginarie che possiamo modellizzare in modo diverso a seconda dell'aspetto che vogliamo esaminare. Definiamo quindi vari modelli: i sistemi aperti, come la cellula; i sistemi chiusi, come le lampadine; le barriere semipermeabili, come i filtri o le membrane biologiche; le fasi. Attribuiamo quindi ai sistemi delle proprietà, ovvero delle caratteristiche misurabili, come il volume,

la densità, la concentrazione o la temperatura e distinguiamo quelle intensive da quelle estensive. Sono estensive tutte le proprietà che sono date dalla somma delle proprietà delle singole componenti microscopiche del sistema, sono intensive quelle che risultano dalla media delle proprietà delle componenti del sistema. Infine attribuiamo a questi modelli delle caratteristiche non misurabili ma utili per fare previsioni, l'energia interna e l'entropia, e dobbiamo cercare di trovare delle regole che mettano in relazione gli attributi misurabili con quelli non misurabili.

In base a quello che abbiamo visto studiando i *lattice models*, in un sistema che ha una data quantità di energia fissa se il volume può cambiare la massima molteplicità si ottiene aumentando il volume, se le varie molecole sono libere di muoversi si ottiene quando sono mescolate, se l'energia fra varie delle sue parti può essere scambiata si ottiene quando il calore fluisce. Molte di queste caratteristiche possono essere contemporaneamente modificabili in un sistema. In ogni momento l'entropia quindi è funzione di tutte le proprietà che possono cambiare e la tendenza del sistema sarà a cambiare fin quando raggiunge la combinazione in cui il valore finale della funzione entropia è massimo. Questo è lo scorrere del tempo. Quando si raggiunge il massimo, l'entropia non cambia più,  $dS = 0$ , il sistema è all'equilibrio. Non si torna indietro nel tempo.

Affronterei con i ragazzi gli argomenti esposti in questa sezione dividendo la lezione in due momenti. In un primo momento allestirei delle semplici esperienze pratiche e incoraggerei i ragazzi a fare misure, a riprendere con il cellulare e a scrivere i dati raccolti, a pensare esperimenti per verificare ipotesi (ad esempio per verificare le proprietà estensive ed intensive). In un secondo momento, quando in seguito all'esperienza raccogliamo le idee e parliamo di modelli e grandezze, terrei una spiegazione frontale partecipata utilizzando la LIM sia per proiettare una presentazione con immagini ed esempi, sia per costruire in modo interattivo con i ragazzi uno schema

con le definizioni e i concetti principali della lezione. Sia l'esercitazione, che la presentazione, che lo schema finale sono strumenti adatti ad una didattica inclusiva. E' importante invece coordinare il lavoro degli studenti per la preparazione della relazione sui dati raccolti in modo tale da dare a tutti la possibilità di contribuire senza ostacoli e secondo le proprie inclinazioni, inoltre deve essere cura dell'insegnante fornire materiale di studio testuale scritto con un font adeguato e con i concetti chiave in grassetto.

### *Un caso particolare che ci interessa molto: i sistemi aperti*

Molte delle reazioni chimiche che vediamo ogni giorno e i sistemi biologici, che sono uno speciale insieme di queste reazioni, sono sistemi aperti in cui la temperatura e la pressione non cambiano sostanzialmente mentre l'energia fluisce fra sistema e ambiente. Queste condizioni fanno sì che l'entropia da massimizzare è quella della combinazione sistema più ambiente e che per il nostro sistema ci sono vari possibili livelli di energia. La massimizzazione della funzione entropia globale può essere raggiunta modulando anche il livello di energia del sistema.

$$dS_{\text{tot}} = dS_{\text{sist}} + dS_{\text{amb}}$$

dove  $dS_{\text{tot}}$  è la variazione della funzione entropia globale, data dalla somma della variazione dell'entropia del sistema e di quella dell'ambiente.  $dS_{\text{tot}} = 0$  quando  $S$  è massima.

