

SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO DEGLI INSEGNANTI DI  
SCIENZE

# Il tempo nella Scienza. La Scienza nel tempo



Hotel Kaos, Agrigento  
27 - 31 luglio 2009

A cura di

Michele A. Floriano  
Delia Chillura Martino



***Quali conoscenze di base per comprendere l'innovazione?***

**Contributi alla Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze**

**IV edizione: "IL TEMPO NELLA SCIENZA. LA SCIENZA NEL TEMPO"**

**Agrigento, 27 – 31 luglio 2009**

*Editors:*

Michele Antonio Floriano

Delia Chillura Martino

---

Quaderni di Ricerca in Didattica (Science), Numero speciale 1

Editor in Chief: Claudio Fazio – University of Palermo, Italy

Deputy Editor in Chief & Editorial Director: Benedetto di Paola - University of Palermo, Italy

ISSN on-line 1592-4424

First edition, May 2011

SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO DEGLI  
INSEGNANTI DI SCIENZE



SOCIETÀ CHIMICA ITALIANA

# Il tempo nella Scienza. La Scienza nel tempo

Hotel Kaos, Agrigento  
27 - 31 luglio 2009

A cura di:  
**Michele Antonio Floriano**  
**Delia Chillura Martino**  
Università di Palermo

The cover features a background of interlocking grey gears. In the center, there is a vertical pencil, an hourglass with green sand, and a large red key. The text is primarily in blue and red.

**AIC** **AIF** **ANISN** **SOCIETÀ CHIMICA ITALIANA**

**SPATIS** *Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze*

**Quali conoscenze per comprendere l'innovazione?**

**IV Edizione**  
**27 – 31 luglio 2009**  
**Hotel Kaos. Agrigento**

**Il tempo nella Scienza.**  
**La Scienza nel tempo**

**Università di Palermo** **MUR U.S.R. Sicilia - Direzione Generale** **Progetto Lauree Scientifiche**

## *Indice*

*Saluti del Direttore Generale dell'Ufficio Scolastico Regionale per la Sicilia*

Dott. Guido di Stefano

*La SPAIS come modello formativo*

7

*Programma della Scuola*

8

*Prefazione*

di Michele A. Floriano e Delia Chillura Martino

*SPAIS: quali conoscenze di base per comprendere l'innovazione?*

7

1 Anna Caronia e Maria Concetta Consentino

*Contesti scolastici, formazione docente e aspetti didattici*

11

2 Giuseppe Gembillo

*L'irrompere del tempo nelle scienze*

1.1 Premessa, 14

1.2. Fourier e l'entropia come misura della dissipazione dei corpi, 14

1.3. Wegener e la storia della Terra, 17

1.4. Hubble e l'espansione dell'universo, 21

3 Paolo de Bernardis e Silvia Masi

*13.7 miliardi di anni: il tempo e l'età dell'universo*

2.1. Il tempo in fisica, 24

2.2. L'età dell'universo, 26

4 Carlo Bernardini

*Prodigiosa importanza della nozione di invarianza fisica*

37

5 Giovanni Villani

*Il ruolo del tempo nei sistemi chimici*

4.1. Introduzione, 41

4.2. La chimica: prima scienza della complessità sistemica, 41

4.3. Il concetto di sistema in Fisica e Biologia, 42

4.4. Il tempo nei sistemi chimici. Confronto tra la Fisica e la Biologia, 43

4.5. Conclusione, 44

6 Paola Ambrogi ed Elena Ghibaudi

*Il tempo nella scuola. Il punto di vista dei partecipanti a SPAIS  
sulla recente riforma Gelmini*

46

7 Marina Alfano e Rosolino Buccheri

*I modi della temporalità tra Ratio e Relatio*

50

8 Gianmarco Ieluzzi

*Scienziati nelle pieghe del tempo*

51

9 Gianmarco Ieluzzi

*Una storia per immagini*

53

10 Fabio Caradonna

*Origine ed evoluzione dei genomi: dal brodo primordiale al DNA umano*

66

11 Mariano Venanzi

*I tempi delle molecole*

10.1. *Il tempo dei moti elettronici, 72*

10.2. *Il tempo dei moti molecolari, 73*

10.3. *L'energia ridistribuita. I tempi del rilassamento energetico delle molecole, 75*

10.4. *I tempi delle interazioni intermolecolari. I moti del solvente, 76*

10.5. *I tempi di molecole complesse, 79*

12 Rosario Iaria

*La morte di una stella, la morte di una stella morta e la sua rinascita*

11.1. *Introduzione, 82*

11.2. *La fine della stella: meccanica quantistica e relatività speciale si incontrano, 83*

11.3. *Le stelle di neutroni e le pulsar: la vita di una stella morta, 84*

11.4. *Le pulsar possono risorgere, 86*

13 Vita Fortunati

*L'importanza degli Studi di Genere (Gender Studies)*

12.1. *Le caratteristiche degli Studi di Genere (Gender Studies), 88*

12.2. *Il concetto di Genere/Gender, 88*

12.3. *Il corpo della Donna tra natura e cultura, 89*

12.4. *Donne e Scienza, 90*

12.5. *Qualche proposta per introdurre la dimensione di genere nelle scuole, 91*

14 Valerio Agnesi

*Dal tempo biblico al tempo geologico*

93

## **La SPAIS come modello formativo**

**Guido di Stefano**

Direttore Generale dell'Ufficio Scolastico Regionale per la Sicilia

La Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze "SPAIS" ha appena concluso il suo quarto anno d'interventi formativi a favore degli insegnanti delle discipline scientifiche. In questo periodo, attraverso un percorso formativo che si è caratterizzato per avere sviluppato le conoscenze di base per comprendere l'innovazione, la riflessione è andata via via concentrandosi sui nodi fondanti della scienza – dall'energia alle nanotecnologie, al loro impiego nei diversi campi della ricerca scientifica e tecnologica; al "tempo" quale espressione della storia dell'uomo ma anche storia di una grandezza fisica che sempre più modifica e modificherà il concetto di presente, passato e futuro, di esistenza – non esistenza in relazione ai diversi sistemi fisici di riferimento.

SPAIS mirando a promuovere e sviluppare il patrimonio di competenze, finalizzato all'accrescimento professionale dei docenti e al miglioramento della qualità del servizio, attraverso la propria attività ha accreditato un modello che per caratteristiche e comportamenti riproduce percorsi d'apprendimento dove lo studio delle scienze è stato innanzitutto una esperienza della mente, un costruire e ricostruire il viaggio condotto da queste nel campo della conoscenza, utilizzando intuizioni ed esperimenti semplici e significativi.

L'Ufficio Scolastico Regionale nel sostenere questo modello formativo ha contribuito alla crescita di un approccio epistemologico alla complessità dei fenomeni che governano l'equilibrio in Natura, prospettando in didattica il superamento della specificità disciplinare, concorrendo così, al superamento di una visione deterministica alla interpretazione della verità.

## SPAIS 2009

### "Il tempo nella scienza. La scienza nel tempo" Programma



#### Lunedì 27 Luglio 2009

16:00

Saluti e Apertura dei lavori

17:00 **Giuseppe Gambillo**

L'irrompere del tempo nella scienza

18:00 **Paolo de Bernardis**

L'Universo oggi

22:00 **Osservazioni astronomiche**

A cura dell'associazione "ça Specola"



#### Martedì 29 Luglio 2009

9:00 **Carlo Bernardini**

Prodigiosa importanza della nozione di invarianza in fisica relativistica

10:00 **Giovanni Villani**

Il ruolo del tempo nei sistemi chimici

11:00 Intervallo

11.30 **Paolo de Bernardis**

L'origine dell'Universo

12:30 Dibattito

13:00 Pranzo

16:00 **Lavori di gruppo e discussioni**

Il tempo nella scuola

Conducono **Paola Ambrogi** e **Elena Ghibaudi**



#### Mercoledì 29 Luglio 2009

9:00

**Rosolino Buccheri e Marina Alfano**

I modi della temporalità tra *ratio* e *relatio*

10:00 **Claudio Franceschi**

Evoluzione del corpo umano. Invecchiamento e malattie

11:00 Intervallo

11.30 **Gianmarco Ieluzzi**

Scienziati nelle pieghe del tempo

12:30 Dibattito

13:00 Pranzo



#### Giovedì 30 Luglio 2009

9:00

**Fabio Caradonna**

Dinamica dei processi evolutivi

10:00 **Mariano Venanzi**

Il tempo delle molecole

11:00 Intervallo

11.30 **Gianmarco Ieluzzi**

Una Storia per immagini

12:30 Dibattito

13:00 Pranzo



#### Venerdì 31 Luglio 2009

9:00

**Fabio Caradonna**

Origine ed evoluzione dei genomi: dal brodo primordiale al DNA umano

10:00 **Valerio Agnesi**

Evoluzione dei sistemi geologici

11:00 Intervallo

11.30 Dibattito e conclusione

## *Prefazione*

# **SPAIS: quali conoscenze di base per comprendere l'innovazione?**

**Michele A. Floriano<sup>1,2</sup> e Delia Chillura Martino<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Divisione Didattica della Società Chimica Italiana

<sup>2</sup>Dipartimento di Chimica Fisica "F. Accascina", Università di Palermo

e-mail: [michele.floriano@unipa.it](mailto:michele.floriano@unipa.it)

Sito web: [www.unipa.it/flor/spais.htm](http://www.unipa.it/flor/spais.htm)

La Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze (SPAIS) è stata istituita nel 2006 nel quadro di un protocollo di intesa, avente come scopo l'organizzazione ed il potenziamento di iniziative per l'aggiornamento degli insegnanti, fra le Associazioni AIC (Associazione Insegnanti Chimici), AIF (Associazione per l'Insegnamento della Fisica), ANISN (Associazione Nazionale Insegnanti di Scienze Naturali) e DD-SCI (Divisione Didattica della Società Chimica Italiana) e l'Ufficio Scolastico Regionale per la Sicilia.

La scuola si pone come obiettivo l'individuazione e il conseguente approfondimento delle conoscenze di base nel campo della chimica e della fisica e delle scienze della vita e della natura, normalmente presenti in tutti i curricula scolastici, che sono necessarie per comprendere e comunicare i contenuti fondamentali della moderna ricerca scientifica e tecnologica.

In questo modo si intende perseguire due fini: da un lato una maggiore sensibilizzazione nei confronti della ricerca scientifica come protagonista del progresso e, dall'altro, la dimostrazione dell'importanza di acquisire correttamente quei concetti fondamentali che, spesso, appaiono astratti e privi di un riscontro pratico.