La variazione dell'entropia dell'ambiente è correlata con il calore liberato dal sistema che, per una reazione a temperatura e pressione costanti, esprimiamo come entalpia:

$$dS_{\text{amb}} = -dH_{\text{sist}}/T$$

dove  $S$  è l'entropia dell'ambiente;  $H_{\text{sist}}$  è l'entalpia del sistema o il calore liberato verso l'ambiente;  $T$  è la temperatura, ovvero l'energia a disposizione.

Da questa relazione deriva che possiamo esprimere la funzione entropia globale guardando tutto solo dal punto di vista del nostro sistema di interesse:

$$dS_{\text{tot}} = dS_{\text{sist}} - dH_{\text{sist}}/T$$

Poiché il nostro interesse è concentrato sul sistema questa stessa relazione possiamo esprimerla con una funzione relativa al nostro sistema, che chiamiamo energia libera: quando il nostro sistema è al minimo dell'energia libera, la combinazione sistema più ambiente è al massimo dell'entropia. Il tempo nel nostro sistema scorre in direzione del minimo dell'energia libera.

$$dG_{\text{sist}} = - T dS_{\text{tot}}$$

dove  $dG_{\text{sist}}$  è la variazione della funzione energia libera del sistema, data dall'entropia totale in funzione della Temperatura.  $dG = 0$  quando  $G$  è minima.

$$dG_{\text{sist}} = - T dS_{\text{sist}} + dH_{\text{sist}}$$

Per gli argomenti di questa sezione ritengo che la lavagna con i gessi sia il supporto alla didattica più adeguato, in quanto ci consente di costruire insieme ai ragazzi e con una corretta scansione dei tempi il flusso del ragionamento e il flusso delle formalizzazioni matematiche. Costruire la lezione sulla lavagna, senza una presentazione preconfezionata, aiuta anche a dare la percezione che si sta costruendo un ragionamento tutti insieme, sebbene sia in gran parte guidato dall'insegnante. In questo caso utilizzerei anche la LIM per proiettare alcune immagini che richiamino l'attenzione su fenomeni e modelli che abbiamo visto insieme nelle lezioni precedenti, e alcune tabelle di dati interessanti relativi all'energia libera standard di alcune trasformazioni su cui riflettere insieme. E' importante che gli studenti possano



consultare per lo studio a casa il flusso delle equazioni su un libro o su una presentazione fornita dall'insegnante, e che gli vengano messe a disposizione anche le conclusioni in forma puramente testuale. Questa misura è importante se in classe sono presenti alunni con disgrafia o discalculia, che farebbero fatica a prendere gli appunti in modo autonomo durante la lezione, o alunni con difficoltà in matematica, in modo tale che non ci siano ostacoli all'apprendimento.

### *Dalla teoria alle previsioni*

In base a questa relazione possiamo prevedere che, se la temperatura e quindi l'energia a disposizione è molto alta, il fenomeno prevalente sarà l'aumento di entropia del sistema, se invece la temperatura è bassa, il sistema tenderà a raggiungere un minimo di energia interna cedendo calore all'ambiente che aumenta la sua entropia. In entrambi i casi il risultato finale sarà l'aumento dell'entropia della combinazione sistema più ambiente.

Questa deduzione possiamo presentarla, equazioni alla mano su una lavagna tradizionale come su una lavagna interattiva e sarà seguita da una serie di esercizi che faranno gli studenti alla lavagna. In questo caso gli studenti con discalculia o disgrafia saranno dispensati dagli esercizi, tuttavia i contenuti concettuali verranno esposti e scritti in modo chiaro per l'apprendimento di tutti.

### ***Classe quinta***

Durante la classe quinta i concetti di direzione degli eventi, energia interna, entropia e tempo verranno rivisti in due contesti: come filo guida durante le lezioni sul metabolismo cellulare e come stimolo alla riflessione sulle teorie del reale in collaborazione con l'insegnante di fisica.