Dal punto di vista metodologico, il programma della Scuola è strutturato in modo da favorire l'interazione fra ricercatori esperti e affermati in settori della ricerca coerenti con il tema selezionato, ed operatori altrettanto qualificati nel campo della didattica e della comunicazione. Lezioni di tipo tradizionale sono sempre integrate da dibattiti e lavori di gruppo in cui viene incoraggiata la partecipazione attiva dei corsisti.

SPAIS è caratterizzata da un'impronta marcatamente interdisciplinare. Sia i relatori sia i corsisti provengono da aree scientifiche diverse e questo aspetto, pur richiedendo frequentemente uno sforzo per superare le naturali barriere concettuali e di linguaggio, costituisce sicuramente un punto di forza e ha come conseguenza un allargato di orizzonti culturali che è sempre più necessario nella scuola di oggi. Progressivamente, sono stati introdotti anche elementi di storia e filosofia della scienza che hanno rafforzato le basi epistemologiche, anch'esse necessarie per un consolidamento dei contenuti.

La Scuola si svolge in Sicilia durante l'ultima settimana di luglio e, per favorire gli scambi ed i confronti informali, ha una connotazione residenziale. I partecipanti, docenti di tutte le discipline scientifiche, provengono prevalentemente dalla Sicilia ma la crescita della Scuola, testimoniata anche dalla pubblicazione di questi Atti, è coincisa con una maggiore partecipazione da parte di colleghi provenienti da altre Regioni.

Giunta alla sua quarta edizione, SPAIS ha affrontato temi come le nanotecnologie, l'energia, la complessità. Il tema dell'edizione corrente "Il tempo nella scienza. La scienza nel tempo" aveva l'obiettivo di stimolare una riflessione sul carattere dinamico di tutti i fenomeni riscontrabili in natura ed anche sull'evoluzione storica dei metodi e dei criteri legati all'indagine scientifica ed al modo stesso di "fare scienza".

Secondo le nostre conoscenze, il trascorrere del tempo inizia presumibilmente dalla nascita dell'universo. I cambiamenti materiali e spaziali regolati dalla chimica e dalla fisica determinano, secondo l'osservazione,

il corso del tempo. Tutto ciò che si muove e si trasforma è così descritto, oltre che chimicamente e fisicamente, anche a livello temporale. Il dato certo dell'esperienza è che tutto quanto interessa i nostri sensi è materia, ovvero trasformazione di materia, visto che tutti gli oggetti materiali si modificano; alcuni lo fanno in tempi brevi, altri in modo lento, ma tutti sono "destinati" a trasformarsi. *La materia "è", e (contestualmente) "diviene"* (assume altra forma).

L'edizione 2009 di SPAIS ha esaminato fenomeni che avvengono su scale temporali molto diverse. Dalle reazioni chimiche ai fenomeni geologici e biologici (evoluzione), fino a quelli su scala astronomica.

Allo scopo di seguire il filo logico del programma adottato, in questo volume i contributi dei relatori ed i risultati dei lavori di gruppo sono presentati nella stessa sequenza.

Doverosi e sentiti ringraziamenti vanno a tutti coloro che hanno contribuito al successo di SPAIS.

Prioritariamente, un sincero ringraziamento va rivolto all'Ufficio Scolastico Regionale per la Sicilia nelle persone del Direttore, Dott. Guido Di Stefano e del suo delegato, Prof. Giuseppe Riccioli, per avere dimostrato, non solo con un generoso contributo economico senza il quale SPAIS non potrebbe aver luogo, di credere nell'iniziativa e per averla sostenuta e pubblicizzata.

Siamo grati a tutti i relatori per avere accettato di ricoprire il ruolo di divulgatori del loro sapere, compito non sempre agevole, e per i lusinghieri commenti che molti hanno voluto esprimere.

Tutti i corsisti, alcuni dei quali ormai ospiti abituali, vanno ringraziati per avere sacrificato parte delle loro vacanze dimostrando curiosità e desiderio di crescita intellettuale e per avere determinato, con la loro presenza attiva, il successo della Scuola.

Un grazie particolare va a tutti i componenti del comitato scientifico e organizzativo per avere affrontato una quantità di lavoro non indifferente con grande entusiasmo e dedizione.

Siamo grati al Progetto Lauree Scientifiche area Chimica ed al coordinatore del progetto di Palermo, Prof. Vincenzo Frenna, per il supporto e per avere inserito SPAIS fra le attività del progetto.

Infine, un sentito ringraziamento a tutto lo staff dell'Hotel Kaos di Agrigento, sede di SPAIS 2009, per la grande professionalità dimostrata così rendendo il soggiorno, sebbene impegnativo, piacevole e rilassante per tutti.

## **SPAIS**

### **Contesti scolastici, formazione docente e aspetti didattici**

**Anna Caronia<sup>1</sup> e Maria Concetta Consentino<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Docente di Chimica c/o I.T.G. "F. Parlatore" – Palermo

<sup>2</sup> Docente di Scienze Naturali c/o I.T.G. "F. Parlatore" – Palermo

Alla fine di luglio si è conclusa la IV edizione della SPAIS, la Scuola permanente per l'aggiornamento degli insegnanti di scienze ed è necessario, in un normale processo metacognitivo a consuntivo di quanto svolto, riflettere sul proprio operato e soprattutto sulla considerazione, abbastanza ovvia ma di estrema importanza per l'eventuale prosieguo delle attività, che le idee vanno coltivate e sviluppate e le prassi conseguenti vivificate e tenute in vita con il supporto attivo delle persone.

Non si tratta certamente di esaltare l'operato della SPAIS e dei suoi partecipanti ma di evidenziare quei tanti aspetti positivi presenti nelle persone e che se ben incanalati, portano con molta probabilità, a risultati che ci spronano a fare sempre meglio.

La SPAIS nasce da un'esigenza primaria quasi da un bisogno di avere la possibilità di affrontare tematiche scientifiche d'avanguardia, approfondendole e traendo spunti aventi carattere di trasversalità, ritrovandosi insieme in un clima di aperto confronto costruttivo tra vari punti di vista.

Il settore scientifico è, infatti, il terreno di studio della SPAIS anche in considerazione del fatto che "la valorizzazione della cultura scientifica e tecnologica è uno degli obiettivi che la società della conoscenza si propone in quanto attraverso il suo raggiungimento migliorano le condizioni di vita dei cittadini" (cfr. "Policy, ricerca e strumenti per il potenziamento della cultura scientifica e tecnologica nella scuola italiana" Annali P.I. 1/2007 Le Monnier)

La SPAIS non è però una scuola settoriale, esclusivamente per biologi, o per chimici o per fisici o per matematici o per naturalisti...ma è una scuola con tanti colori e sfaccettature. Potremmo dire, forse esagerando, che è una scuola "complessa" ma è anche una scuola "in fieri" che si compone e si definisce annualmente nella messa a fuoco di una specifica tematica e successivamente si ricostituisce attorno ad un altro settore di interesse per i necessari approfondimenti.

E' chiaro che tali momenti di approfondimento, un po' speciali per i docenti, perché realizzati durante il meritato periodo di riposo estivo, devono fare i conti, e guai se così non fosse, con i bisogni reali degli stessi. Bisogni che scaturiscono dalla professione svolta e dall'importanza di mantenere viva l'attenzione rispetto ai diversi settori di studio che sono poi oggetto di comunicazione didattica nella prassi scolastica.

Riteniamo, infatti, che la formazione debba essere una costante nella vita professionale dei docenti. Se non fosse così, la routine quotidiana del lavoro in classe ci voterebbe ad una forma di fossilizzazione della nostra professione e ad un annichilimento dei percorsi formativi che vanno invece costantemente nutriti dai progressi della scienza.

Indispensabile è l'apertura mentale verso le problematiche scientifiche, ma è altrettanto necessario che tale apertura mentale debba essere sempre coltivata e sostenuta dalla ricerca, dai momenti di studio, dalla relazione con l'altro e dal continuo confronto.

Non ci sono paletti fermi, non ci sono confini nella SPAIS, c'è un vero e reale bisogno di crescita professionale.

E' come ritornare giovani in una condizione di attivazione e di implementazione dei processi cognitivi che vanno sempre alimentati da conoscenza e ragionamenti.

La SPAIS è allora dichiaratamente una scuola che si pone in una chiara prospettiva di formazione in itinere per raccogliere e lanciare le sfide del cambiamento e dell'innovazione.

Si incentiva, almeno questo è uno degli obiettivi precipui, la intelligente curiosità in ambito scientifico volta al conseguente miglioramento della qualità dell'offerta formativa che rivolgiamo ai nostri studenti, attraverso l'approfondimento di tematiche d'avanguardia in linea con le esigenze della società della conoscenza.

I processi di innovazione ma anche quelli di approfondimento tematico possono così costituire delle leve strategiche per la promozione di una professionalità docente colta e competente che si ponga nel contesto scuola con adeguate e migliorate competenze professionali.

Competenze professionali che riguardano varie sfere: didattica, relazionale, deontologica...

LA SPAIS tende ad incidere sulla varie competenze ma, soprattutto, su quella disciplinare intesa come padronanza culturale della disciplina insegnata e come capacità di alimentare il confronto con altre materie nell'ottica dell'interdisciplinarietà in una sorta di life long learning tanto indispensabile per la professione docente. E a proposito di interdisciplinarietà giova ricordare quanto si trova sul Documento finale della Commissione ministeriale per la riorganizzazione degli istituti tecnici e professionali – Persona, Tecnologie e professionalità” del 3 marzo 2008: “La sfida che la complessità prospetta alla scienza è soprattutto quella di esplorare e sviluppare il territorio dell'interdisciplinarietà, della multidimensionalità del reale, della complementarietà dei saperi. Nel nuovo paradigma della complessità, le diverse discipline si presentano come un sistema a rete, con correlazioni e nodi multipli. **In questo modo vengono superate tutte le chiusure disciplinari, tutte le dicotomie che finiscono per paralizzare la ricerca e per impedire la comprensione e la trasformazione della realtà”.**

L'acquisizione e l'approfondimento di conoscenze sono inoltre capaci di generare “valore” e costituiscono indubbiamente uno dei più importanti fattori di sviluppo delle economie occidentali. Un altro aspetto importante da evidenziare è che i docenti durante le attività della SPAIS si sentono integrati nel circuito della ricerca scientifica e tecnologica e nel rapporto con le Università e i centri di ricerca. Come dice André Giordan “apprendo se riesco a sentirmi coinvolto, se provo piacere, se faccio dei collegamenti, se posso agganciare l'informazione ad una rete di conoscenze e trovo metodi che mi aiutino a pensare”.

Tutto poi dovrebbe avere una conseguente ricaduta sui giovani che rappresentano il fulcro dell'offerta formativa delle istituzioni scolastiche, dove i processi educativi dovrebbero essere sostenuti dalla motivazione all'apprendimento e all'approfondimento delle tematiche scientifiche in una sorta di comunità di apprendimento, in cui risulta fondamentale non soltanto l'azione incrementale del sapere ma soprattutto l'allargamento degli orizzonti conoscitivi e l'acquisizione e/o il rafforzamento delle seguenti competenze riportate nel decreto Ministeriale del 22 agosto 2007 relativamente all'asse scientifico tecnologico:

- Osservare, descrivere ed analizzare fenomeni appartenenti alla realtà naturale e artificiale e riconoscere nelle sue varie forme i concetti di sistema e di complessità;
- Analizzare qualitativamente e quantitativamente fenomeni legati alle trasformazioni di energia a partire dall'esperienza;
- Essere consapevole delle potenzialità delle tecnologie rispetto al contesto culturale e sociale in cui vengono applicate.

Si conviene allora che “...lo sviluppo professionale deve essere inteso come un sistematico processo caratterizzato dal progressivo consolidamento e aggiornamento delle competenze, al fine di realizzare attraverso la crescita dei singoli e la loro valorizzazione personale e professionale il miglioramento dell'istituzione scolastica nel suo complesso e conseguentemente, dei risultati degli studenti (cfr. “Policy, ricerca e strumenti per il potenziamento della cultura scientifica e tecnologica nella scuola italiana” Annali P.I. 1/2007 Le Monnier).

Al fine di rendere operativi gli aspetti sopra citati il Comitato Scientifico della SPAIS ogni anno propone tematiche innovative come quella affrontata nell'ultima edizione dal titolo: **Il Tempo nelle scienze. Le scienze nel tempo.**

La suddetta tematica, in particolare, è stata scelta per due motivi:

1. a scuola si affrontano raramente, nei vari ambiti disciplinari, anche in ambito scientifico, le tematiche culturali a partire dal novecento;
2. i docenti hanno mostrato interesse nelle varie annualità, alla storia delle scienze ed alla evoluzione del pensiero scientifico ed alla sua dimensione storica.

Le scienze, a scuola, si studiano facendo riferimento all'impostazione di tipo newtoniana, mentre con Einstein, tale impostazione viene sconvolta. La teoria della relatività e di tutto ciò che comporta ormai è obbligo che si affronti a scuola, perchè uno studente dei nostri tempi deve avere quanto meno l'idea del cambiamento delle scienze moderne.

Il tempo, in modo particolare, come proprietà e concezione ha subito un cambiamento sia a livello scientifico con Einstein sia a livello filosofico con Bergson, sia a livello artistico con Dalì.

L'interrelazione tra i vari aspetti, permette di far conoscere ai nostri ragazzi l'evoluzione della realtà umana, infatti la rivoluzione scientifica e umanistica avvenuta ai primi del novecento è di importanza strategica per la conoscenza della "cultura" contemporanea e i suoi successivi sviluppi.

**La rivoluzione relativistica mette in discussione le tradizionali soluzioni epistemologiche intorno alla conoscenza umana, alle sue possibilità e ai suoi limiti.** Thomas Kuhn nel libro **La struttura delle rivoluzioni scientifiche (1962)** *"considera come caso esemplare di rivoluzione scientifica la rivoluzione copernicana, le sue idee sono adattabili anche alla rivoluzione relativistica e quantistica. Dal suo punto di vista c'è nella storia della scienza un periodo di scienza normale, in cui i membri della comunità scientifica adottano in modo acritico determinati paradigmi. Questi sono assunti di carattere teorico, posti alla base di ogni ricerca empirica. Il lavoro normale dello scienziato viene svolto alla luce dei paradigmi, mai seriamente messi in discussione, per cui la ricerca tende a consolidare nel tempo la forza esplicativa della teoria. Così potremmo considerare la salda fiducia dei newtoniani nelle leggi del moto, nella forza di gravità, nel tempo assoluto, o quella dei discepoli di Maxwell nell'esistenza dell'etere, come esempi ottimali di scienza normale. Poi alcuni individui, di solito marginali rispetto alla comunità scientifica ufficiale, vedono alcune difficoltà nella teoria dominante, e iniziano a metterne in discussione i paradigmi. E' il periodo della scienza rivoluzionaria, attraverso cui una teoria scientifica viene sostituita con una nuova spiegazione dei fatti, messa a punto con l'assunzione di nuovi paradigmi. Così Planck, notando le difficoltà del vecchio paradigma continuista nello spiegare i fenomeni termodinamici, introduce il nuovo paradigma della discontinuità quantica della natura. Einstein, per salvare l'universalità delle leggi di natura, introduce la relatività del tempo e dello spazio."*

Se l'ultimo tema affrontato dalla SPAIS è stato quello dell'evoluzione delle conoscenze e del pensiero scientifico non meno importante, durante tutto il cammino dei quattro anni di scuola estiva,

è stata l'incentivazione di tutti quegli aspetti legati all'intento di sentirsi responsabili del proprio apprendimento, nell'ottica dell'empowerment cognitivo cioè di quel processo che, pur partendo dal singolo, risulta favorito da un ambiente in cui tutti credono, come quello che è stato realizzato nella SPAIS.

Ciò potrebbe portare ad un miglioramento nell'organizzazione della didattica, all'interno dei contesti scolastici, da parte dei docenti "empowered" e tale cambiamento potrebbe determinare indirettamente un maggiore empowerment negli studenti, come dimostrato dagli studi condotti da Marks e Louis (1997).

Ci sembra opportuno concludere queste brevi riflessioni sugli aspetti della formazione docente in relazione con quelli altrettanto importanti che afferiscono alla didattica, tenendo presente il seguente concetto emerso da alcune relazioni della IV edizione della SPAIS: "... nessun processo evolutivo è concluso, ma sempre in itinere".

E la formazione della professionalità docente è sicuramente da annoverare tra i processi mai conclusi, ma sempre in itinere.

# L'irrompere del tempo nelle scienze

**Giuseppe Gambillo**

Dipartimento di Filosofia, Facoltà di Scienze della Formazione, Università di Messina

e-mail: gembillo@unime.it

## 1. Premessa

La scienza classica è tutta impostata sulla negazione o sulla messa tra parentesi del tempo e di tutto ciò che è collegato con esso. L'obiettivo fondamentale dei suoi fondatori è stata la scoperta di leggi eterne, la cui massima espressione è rappresentata, ovviamente, dalla legge di gravitazione universale, per la cui scoperta Newton è stato giudicato non solo il più bravo dei fisici, ma anche il più fortunato. "Il più fortunato", ha detto espressamente Lagrange, perché *la Legge della Realtà* si può scoprire una sola volta e a lui è toccato in sorte di farlo.

Tutto l'orizzonte di senso della scienza classica si configura in questo modo e si caratterizza per questi principi. Ma, proprio in contrapposizione con questa visione della Realtà, nella cultura occidentale il ruolo positivo e costruttivo del tempo è emerso, inizialmente, in Filosofia. All'interno di essa l'apparizione del tempo ha avuto subito una duplice connotazione: ontologica e logica. Per Vico, infatti, che per primo ha pensato alla storia come a una *Scienza Nuova*, appartiene alla storia, è storico, sia tutto ciò che l'uomo ha fatto, ma anche, ed è la prima volta che ciò accade, la sua mente. Egli parlava infatti esplicitamente di "modificazioni della mente". Circa un secolo dopo Hegel avrebbe aggiunto che il Tutto è immanente Divenire, è Storia, e che l'attività della coscienza umana consiste nel fare esperienza di tale storicità, prendendone consapevolezza. Insomma, con Vico e con Hegel si è passati dall'Essere eterno della Fisica all'eterno Divenire della Storia.

Questa svolta, come dicevo, si è presentata come esplicita contrapposizione fortemente polemica alle fondamenta su cui poggiava la scienza classica inaugurata da Galilei e completata da Newton. Per un certo periodo, dunque, c'è stato uno scontro tra l'eternità delle leggi e degli oggetti fisici da un lato, e la temporalità, la storicità degli eventi, dall'altro. A un certo punto, però, il tempo e la storia hanno fatto "irruzione" anche nelle scienze e, in particolare, in quella "atemporale" per eccellenza, la fisica. In riferimento alla fisica, l'espressione che ho usato nel titolo, "l'irrompere del tempo", è particolarmente adatta. Come cercherò di mostrare, infatti, tale irrompere ha trasformato radicalmente e drammaticamente sia il mondo fisico in quanto tale, sia l'approccio teorico ad esso.

Per argomentare la mia tesi, seguirò tre tappe che corrispondono a tre diverse dimensioni fisiche: quella degli oggetti a nostra dimensione; quella del pianeta Terra nella sua totalità; quella dell'Universo intero. Queste tre tappe saranno rappresentate da tre nomi che hanno portato un contributo determinante all'elaborazione teorica della tematica del tempo e della storia in rapporto alle tre dimensioni mondo fisico a cui ho fatto riferimento. I tre pensatori sono: 1) Jean-Joseph Fourier; 2) Alfred Wegener; 3) Edwin Hubble.

## 2. Fourier e l'entropia come misura della dissipazione dei corpi

Dunque, dopo quelli fatti da Vico e da Hegel in Filosofia, il passo successivo verso la trasformazione logico-ontologica della Realtà e della scienza in senso storico-temporale è avvenuto in Fisica, contemporaneamente alla svolta logica in Filosofia. Infatti, nel 1807, in singolare coincidenza con la pubblicazione della *Fenomenologia dello Spirito* di Hegel, uno studioso francese di Fisica, il "dilettante" Jean-Joseph Fourier ha elaborato le sue prime riflessioni sul calore, precisando espressamente, in sede di ricostruzione storiografica, che "questa teoria è stata esposta per la prima volta in un manoscritto inviato a l'Institut de France alla fine del

1807"<sup>1</sup>. L'inizio ufficiale e pubblico, tuttavia, è stato di poco posteriore. Infatti, quattro anni dopo, nel 1811, Fourier vinceva un premio bandito dall'*Académie française* con un saggio in cui esponeva una particolare trattazione teorica intorno alla "propagazione del calore nei solidi"<sup>2</sup>. Era il momento in cui la meccanica newtoniana, "completata" matematicamente da Laplace e da Lagrange, aveva raggiunto il suo massimo splendore. Ebbene, la trattazione di Fourier provocò il primo scacco, proveniente dall'interno della Fisica, a tale concezione meccanicistica del mondo, mostrando che anche il fenomeno della propagazione del calore era un fatto universale perché, come Fourier affermava espressamente, "il calore penetra, come la gravità, in tutte le sostanze dell'universo, i suoi raggi occupano tutte le parti dello spazio"<sup>2</sup>. Fourier, inoltre, sottolineava esplicitamente che la propagazione del calore tra due corpi di diversa temperatura non può essere spiegata in termini meccanici, precisando che "qualunque sia il significato delle teorie meccaniche, esse non si applicano affatto agli effetti del calore. Essi costituiscono un ordine speciale di fenomeni che non possono essere spiegati mediante i principi del movimento e dell'equilibrio"<sup>3</sup>. Queste considerazioni si fondavano sul presupposto secondo il quale ogni corpo è caratterizzato dalla capacità di *ricevere, accumulare e trasmettere* calore. Tale constatazione richiede una riflessione preliminare. Ovvero, "per fondare questa teoria, è necessario innanzitutto distinguere e definire con precisione tutte le proprietà elementari che determinano l'azione del calore". A tal fine Fourier specificava: "Io ho riconosciuto intanto che tutti i fenomeni che dipendono da tale azione si risolvono in un piccolissimo numero di fatti generali e semplici; e poiché l'intera questione fisica di questo genere è ricondotta a una ricerca di analisi matematica, io sono giunto alla conclusione che per determinare con numeri i movimenti più vari del calore, è sufficiente sottoporre ogni sostanza a tre osservazioni fondamentali"<sup>4</sup>.