### *Energia libera e biochimica*

Dopo aver completato le lezioni sulla chimica organica e i gruppi funzionali, prima di iniziare ad affrontare il metabolismo cellulare si riprende in mano il concetto di energia libera. Non basta rivedere la formula già vista con qualche esercizio, ma è necessario fermarsi su tre punti chiave:

1. Quando un sistema non è all'equilibrio la tendenza a spostarsi verso l'equilibrio diventa una forza trainante la cui ampiezza è espressa dalla variazione di energia libera  $\Delta G$  della reazione. In condizioni standard biochimiche  $\Delta G'^{\circ} = -RT \ln K'_{eq}$  dove R è la costante dei gas, T la temperatura e  $K'_{eq}$  la costante di equilibrio in condizioni standard;
2. Se  $\Delta G'^{\circ} = -RT \ln K'_{eq}$  allora  $K'_{eq} = e^{-\Delta G'^{\circ}/RT}$ , ovvero l'equilibrio rappresenta una diversa distribuzione delle molecole fra i vari stati possibili a diversa energia in base a quanta energia c'è disponibile. Questo serve a rimettere insieme le considerazioni che abbiamo fatto guardando gli eventi a livello microscopico e a livello macroscopico;
3. La variazione di energia libera di un fenomeno che stiamo osservando è data dai contributi di tutti i sottofenomeni che lo costituiscono, quindi il  $\Delta G'^{\circ}$  di varie reazioni correlate si somma e il processo complessivo è spontaneo solo se la variazione di energia libera totale è negativa.

Quali reazioni sono correlate e quali no nel metabolismo cellulare? Ci basta vedere una mappa generale delle vie metaboliche di una cellula (attraverso il KEGG o il MetaCyc) per vedere che si tratta di una complessa rete di relazioni, nella quale è difficile stabilire i confini, tuttavia, come nel caso dei sistemi termodinamici visti in quarta, possiamo fare delle utili modellizzazioni. Un esempio interessante potrebbe essere guardare in modo qualitativo come si riorganizzano le molecole di acqua quando una macromolecola idrofobica e una idrofilica entrano in contatto, come cambiano l'energia interna e l'entropia in risposta a questi eventi. Un secondo esempio

interessante è quello della rottura della molecola di ATP in AMP e due molecole di fosfato inorganico, guardando l'andamento dell'entalpia e dell'entropia del sistema.

I sistemi biologici sono sistemi che usano energia per costruire ordine o capacità di svolgere lavoro, allontanandosi dall'equilibrio. Interagendo con l'ambiente esterno si spostano velocemente verso l'equilibrio.

Ritengo che sia utile condurre la prima parte di questa lezione, quella relativa ai concetti chiave dell'energia libera, con una lezione frontale partecipata usando la lavagna tradizionale. Per questa lezione, come già successo in precedenza, le dimostrazioni matematiche vengono fornite insieme alle conclusioni come misura compensativa, inoltre gli studenti con difficoltà oggettive in matematica sono dispensati dalle dimostrazioni, ma non dai contenuti concettuali. E' utile invece utilizzare la LIM per presentare le mappe del metabolismo cellulare e i modelli, solo qualitativi, di una proteina in acqua e dell'idrolisi dell'ATP. In questo caso infatti le illustrazioni possono dire molto più delle parole.

### *La combinazione di eventi senza tempo genera sempre il Tempo?*

Studiando la chimica e i sistemi biologici vediamo che gli eventi possono avere una direzione irreversibile. L'insieme di tanti eventi senza direzione dà un evento macroscopico direzionato per semplici ragioni statistiche. La fisica contemporanea ci dice che materia ed energia sono fatti al livello fondamentale di eventi discreti che non hanno direzione. Potrebbe l'insieme degli eventi fondamentali finire con l'avere una direzione e quindi un tempo anche in questo caso per ragioni statistiche? Oppure questo avviene solo al livello dei sistemi al di sopra delle dimensioni atomiche? Proponiamo agli studenti insieme all'insegnante di fisica questa domanda su cui riflettere, iniziando con una prima discussione in classe e poi proponendo la lettura del libro "La realtà non è come ci appare" di Carlo Rovelli. La scelta di questo libro è basata su una mia valutazione personale, e anche sull'entusiasmo che ha suscitato fra i ragazzi che ne