Precisando ulteriormente, dal nuovo punto di vista dal quale vengono analizzati, «in effetti, i diversi corpi non possiedono affatto nel medesimo grado la facoltà di *contenere* il calore, di *riceverlo*, o di *trasmetterlo* attraverso la loro superficie, e di *condurlo* all'interno della massa". E proprio perché non si distribuiscono in maniera uniforme, "esse sono tre quantità specifiche che la nostra teoria distingue chiaramente, e che insegna a misurare"<sup>5</sup>. Fourier traduceva poi questa argomentazione in linguaggio matematico ed enunciava un'elegante formulazione della legge che regola la trasmissione del calore e che consiste nella notazione per la quale *il flusso di calore fra due corpi è proporzionale al gradiente di temperatura fra essi*. Tale flusso ha una direzione costante, dal corpo più caldo a quello più freddo. Non solo. Ma questa è una caratteristica universale di tutti i corpi, perché se è vero che tutti i corpi sono caratterizzati dalla interazione gravitazionale, è altrettanto vero che tutti i corpi possiedono e scambiano una certa quantità di calore. Allora anche il calore è una caratteristica universale dei corpi, "perché l'azione del calore è sempre presente, essa penetra tutti i corpi e gli spazi, essa influisce su tutti i processi delle arti, e concorre a tutti i fenomeni dell'universo"<sup>6</sup>.

Così, accanto alla gravità newtoniana emerge un altro «universale». Un universale che incide sui corpi in maniera del tutto nuova, sia al loro interno, sia per le interazioni con l'esterno che provoca. Per esempio, "quando il calore è distribuito in maniera disuguale tra i differenti punti di una massa solida, tende a porsi in equilibrio, e passa lentamente dalle parti più calde a quelle che lo sono meno; contemporaneamente esso si disperde attraverso la superficie, e si disperde nell'ambiente o nel vuoto"<sup>7</sup>. Inoltre, in aggiunta a tali effetti, «questa tendenza a una diffusione uniforme, e questa emissione spontanea che avviene sulla superficie dei corpi, modifica continuamente la temperatura dei differenti punti»<sup>8</sup>. Se infatti la gravità si esercita su corpi rigidi che vengono spostati di luogo, ma non subiscono modifiche qualitative, al contrario il calore trasforma chimicamente i corpi, provoca cambiamenti di stato e modifica le loro proprietà intrinseche. Ma la rivoluzione provocata dalle riflessioni di Fourier non finiva qui. Innanzitutto veniva a cadere la pretesa identifica-

---

<sup>1</sup> J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, Gabay, Sceaux 1988, p. XVIII. Avverto una volta per tutte che le citazioni tratte da quest'opera sono state tradotte da me. Cfr. Anche *Oeuvres de Joseph Fourier*, par Gaston Darboux, 2 tomes, Gauthier-Villars, Paris 1888-1890.

<sup>2</sup> Ivi, p. I. Su ciò, cfr. S. N. Carnot, *La potenza motrice del fuoco*, trad. di B. Jannamorelli, Cuen, Napoli 1996

<sup>3</sup> Ivi, pp. II-III

<sup>4</sup> Ivi, p. III

<sup>5</sup> Ivi, p. IV

<sup>6</sup> Ivi, pp. 1-2

<sup>7</sup> Ivi, p. 2

<sup>8</sup> *Ibidem*

zione tra matematica e scienza newtoniana, perché anche la nuova scienza non newtoniana si fondava su formule matematiche universali; inoltre, il cambiamento più radicale riguardava i concetti di causa, tempo e spazio. Limitandoci soltanto a quest'ultimo punto, è opportuno sottolineare in che senso e in che modo sia avvenuto un mutamento radicale. La causa della trasmissione del calore è, come si è detto, la differenza di temperatura. Ma il contatto tra i corpi causa il flusso di calore dal corpo più caldo a quello più freddo fino al conseguimento dell'equilibrio termico, raggiunto il quale, la causa scompare per cui, contrariamente a quanto era possibile in meccanica classica, non si può più risalire dall'effetto alla causa: ciò che è avvenuto non può essere annullato, a meno di un intervento esterno. In altri termini, il processo di diffusione del calore, quale avviene naturalmente, è irreversibile. Con questo entra nella fisica il concetto di direzione privilegiata degli eventi e la reversibilità, vanto della meccanica classica, non ha più possibilità di realizzazione concreta e «spontanea». Considerato ciò, il tempo di trasmissione del calore diventa essenziale sia per la sua direzione, sia per la sua durata. In questo modo il tempo non è più un contenitore degli eventi, esterno rispetto ad essi, ma ne costituisce la struttura intrinseca.

Analogo discorso va fatto per lo spazio, il quale non è più il luogo nel quale si situano indifferentemente gli oggetti. Con l'emergere dei nuovi fenomeni o, meglio, con la nuova attenzione ad essi, siamo ora di fronte a degli eventi che istituiscono tra di loro una interrelazione caratterizzata da scambi di energia. Ogni evento scambia energia con l'ambiente esterno; ambiente che non è più indifferente, ma che è in osmosi con l'evento stesso; ambiente che assorbe comunque una parte dell'energia prodotta dal fenomeno. In altri termini, si scopre che nella produzione e nello scambio di calore tra i corpi, una parte di esso si disperde o si degrada. In particolare, il fenomeno della degradazione si evidenzia in tutta la sua importanza quando si tenta di trasformare tutto il calore ottenibile da un determinato sistema in lavoro meccanico. Ci si accorge, in tale circostanza, che una parte del calore si disperde nell'ambiente esterno sotto forma di energia degradata. In conseguenza di ciò si arriva a una nuova definizione di corpo, che comporta la trasformazione del concetto di corpo rigido in quello di sistema termodinamico, caratterizzato da nuovi parametri: la temperatura, la pressione, il volume. Sistema che è definito anche dalle condizioni al contorno, «al limite», cioè dall'ambiente esterno. Non solo: il sistema non è più il corpo singolo della meccanica, ma è costituito da un numero enorme di componenti ed impone quindi il passaggio dall'analisi di uno o due corpi all'analisi di moltitudini. Sul piano formale le prime conseguenze si manifestano attraverso l'uso di un nuovo metodo di calcolo, quello legato alla probabilità statistica. E qui si apre il primo dilemma: se la necessità di calcolare la media statistica del movimento delle molecole che costituiscono i gas dipenda dalla nostra incapacità di seguire tutti i movimenti delle singole molecole o se, invece, tale movimento sia effettivamente caotico. Sorge cioè il dilemma se l'impossibilità di prevedere esattamente la cinetica dei gas sia dovuta a nostra ignoranza o a caoticità strutturale.

Questo problema viene strettamente collegato alla domanda se la direzione privilegiata del flusso del calore dal corpo più caldo a quello più freddo sia oggettiva e strutturale o solo altamente probabile. La soluzione in senso probabilistico fu enunciata da Boltzmann, che elaborò una teoria cinetica dei gas che stimolò tante e tali riflessioni da condizionare tutta la termodinamica di fine Ottocento<sup>9</sup>. La soluzione opposta, quella che considerava i fenomeni irreversibili come naturali e quelli reversibili come ideali, fu inizialmente avanzata da Planck, il quale arrivò alla rivoluzionaria scoperta del quanto d'azione proprio approfondendo i fenomeni termodinamici<sup>10</sup>. Ma, a parte ciò, è opportuno sottolineare la conseguenza più importante derivabile dallo studio del flusso del calore: se è vero che c'è un movimento irreversibile che dai corpi più caldi porta a quelli più freddi fino al raggiungimento di un equilibrio irreversibile, l'Universo rischia una fine prevedibile: la morte termica per raggiunto equilibrio e conseguente caduta nell'immobilità assoluta. La via d'uscita che si troverà per questa ipotesi sarà la definitiva storicizzazione della scienza e la connessa trasformazione degli oggetti naturali in eventi storici<sup>11</sup>. In questo modo la Natura è adesso diventata Storia da entrambi i punti di vista: da quello filosofico, tramite Hegel; da quello fisico, tramite Fourier.

<sup>9</sup> Cfr. ora, L. Boltzmann, *Lectures on Gas Theory*, University of California Press, Berkeley 1964.

<sup>10</sup> Cfr. M. Planck, *Scienza, filosofia religione*, trad. di F. Selvaggi, Fabbri, Milano 1965; *Id.*, *La conoscenza del mondo fisico*, trad. di E. Persico e A. Gamba, Torino, Boringhieri 1964. .

<sup>11</sup> Su ciò cfr. I. Prigogine- I. Stengers, cit., pp. 136 e ss.; su cui cfr. G. Gembillo – G. Giordano – F. Stramandino, *Ilya Prigogine scienziato e filosofo*, Armando Siciliano, Messina 2004; G. Giordano, *La filosofia di Ilya Prigogine*, Armando Siciliano, Messina 2005.

### **3. Wegener e la storia della Terra**

Il tema del calore ha avuto un ruolo fondamentale anche nella scoperta della storicità della Terra, considerato che, diversamente da quanto implicito nella immagine classica tradizionale, "il corso di questa storia sembra regolato dall'energia termica terrestre"<sup>12</sup>. Infatti, contrariamente alla consueta immagine di un pianeta costituito da materia inerte e soggetto, semmai, a un processo di erosione superficiale, emerge, a poco a poco, l'immagine di un pianeta nel quale il ruolo della temperatura acquista un'importanza sempre più rilevante, fino a costituirne l'aspetto principale. Di ciò ci si rende conto quando diventa chiaro che "la più importante sorgente energetica terrestre è l'energia termica della disintegrazione della materia. Naturalmente, l'energia assume anche altre forme: energia di posizione dovuta alla forza di gravità, energia cinetica di rotazione e rivoluzione e così via. Alla fine, tuttavia, tale energia viene trasformata in calore all'interno della Terra e la riscalda". L'evento si svolge in questo modo: "Il calore passa a poco a poco dall'interno alla superficie terrestre e si disperde nello spazio. Nel corso di tale deflusso, l'energia termica causa vari fenomeni geologici. In questo senso, la Terra è un motore termico"<sup>13</sup>. Insomma, si scopre che anche per il nostro pianeta nella sua totalità, vale quanto avviene nel processo di trasmissione del calore nei singoli corpi. Infatti, "quando si manifesta una differenza di temperatura all'interno di una sostanza, il calore si sposta dalla parte più calda a quella più fredda. Maggiore la differenza di temperatura (in altre parole, il gradiente termico), maggiore il flusso di calore"<sup>14</sup>.

La constatazione di tutto ciò conduce a rilevare che il pianeta Terra è strutturalmente caratterizzato da un flusso continuo di calore, che dal suo interno si irradia verso l'esterno, disperdendosi. "Di conseguenza, se conosciamo la conducibilità termica degli strati nei quali viene misurato il gradiente termico, possiamo calcolare la quantità di calore che attraversa gli strati. La quantità di calore che giunge dall'interno della Terra alla superficie e si disperde nello spazio è detta flusso di calore continentale. Questa è la quantità di energia termica che la Terra va perdendo: in altre parole, l'uscita nel bilancio "termico terrestre"<sup>15</sup>.

Lo studio di questo e di altri fenomeni connessi spetta, com'è noto, alla geologia, che ha seguito anch'essa le vicende di tutte le altre scienze le quali "alternano brevi periodi di rapida crescita a lunghi intervalli di stabilità"<sup>16</sup>. La storia della geologia dell'Ottocento, infatti, mostra come anche al suo interno il dilemma fra interpretazione continua e interpretazione discontinua della Realtà abbia avuto un ruolo centrale. In particolare, "all'inizio del diciannovesimo secolo, il trionfo dell'uniformismo sul catastrofismo, e mezzo secolo più tardi la teoria darwiniana dell'evoluzione, furono le prime rivoluzioni della geologia"<sup>17</sup>. Nel frattempo, però, una nuova teoria del tutto inaspettata ha scosso dalle fondamenta la concezione tradizionale, al punto che possiamo affermare che "oggi ci siamo da poco lasciati alle spalle un'altra rivoluzione"<sup>18</sup>. Tuttavia, prima di raggiungere la pacificazione, la battaglia è stata dura e "la rivoluzione ha avuto il suo precursore, e le sue vicissitudini sono rivelatrici"<sup>19</sup>.

Su queste premesse, infatti, ha trovato fondamento la teoria della "deriva dei continenti", la cui storia è questa: "Nel 1912, lo scienziato tedesco Alfred Wegener enunciò la teoria dello spostamento delle masse continentali. Secondo questa teoria, nel passato geologico alcuni continenti, galleggiando alla deriva sulla superficie terrestre, si sono spostati fino a giungere alle loro posizioni attuali"<sup>20</sup>. Ma l'ipotesi di Wegener ap-

<sup>12</sup> H. Takeuchi – S. Uyeda – H. Kanamori, *La deriva dei continenti*, trad. di P. Gandolfo e R. Valla, Boringhieri, Torino 1978, p. 182

<sup>13</sup> Ivi, p. 182

<sup>14</sup> Ivi, p. 84

<sup>15</sup> *Ibidem*

<sup>16</sup> T. H. van Andel, *Storia della terra*, trad. di R. Villa e M. Conti, Bollati Boringhieri, Torino 1988, p. 98

<sup>17</sup> *Ibidem*

<sup>18</sup> *Ibidem*

<sup>19</sup> Ivi, p. 99.

<sup>20</sup> H. Takeuchi-S.Uyeda-H.Kanamorf, *La deriva dei continenti*, cit., p. 15

parve inaccettabile agli studiosi dell'epoca, perché "l'idea che delle masse così enormi possano essere andate alla deriva, e per migliaia di chilometri, sembrava frutto di fantasia"<sup>21</sup>. Dunque, alla luce di queste reazioni immediate e delle conseguenti vivaci contrapposizioni, "non deve sorprenderci che la teoria di Wegener, così rivoluzionaria nella sua concezione, abbia colpito il pensiero geologico come una bomba, e che non la si sia potuta in poco tempo dimostrare o confutare"<sup>22</sup>. Insomma, in conseguenza dei rivolgimenti provocati si deve ammettere che "poche idee sono state più audaci"<sup>23</sup>. E, in questo caso, quella di Wegener, per affermarsi ha dovuto combattere aspramente, perché quando egli enunciò la sua teoria non fu preso in nessuna considerazione. Egli, "che aveva raccolto un'ampia serie di corrispondenze geologiche tra le due opposte rive dell'oceano, fu ascoltato con sorpresa ma con qualche simpatia in Europa, ma oltreoceano l'accoglienza fu molto fredda"<sup>24</sup>.

A commento, si può dire che, nel momento in cui fu enunciata, si trattava di una teoria troppo rivoluzionaria: "Evidentemente, la deriva dei continenti era un'idea che precorreva i tempi, e per decenni non si presentò più alla ribalta"<sup>25</sup>. In riferimento specifico al suo autore, poi, è stato affermato che, per un verso, non gli giovò certo il fatto di non avere un curriculum di studi ufficialmente inserito nell'ambito di ricerca al quale egli si dedicava; per l'altro verso, i suoi contemporanei non avevano preso coscienza delle difficoltà insite nelle teorie tradizionali e non avevano ancora accettato l'idea che il tempo dovesse fare parte integrante delle teorie stesse. Per loro si doveva ancora scommettere a favore dell'eternità del reale e delle sue leggi. In tale contesto, "Wegener fu ostacolato dal fatto di non essere un vero geologo". Inoltre, "per quanto riguardava il tempo, i geologi avevano appena imparato a vivere con un passato di insondabile antichità, e non erano ancora pronti ad accettare l'aleatorietà di luogo che è caratteristica di un mondo in cui i continenti vanno alla deriva"<sup>26</sup>. Wegener, comunque, aveva presentato le proprie idee e aveva cercato di far comprendere "in che consiste la teoria della deriva dei continenti" appellandosi preliminarmente a una consonanza di fondo tra biologi e geologi. Aveva, infatti preso atto della situazione per la quale "accade raramente, dato lo stato ancora imperfetto delle nostre attuali conoscenze, che, nel riferirci al passato della terra, si giunga a risultati opposti, sia che si consideri il problema dal lato biologico sia da quello geofisico"<sup>27</sup>. Infatti, in genere gli studiosi sono concordi nell'immaginare, genericamente, degli antichissimi punti di contatto tra i vari continenti e nell'elaborare, su questa convinzione, ipotesi che rendano ragione della omogeneità tra i vari continenti. Così, "i paleontologi concordano coi geologi e coi botanici nell'ammettere che i continenti, oggi separati da una larga estensione di mare profondo, fossero uniti nel passato geologico da tratti di territorio che resero possibile uno scambio ininterrotto e reciproco della fauna e della flora. I paleontologi traggono questa conclusione dalla presenza di numerose specie identiche, che nel passato della terra vissero sugli uni e sugli altri continenti e per le quali sembra inverosimile ammettere un'apparizione contemporanea"<sup>28</sup>. A questa conclusione non fanno da ostacolo possibili considerazioni restrittive, perché il dato "che la percentuale di casi identici sia limitata, si spiega facilmente con il fatto che solo una parte degli organismi viventi a quei tempi si è conservata allo stato fossile ed è stata trovata fino ad ora"<sup>29</sup>. Né sembrano valide altre obiezioni perché, "anche se l'intero mondo organico fosse stato un tempo identico su tali continenti, la limitatezza delle nostre conoscenze non potrebbe avvalorare tale ipotesi; e d'altra parte, anche ammessa una completa possibilità di scambio, può darsi che il mondo organico non sia stato completamente identico, così come anche oggi l'Europa e l'Asia hanno una flora e una fauna loro particolari"<sup>30</sup>. Del resto, altre considerazioni di carattere

---

<sup>21</sup> Ivi, p. 15

<sup>22</sup> Ivi, p. 16

<sup>23</sup> Ivi, p. 18

<sup>24</sup> T. H. van Andel, *Storia della terra*, cit., p. 99

<sup>25</sup> *Ibidem*

<sup>26</sup> *Ibidem*

<sup>27</sup> Cfr. A. Wegener, *La formazione dei continenti e degli oceani*, trad. di C. Giua, Boringhieri, Torino 1976, p. 35.

<sup>28</sup> *Ibidem*

<sup>29</sup> *Ibidem*

<sup>30</sup> Ivi, pp. 35-36

più generale conducono alle medesime conclusioni, nel senso che “allo stesso risultato giunge anche lo studio comparato dell'attuale regno animale e vegetale”. Questo discorso va generalizzato. Infatti, “allo stesso modo le affinità esistenti tra la fauna e la flora d'oggi portano a concludere che anche la fauna e la flora del passato geologico fossero identiche e che perciò debbano aver avuto luogo degli scambi. Solo dopo che venne a mancare questo collegamento si sarebbe determinata una separazione nelle varie specie oggi viventi”<sup>31</sup>. Su questa base, allora, la conclusione più plausibile sembra corroborare la convinzione per la quale “non si ripeterà mai a sufficienza che se non si ammettono queste unioni tra continenti, tutto lo sviluppo della vita sulla terra e l'affinità degli attuali organismi, pur viventi in continenti lontani, sono destinati a restare per noi un enigma insolubile”<sup>32</sup>. Allora, il dilemma da risolvere è questo: “Vi furono un tempo dei ponti di territorio oppure i continenti erano separati come oggi da estesi fondi oceanici?”<sup>33</sup>. Di fronte a questo dilemma bisogna innanzitutto dire che “è impossibile non accettare l'ipotesi degli antichi collegamenti continentali se non si vuole rinunciare a comprendere lo sviluppo della vita sulla terra. Ma è ugualmente impossibile respingere le ragioni con le quali i sostenitori della dottrina della permanenza si rifiutano di ammettere l'esistenza dei continenti intermedi. Non resta allora che una possibilità: e cioè che nelle premesse date come intuitive si nasconda qualche errore”<sup>34</sup>. Per dirimere la questione non sembra ci sia altra via d'uscita che presentare una nuova ipotesi capace di sciogliere in maniera convincente i nodi più importanti. Ovvero, “a questo punto si inserisce la teoria della deriva dei continenti. L'ipotesi, di per sé intuitiva, che sta alla base sia degli antichi collegamenti continentali, sia della dottrina della permanenza e cioè che la posizione relativa delle aree continentali (prescindendo dalla variazione dei mari superficiali) le une rispetto alle altre non sia mai mutata, deve essere falsa”<sup>35</sup>. Inoltre, dopo avere discusso le varie ipotesi in campo, Wegener ha affermato: “I continenti debbono aver subito uno spostamento. L'America meridionale deve essere stata vicino all'Africa e aver formato con questa un unico continente, che nel Cretaceo si scisse poi in due parti, le quali, come un masso di ghiaccio che si spacchi, nel corso di milioni di anni si allontanarono sempre più l'una dall'altra. I contorni di queste due masse sono ancor oggi di una concordanza sorprendente”<sup>36</sup>. A ulteriore conferma di ciò, “riuscirà facile notare che l'intera costruzione della teoria della deriva muove dall'ipotesi che i fondi marini e le aree continentali siano costituiti da materiali diversi, rappresentino cioè strati diversi della terra”<sup>37</sup>. Si tratta di un dato che corrobora a sufficienza l'ipotesi teorica che sta a fondamento della nuova prospettiva. Alla luce di essa, insomma, “se prendiamo come punto di partenza questa teoria noi veniamo a soddisfare a tutti i postulati sia della teoria degli antichi collegamenti continentali che della dottrina della permanenza”<sup>38</sup>.