hanno decretato la vittoria al premio Galileo per la divulgazione scientifica del 2015. I ragazzi potrebbero essere coinvolti in collaborazione con l'insegnante di italiano nella scrittura di una breve recensione, o analisi testuale o riscrittura creativa di uno dei temi del libro. Sarebbe infine interessante portare avanti un piccolo progetto di divulgazione scientifica sull'argomento, coinvolgendo i ragazzi nella realizzazione di un breve video sul tema del Tempo così come lo hanno studiato. Con questa attività, da svolgere su un lungo periodo, i ragazzi avrebbero la possibilità di riordinare le idee e di proporre una comunicazione originale, della quale possano decidere l'impostazione in modo del tutto autonomo. Ogni studente avrebbe la possibilità di esprimersi secondo le proprie eccellenze o inclinazioni e di partecipare ad un lavoro di gruppo e alla realizzazione di oggetto tangibile. Questo ultimo progetto potrebbe essere opportunamente inserito in un contesto più ampio, come una gara di cortometraggi, o una competizione scientifica o una iniziativa della scuola in collaborazione con altri enti relativa alla realizzazione di video o alla comunicazione via web. Le attività che ho qui elencato potrebbero essere una alternativa all'altra in modo tale da dare la possibilità a ciascuno di scegliere superando anche eventuali difficoltà dell'apprendimento. In alternativa, se una sola di queste attività venisse scelta, ritengo che la realizzazione del video sarebbe la più inclusiva. Se si scegliesse di proporre la lettura del libro, una buona alternativa per studenti con DSA o difficoltà con la lingua Italiana potrebbe essere la visione di un documentario BBC con sottotitoli in varie lingue sul concetto di informazioni in relazione al tempo e alla termodinamica (<https://www.youtube.com/watch?v=gKRzXMZEug0>).

### ***Modalità di valutazione***

L'apprendimento dei singoli argomenti di termodinamica e di biochimica di cui ho parlato in questi paragrafi viene normalmente testato con verifiche scritte per lo più strutturate su domande chiuse ed esercizi. Questo genere di verifiche è molto adeguato e funzionale, tuttavia abbiamo anche altri obiettivi di apprendimento in questo caso: la

capacità di collegare vari argomenti, di rielaborare i concetti in modo personale mantenendo allo stesso tempo rigore e originalità, di utilizzare gli strumenti matematici in vari contesti scientifici, di usare gli strumenti di comunicazione per raccontare la scienza, di collaborare alla realizzazione di un progetto. Il raggiungimento di questi obiettivi non può essere testato in modo tradizionale e deve essere valutato in modo tale da “dare valore” all’impegno e ai risultati diversi di ciascuno studente anche in ragione delle loro inclinazioni e dei loro passi avanti personali. Per questa ragione i migliori risultati nelle rielaborazioni del libro (o del video), i migliori contributi alla realizzazione del video sul Tempo, le migliori risposte che richiedono una rielaborazione personale durante le verifiche scritte o orali, i migliori contributi alla discussione in classe sul Tempo vanno premiati con una votazione che rifletta i risultati ottenuti e l’impegno profuso da ciascuno studente. In questa prospettiva è importante rendere chiaro fin dall’inizio quali sono gli obiettivi di questo percorso e come verranno valutati, in modo tale da essere trasparenti e collaborativi con i ragazzi e di responsabilizzarli nel processo educativo. Questa impostazione consente anche di individuare obiettivi personalizzati per gli alunni con BES e di valutarli adeguatamente rispetto ai loro specifici obiettivi.

### ***Referenze bibliografiche e sitografiche***

1. Carlo Rovelli (2014) “La realtà non è come ci appare”, Raffaello Cortina Editore
2. Isaac Newton “Il sistema del mondo”, traduzione italiana Boringhieri, Torino 1969
3. Ken A. Dill e Sarina Bromberg (2003) “Molecular Driving Forces”, Garland Science
4. Video BBC “Maxwell's Demon and the Nature of Information”  
<https://www.youtube.com/watch?v=gKRzXMZEug0>