Muovendo da queste considerazioni, Wegener si è proposto come scopo esplicito di “dare una dimostrazione completa della fondatezza di queste idee”<sup>39</sup>. A tale fine ha riportato una serie di corroborazioni tratte dai vari ambiti, a cominciare da quello della geodesia, “sia perché recentemente per questa via fu addotta la prima vera prova dell'attuale deriva della Groenlandia, prevista dalla teoria, sia perché questa conferma, valida dal lato sperimentale, sarà considerata dalla maggior parte degli studiosi come la prova più esatta e sicura di essa”<sup>40</sup>. A sua parere, ancora, “se gli spostamenti di continenti si sono verificati durante periodi così lunghi è probabile che essi continuino ancor oggi: la questione consiste solo nel sapere se i movimenti sono abbastanza rapidi per prestarsi alle nostre misure astronomiche entro periodi di tempo non troppo lunghi”<sup>41</sup>.

---

<sup>31</sup> Ivi, p. 36

<sup>32</sup> *Ibidem*

<sup>33</sup> Ivi, p. 50

<sup>34</sup> *Ibidem*

<sup>35</sup> *Ibidem*

<sup>36</sup> *Ibidem*

<sup>37</sup> Ivi, p. 55

<sup>38</sup> *Ibidem*

<sup>39</sup> *Ibidem*

<sup>40</sup> Ivi, p. 56

<sup>41</sup> *Ibidem*

Anche da un altro ambito arrivano puntuali conferme che ci dicono, per esempio, "che la teoria della deriva dei continenti si trova nel miglior accordo con i risultati della geofisica."<sup>42</sup>

Per quanto riguarda la geologia, Wegener<sup>43</sup> si appellava espressamente alla "oggettività della constatazione" della veridicità della teoria<sup>44</sup>. Aggiungeva, inoltre, che "anche la paleontologia e le osservazioni sulla diffusione della fauna e della flora contribuiscono a chiarire grandemente le condizioni preistoriche del globo, tanto che il geofisico seguirebbe una via errata se non tenesse sempre presenti, a controllo dei suoi, i risultati di queste scienze. E viceversa il biologo, quando si occupa del problema della deriva dei continenti, per formarsi un giudizio esatto deve tener conto anche dei risultati ottenuti dalla geologia e dalla geofisica, altrimenti corre rischio di smarrire la via giusta"<sup>45</sup>. Ancora, per corroborare ulteriormente quanto fin qui argomentato, "non è cosa inutile richiamare l'attenzione su questo punto, poiché oggi, per quel che mi par di comprendere, una gran parte dei biologi è dell'idea che non ha grande importanza ammettere l'ipotesi dello sprofondamento dei continenti intermedi o quella della deriva dei continenti. E questo è un errore"<sup>46</sup>. Alla luce di queste ulteriori argomentazioni si può allora dedurre che, nell'elaborare la propria teoria innovativa, Wegener "desiderava confutare l'esistenza di continenti inabissatisi nel mare, e di ponti di terra ormai svaniti, a cui si faceva ancora comune riferimento per spiegare il collegamento tra la fauna dei due continenti, ma che erano incompatibili con l'isostasia"<sup>47</sup>. Inoltre, bisogna fare un'ulteriore riflessione e aggiungere qualche considerazione esplicativa al riguardo, sottolineando che "dal fatto che questo non accade, ma anzi sugli oceani domina una pressione quasi normale, dovrebbero concludere che l'ipotesi di un sprofondamento di continenti intermedi deve essere limitata a tratti di terra e a mari superficiali, ma generalmente non si verifica per le grandi profondità oceaniche"<sup>48</sup>. Questo perché, risalendo nel tempo, la posizione reciproca dei continenti era progressivamente diversa rispetto a quella attuale. E "quanto più, però, ciò si verifica per le epoche geologiche più antiche, tanto più si hanno in queste delle prove eccezionalmente probative della irrefutabilità della teoria della deriva"<sup>49</sup>. Inoltre, per comprendere bene questo discorso, bisogna tenere anche conto del fatto che "le espressioni deriva dei continenti e migrazione dei poli vengono usate nella letteratura in senso completamente diverso, e nel rapporto che intercede tra di esse domina un'incertezza che può essere eliminata solo per mezzo di una esatta definizione"<sup>50</sup>. Per essere chiari, in generale "le affermazioni della teoria della deriva si riferiscono agli spostamenti relativi dei continenti, cioè a spostamenti di parti della crosta terrestre rispetto ad una parte di essa scelta ad arbitrio"<sup>51</sup>. Venendo poi a giustificare il dato specifico preso in esame, è opportuno precisare che "la scelta del continente cui riferire questi spostamenti cadde sull'Africa, perché essa rappresenta il centro della primitiva massa continentale"<sup>52</sup>. Ciò significa che è solo il caso di puntualizzare ulteriormente che "la scelta di esso è solo una questione di opportunità"<sup>53</sup>. Inoltre, si può anche inquadrare il discorso in un orizzonte più ampio e porsi da una prospettiva ancora più aperta, nel senso che, per esempio, "rinunciando a questo sistema un po' arbitrario di riferimento, si potrebbero definire spostamenti continentali ragguagliati fra loro, che sarebbero da determinarsi rispetto alla totalità della superficie terrestre, invece che ad una parte di essa. Questa determinazione urterebbe però nella pratica contro grandi difficoltà e

---

<sup>42</sup> Ivi, p. 101

<sup>43</sup> Ivi, p. 104

<sup>44</sup> *Ibidem*

<sup>45</sup> Ivi, p. 150

<sup>46</sup> *Ibidem*

<sup>47</sup> T. H. van Andel, *Storia della terra*, cit., p. 99.

<sup>48</sup> A. Wegener, *La formazione dei continenti e degli oceani*, cit., p. 151

<sup>49</sup> Ivi, p. 182

<sup>50</sup> Ivi, p. 215

<sup>51</sup> *Ibidem*

<sup>52</sup> *Ibidem*

<sup>53</sup> *Ibidem*

per ora non viene presa in considerazione”<sup>54</sup>. Insomma, “è importante tener presente che il sistema di riferimento all’Africa è completamente arbitrario!”<sup>55</sup>. Comunque, “se però scegliamo l’Africa come riferimento, per definizione non possiamo attribuire a questo continente alcun movimento”<sup>56</sup>. Wegener concludeva sottolineando il fatto che “gli spostamenti relativi dei continenti sono stati dimostrati esclusivamente per via empirica, fondandosi cioè sul complesso delle osservazioni geodetiche, geofisiche, geologiche, biologiche e paleoclimatiche, senza però che sia stata emessa alcuna ipotesi sulla causa di questo fenomeno. È questa la via induttiva che la ricerca dei fenomeni naturali è costretta a seguire nella maggior parte dei casi. Le formule delle leggi di gravità furono stabilite dapprima solo per via induttiva, fondandosi su osservazioni, e solo in seguito Newton insegnò a dedurle da una legge generale. E questa è la via normale che suole sempre seguire la ricerca”<sup>57</sup>. Se questo è vero, bisogna riconoscere che “per la teoria della deriva dei continenti non è ancora giunto un Newton. Né vi è da temere che prima o poi non giunga, poiché la teoria è ancora giovane e ancor oggi viene spesso messa in dubbio, né si può biasimare lo studioso, se egli esita a dedicare tempo e fatica alla spiegazione di una legge, sulla cui esattezza non si è ancora d’accordo”<sup>58</sup>. In ogni caso, l’idea della “deriva” ha inserito il mutamento nella “struttura” del nostro pianeta e ha consentito di avviare quel processo di storificazione di esso che in breve tempo porterà a guardarlo come un vero e proprio organismo nel quale le varie parti sono così strettamente connesse da costituire un tutto non componibile.

#### **4. Hubble e l’espansione dell’Universo**

La consapevolezza del fatto che l’Universo non sia un’entità statica è stata acquisita a partire, anche qui, da problemi legati alla presenza e alla diffusione del calore. In particolare, a quelli legati alla variazione della luce emessa da stelle lontane e al calore prodotto dal modo in cui l’Universo sarebbe nato. Così, come è accaduto per i fenomeni luminosi collegati all’immensamente piccolo, anche in relazione all’immensamente grande le scoperte dell’inizio del Novecento sono state decisive. In maniera particolare, “gli ‘spensierati anni venti’ furono dieci anni incredibili per la scienza; da un lato si scoprì che il microcosmo è governato dalle strane leggi della meccanica quantistica, dall’altro si rivelò l’universo delle galassie. E nel macrocosmo, non appena si riuscì a penetrare nel reame, prima inaccessibile, delle galassie, fu immediatamente scoperto un nuovo fenomeno fisico, il redshift cosmologico. Una caratteristica notevole del redshift è che il suo valore non varia in modo arbitrario da una galassia all’altra, ma è più grande per le galassie lontane”<sup>59</sup>.

Questa scoperta ha portato immediatamente a una delle teorie più sconvolgenti, quella relativa all’idea che l’universo non è un cosmo statico, ma una struttura in continua evoluzione. In tal senso, “la scoperta che l’universo è in espansione fu una delle grandi rivoluzioni del XX secolo. Col senno di poi è facile chiedersi perché nessuno ci avesse mai pensato prima. Newton e altri avrebbero dovuto rendersi conto che un universo statico avrebbe cominciato a contrarsi immediatamente sotto l’influenza della gravità”<sup>60</sup>.

Comunque, il dato per cui si è dovuto aspettare il Novecento per giungere a questa conclusione conferma che “in effetti una delle più importanti scoperte dell’ultimo secolo è stata la legge universale dello spostamento verso il rosso della luce proveniente da galassie lontane: il redshift. Nel 1929 Edwin Hubble dimostrò che il redshift aumenta con la distanza. Benché si tratti solo di un piccolo fenomeno all’analisi spettrografica, il redshift cosmologico deve indicare qualcosa di straordinario. Nella cosmologia moderna il redshift dipende dall’espansione dell’universo, un processo allo stesso tempo misterioso e maestoso”<sup>61</sup>. Tale processo con-

---

<sup>54</sup> Ivi, p. 216

<sup>55</sup> *Ibidem*

<sup>56</sup> *Ibidem*

<sup>57</sup> Ivi, p. 240

<sup>58</sup> *Ibidem*

<sup>59</sup> Y. Baryshev – P. Teerikorpi, *La scoperta dei frattali cosmici*, trad. di S. Sidoretti e G. Pascucci, Bollati Boringhieri, Torino 2006, p. 145.

<sup>60</sup> S. Hawking, *Dal big bang ai buchi neri*, trad. di L. Sosio, Rizzoli, Milano 2006, p. 56

<sup>61</sup> Y. Baryshev – P. Teerikorpi, *La scoperta dei frattali cosmici*, cit., p. 132

ferma che "l'universo si trova in uno stato di violenta esplosione in cui le grandi isole stellari chiamate galassie stanno allontanandosi l'una dall'altra a velocità prossime a quella della luce"<sup>62</sup>.

Questa scoperta corrobora definitivamente la convinzione per la quale "con la sua fervida esplorazione della natura, nel piccolo e nel grande, il XX secolo ha dato vita a un modello cosmologico in cui l'esplosione primordiale determina la storia dell'universo. Il modello si basa sui principi cosmologici di Einstein, sull'idea di una materia distribuita in modo uniforme che si evolve seguendo le leggi della relatività generale". Inoltre, "il successo della cosmologia del big bang nello spiegare le osservazioni importanti, la sua impressionante, quasi scioccante, concezione del mondo interessa sia la ragione sia l'animo dell'uomo moderno"<sup>63</sup>. Questo fa pensare che si è giunti a una meta, se non definitiva, sicuramente estremamente importante, che suggerisce la deduzione che ci fa affermare che "la cosmologia basata sul big bang è la moderna 'Grande sintesi' che ha unito l'astronomia e la fisica. Tuttavia la paternità dell'opera non è di un solo autore, bensì di generazioni di scienziati e migliaia di articoli". Oltre a ciò, "con la sua natura paradigmatica essa ispira e governa la scienza. ed entrambe le idee del big bang e di un universo in espansione si sono diffuse in tutta la società. Sembra quasi impossibile concepire la realtà senza quell'enigmatico inizio"<sup>64</sup>.

Ma a parte la enigmaticità dell'inizio, appare chiaro che "un aspetto preminente della cosmologia basata sul big bang è la convinzione che le enormi strutture cosmiche che vediamo intorno a noi non siano che un 'effetto secondario': il risultato di un'evoluzione delle primitive increspature sulla sottostante calma uniformità"<sup>65</sup>. Non resta, allora, che ricostruire in che modo e in che termini abbiamo preso consapevolezza del carattere evolutivo della struttura dell'Universo.

In proposito è stato giustamente sottolineato il fatto che nell'ambito della concezione tradizionale "l'universo delle stelle sembrava formare un immobile fondale al mutamento e al moto terrestri"<sup>66</sup>. Tale concezione forniva la base per la giustificazione del fatto che l'Universo apparisse, appunto, come essenzialmente stabile. Tuttavia, "le scoperte che distrussero questo quadro formano una delle più importanti rivoluzioni scientifiche e filosofiche del nostro tempo. Il primo passo lo fece V. M. Slipher dell'Osservatorio di Lowell, che nel 1912 trovò che la grande galassia di Andromeda aveva una velocità di 200 chilometri il secondo"<sup>67</sup>. L'anomalia nascosta dietro questa osservazione ha poi portato alla seconda tappa, che, per la verità, non si è fatta attendere troppo. Infatti, "nel 1917 una ricerca fatta da Wilhem de Sitter, basata sulla relatività generale, suggerì che l'universo avrebbe potuto trovarsi in un processo di espansione totale"<sup>68</sup>. Ad essa seguirono le enunciazioni di Friedmann e di Lemaître, che rimasero poco conosciute.

Comunque, queste prime ipotesi suscitarono, nei pochi che le discussero, molte controversie, al punto che "passarono più di dieci anni prima che le osservazioni dell'astronomo americano Edwin Hubble stabilissero al di là di ogni dubbio ragionevole che l'universo era in espansione. La vecchia concezione di un universo statico era demolita, e scienziati e filosofi erano messi alla prova da domande come 'Che cosa ha dato inizio all'espansione?' e 'Ha l'universo un principio e una fine?'"<sup>69</sup>. Infatti, dopo le convincenti prove addotte da Hubble, alla domanda: "Di che cosa possiamo essere sicuri in cosmologia?" si può cominciare a dare qualche risposta plausibile di questo tipo: "Primo, che l'universo si espande, e che la legge di Hubble è, almeno approssimativamente, vera. Questo significa che le galassie stanno allontanandosi da noi e più sono lontane più velocemente si muovono". In particolare, ancora, "l'espansione è al riguardo l'elemento più importante; essa

<sup>62</sup> S. Weinberg, *I primi tre minuti. L'affascinante storia dell'origine dell'universo*, trad. di L. Sosio, Mondadori, Milano 1991, p. 22

<sup>63</sup> Y. Baryshev – P. Teerikorpi, *La scoperta dei frattali cosmici*, cit., p. 157.

<sup>64</sup> Ivi, p. 157. Cfr. AA. VV., *La natura dell'universo fisico*, a cura di D. Huff e O. Prewett, trad. di P. Radicati, Boringhieri, Torino 1981

<sup>65</sup> *Ibidem*

<sup>66</sup> W. Bonnor, *Universo in espansione*, trad. di F. Bedarida, Boringhieri, Torino 1967, p. 1

<sup>67</sup> *Ibidem*. Cfr. S. Bergia, *Dal cosmo immutabile all'universo in evoluzione*, Bollati Boringhieri, Torino 1995

<sup>68</sup> Ivi, pp. 1-2. Cfr. H. Bondi, *Cosmologia*, trad. di U. Giacomini, Lampugnani Nigri, Milano 1970

<sup>69</sup> Ivi, p. 2. Su ciò cfr. J. Narlikar, *La struttura dell'universo*, trad. di G. Mainardi, Einaudi, Torino 1984

è la causa della maggior parte delle proprietà che rendono la nostra concezione dell'universo del tutto diversa da quella statica che è stata fino a quarant'anni fa una pietra angolare indiscutibile della fede scientifica"<sup>70</sup>.

Se l'ipotesi è vera, anche a questo livello è avvenuto il passaggio dall'universo statico all'universo storico e tutte queste considerazioni "ci hanno dischiuso una visione dell'universo che è grandiosa nella sua semplicità. L'universo si sta espandendo in modo uniforme e isotropo: lo stesso modello di espansione si presenta a osservatori che si trovino in tutte le galassie tipiche, e in tutte le direzioni"<sup>71</sup>. A ciò si aggiunge il fatto che "man mano che l'universo si espande, le lunghezze d'onda dei raggi luminosi si dilatano in proporzione alla distanza fra le galassie"<sup>72</sup>. Inoltre, studiando il fenomeno in maniera più attenta e accurata, ci si rende conto del fatto che "queste velocità vanno rallentando gradualmente sotto l'influsso della gravitazione"<sup>73</sup>.

Tutto questo fa pensare che l'Universo abbia una storia e si mantenga in virtù di un'interazione circolare tra il "motore" dell'espansione e il "freno" della forza di gravitazione. Allora il tempo non è più un parametro esterno ma la struttura intrinseca dell'Universo.

---

<sup>70</sup> Ivi, p. 195. Cfr. F. Hoyle, *Galassie, nuclei e quasar*, Einaudi, Torino 1970; *L'origine dell'universo e l'origine della religione*, Mondadori, Milano 1998.

<sup>71</sup> Ivi, p. 53

<sup>72</sup> S. Weinberg, *I primi tre minuti*, cit., p. 55

<sup>73</sup> *Ibidem*. Cfr. A. Penzias, *L'origine dell'universo. Un segnale che ha cambiato la visione del mondo*, Di Renzo, Roma 2006

## 13.7 miliardi di anni: il tempo e l'età dell' universo

**Paolo de Bernardis e Silvia Masi**  
Università di Roma "La Sapienza", Roma  
e-mail: paolo.debernardis@roma1.infn.it

### 1. Il tempo in fisica

Provare a definire il tempo è difficile. Il nostro cervello lavora tramite una sequenza di atti di attenzione. Questa sequenza è controllata da una specie di orologio interno, e definisce i nostri concetti mentali di prima e dopo. Vediamo che le cose cambiano: movimento, eventi, le cose erano in una certa configurazione prima e in un' altra dopo.

Sembra che il tempo esista semplicemente perché le cose cambiano. Aristotele lo dice chiaramente: *"Il tempo è la misura del moto nella prospettiva del prima e del dopo"* Galilei e Newton assumono l'esistenza di un tempo assoluto, universale, valido per tutti gli osservatori (e di uno spazio rigido). Questa concezione rimane fino all'inizio del '900, quando, dopo lo sviluppo dell'elettromagnetismo, si deve modificare per tener conto dell'invarianza della velocità della luce (dimostrata sperimentalmente da Michelson e Morley fin dal 1879) e per risolvere il "problema dell' etere". Secondo Minkowski ed Einstein, il tempo assoluto non esiste: il tempo dipende dallo stato dell' osservatore. È istruttivo descrivere in maggior dettaglio la questione della relatività del tempo, basandoci su un esperimento concettuale, la misura del tempo tramite un orologio a fotoni. Per i fisici "il tempo è ciò che viene misurato dagli orologi", e un orologio è una apparecchiatura che svolge la stessa operazione in modo ciclico e regolare, come il pendolo che oscilla, o un cristallo piezoelettrico che vibra, o un sistema di atomi eccitati che produce onde elettromagnetiche di frequenza (periodo) ben precisa. Per studiare come cambia l'intervallo di tempo tra due stessi eventi percepito da osservatori diversi, usiamo l'orologio concettuale più semplice che possiamo immaginare. Si tratta di un fotone che rimbalza tra due specchi paralleli separati da una distanza  $h$ . Se  $h=15$  cm, il periodo  $T_R$  per una oscillazione completa è  $2h/c$ , dove  $c$  è la velocità della luce: circa 1 ns. Il fotone di questo orologio effettua un miliardo di oscillazioni al secondo. Contando il numero di oscillazioni tra due eventi, possiamo misurare accuratamente il tempo intercorso. La questione è: due osservatori che si trovino uno fermo e l'altro in moto rispetto all'orologio, misureranno lo stesso intervallo di tempo tra gli stessi due eventi, oppure no? Certamente tra gli stessi due eventi misureranno lo stesso numero di oscillazioni complete del fotone. Il periodo di tempo impiegato dal fotone per compiere una oscillazione completa è 1 ns per l'osservatore solidale con l'orologio, mentre è più lungo per l'osservatore in movimento rispetto all'orologio. Questo è una diretta conseguenza della invarianza della velocità della luce per tutti gli osservatori. Infatti, per l'osservatore che vede l'orologio muoversi a velocità  $v$ , il percorso del fotone durante un periodo intero dell'oscillazione sono due linee inclinate, ciascuna di lunghezza  $L$  maggiore di  $h$ . Viaggiando comunque a velocità  $c$ , il fotone impiegherà per eseguire una oscillazione completa un tempo  $2L/c$ , maggiore di  $2h/c=1$  ns. Con l'ausilio del teorema di Pitagora possiamo facilmente stabilire che, detto  $T_M$  il periodo di oscillazione percepito dall'osservatore rispetto al quale l'orologio si muove,  $L^2 = h^2 + (vT_M/2)^2$  e quindi  $T_M = 2L/c = \gamma T_R$ , dove

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} \quad , \quad \beta = \frac{v}{c}$$

Quindi l'intervallo di tempo tra due eventi misurato da un osservatore in moto rispetto all'orologio è sempre maggiore dell' intervallo di tempo tra gli stessi eventi misurato da un osservatore solidale con

l'orologio. È una conseguenza necessaria dell'invarianza della velocità della luce. La dilatazione dei tempi non è percepibile finché le velocità  $v$  in gioco sono trascurabili rispetto a  $c$  (e quindi nell'esperienza di tutti i giorni), ma diventa importante quando  $v$  tende ad essere confrontabile con  $c$  (e si dice che la velocità in questi casi diventa relativistica). È evidente in moltissimi fenomeni che riguardano le particelle elementari (che spesso viaggiano a velocità simili a  $c$ ) ma anche in molti fenomeni astrofisici, nei quali si osservano quantità macroscopiche di materia in moto a velocità relativistiche. Il nostro stesso sole (e la terra con lui) ruota intorno al centro della galassia ad una velocità di circa 200 km/s, dell'ordine di un millesimo della velocità della luce. Ma nei dischi di accrescimento intorno ai buchi neri giganti dei nuclei galattici attivi si osservano nubi di materia viaggiare a velocità relativistiche, e nella sorgente SS433, nella nostra galassia, si osservano quantità macroscopiche di materia viaggiare al 26% della velocità della luce. Tutte queste velocità sono osservabili grazie all'effetto Doppler, un fenomeno comune a tutte le sorgenti di onde (e quindi anche di onde elettromagnetiche, di luce): quando la sorgente si trova in moto rispetto all'osservatore, le lunghezze delle onde percepite sono diverse da quelle emesse dalla sorgente: maggiori se la sorgente si sta allontanando, minori se si sta avvicinando. La luce visibile, in particolare, appare spostata verso lunghezze d'onda rosse in caso di allontanamento della sorgente, verso il blu in caso di avvicinamento. Lo spostamento percentuale della lunghezza d'onda è pari al rapporto tra la velocità della sorgente rispetto all'osservatore e la velocità della luce. Grazie alla altissima risoluzione degli spettrometri, è possibile misurare in questo modo anche velocità di frazioni di metro al secondo (milionesimi della velocità della luce), se le sorgenti sono intense e se si hanno a disposizione telescopi con grande area di raccolta della luce.

Nel caso della fisica delle particelle elementari, un esempio classico è quello dei muoni generati dai raggi cosmici. I muoni sono particelle cariche, pesanti circa 207 volte più degli elettroni. Si formano nell'alta atmosfera dalle interazioni dei raggi cosmici primari con i nuclei dell'aria. Sono particelle instabili: ciascuno di essi dopo una vita media di  $2.2 \mu\text{s}$  decade in un elettrone e due neutrini. Dopo essere stati prodotti, di solito ad una quota di circa 9000 metri, viaggiano a velocità relativistiche, e ne osserviamo arrivare fino a terra. Ma con una vita media così breve è sorprendente che arrivino muoni a terra prima di decadere!

Se vengono formati ad  $h=9000\text{m}$ , e decadono in  $\tau = 2.2 \mu\text{s}$ , anche viaggiando alla velocità della luce la maggior parte di essi percorrerà uno spazio pari a  $s = c\tau = 660\text{m}$ . D'altra parte  $\tau$  è la vita media della particella: un certo numero di muoni avranno una vita media maggiore. Ma per percorrere 9000m, cioè 13.6 volte di più dello spazio percorso in una vita media, e arrivare fino a terra, dovrebbero avere una vita 13.6 volte più lunga di quella media. Il che è estremamente improbabile. Utilizzando la legge esponenziale della probabilità di decadimento,  $P = e^{-t/\tau}$ , si conclude che sono un muone ogni milione di muoni generati nell'alta atmosfera arriverebbe in media a terra. Eppure ne vediamo arrivare molti più. Quindi c'è un errore nel nostro ragionamento. E l'errore è esattamente il non aver considerato che stiamo osservando degli orologi (i muoni che battono il tempo con la loro vita media) in movimento velocissimo rispetto a noi osservatori. Quindi noi dobbiamo osservarli rallentare il loro battito (come abbiamo visto rallentare l'orologio a fotoni). Cioè dobbiamo vedere la loro vita media allungata di un fattore  $\gamma$ . Questo fattore è dell'ordine di 5, e con una vita media 5 volte più lunga, la probabilità che un muone arrivi fino a terra sale al 6.5%. Quindi invece che un muone ogni milione, dobbiamo veder arrivare a terra circa 65000 muoni ogni milione. Il che è quanto effettivamente si osserva (il primo esperimento di questo tipo fu ideato da Bruno Rossi nel 1941). Lo stesso fenomeno, visto nel sistema di riferimento del muone, deve dare lo stesso risultato. In questo caso la vita media del muone resta  $2.2\mu\text{s}$ , ma è il terreno che si avvicina al muone con velocità relativistica. E la relatività speciale ci assicura che le lunghezze misurate da un osservatore in movimento si accorciano di un fattore  $1/\gamma$ . Quindi abbiamo un tempo 5 volte inferiore al caso precedente, ma anche uno spazio da percorrere 5 volte inferiore. Il risultato rimane invariato, 65000 muoni ogni milione arrivano a terra.

Abbiamo quindi capito che le misure del tempo e delle lunghezze dipendono dal moto dell'osservatore. La concezione di Galilei e Newton di spazio rigido e di un tempo assoluto non sono applicabili ad osservatori che si muovono velocemente. Spazio e tempo sono collegati, e nemmeno la simultaneità degli eventi è assoluta. Famosa è la frase di Minkowski (1908): *"Hereafter space and time alone will fade as shadows, and only their union will maintain its independence"*

Tutti i fenomeni della relatività speciale sono codificati nelle trasformazioni di Lorentz, che generalizzano quelle di Galilei nel caso di spostamento dell' osservatore rispetto al fenomeno a velocità costanti, ma non trascurabili rispetto alla velocità della luce. Le trasformazioni di Lorentz sono compatibili con l' elettromagnetismo di Maxwell e con l'invarianza della velocità della luce, ma valgono per sistemi in moto uniforme. Quindi in assenza di forze (come la gravità) che accelererebbero il moto. In queste condizioni non si conservano le distanze. Quello che rimane invariante è la combinazione

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$$

Questa può essere considerata la distanza (metrica) tra due eventi in uno spazio a quattro dimensioni  $(x_0, x_1, x_2, x_3) = (x, y, z, ict)$ . La distanza infinitesima in questo spazio può essere definita come

$$ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2 = \sum_{i,j=0}^3 g_{ij} dx^i dx^j$$

dove

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

In Relatività Generale (la più moderna teoria della forza gravitazionale) l'effetto delle masse e della gravitazione è una modifica della metrica dello spazio-tempo: in generale sarà ancora

$$ds^2 = \sum_{i,j=0}^3 g_{ij} dx^i dx^j$$

Ma la metrica avrà una forma più complessa, e in generale

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{pmatrix}$$

L'effetto delle forze gravitazionali può essere descritto da una opportuna metrica non-euclidea, curva, dello spazio-tempo, molto meglio che non dalle leggi di Newton. Nel caso dell' universo a grande scala, vedremo che questa metrica è relativamente semplice.

## 2. L'età dell'Universo

L' oggetto più grande che possiamo studiare è l'universo intero. La cosmologia, la scienza che studia l'universo nella sua globalità, e la sua evoluzione, si avvale oggi di osservazioni di precisione, che permettono di osservare il passato (e quindi l'evoluzione) del nostro universo. Nel seguito cercherò di trattare il problema dell' età dell'universo. Nel farlo introdurrò le più importanti problematiche della cosmologia moderna.

Vedremo che

- è possibile osservare e misurare il passato dell'universo
- gli effetti relativistici, ad es. di contrazione del tempo ed espansione delle lunghezze, sono importantissimi nell' universo primordiale, e possono esserlo anche gli effetti di curvatura dello spazio

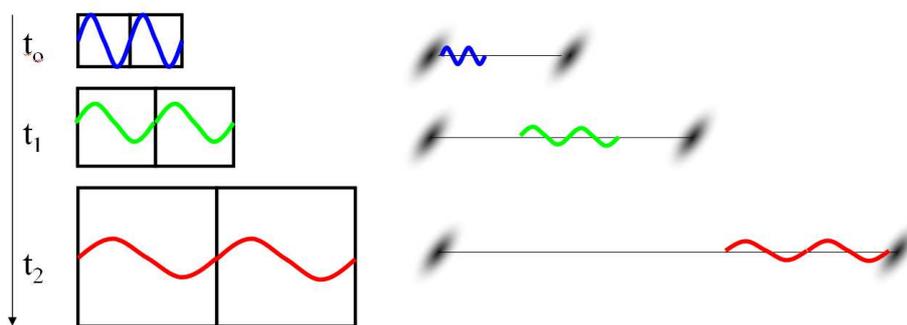
- l'età dell'universo (concetto da precisare bene) è di circa 14 miliardi di anni
- esiste un orologio universale, al quale tutti gli osservatori nel nostro universo possono fare riferimento (almeno concettualmente).

Le osservazioni svolte con grandi telescopi e con il telescopio spaziale mostrano che l'universo visibile è costituito da galassie, e che ci sono galassie fino alle distanze più grandi che possiamo osservare. Recentemente è stato anche possibile stabilire con buona precisione le distanze di circa due milioni di galassie, grazie alle cosiddette redshift surveys (6dF, SDSS), eseguite grazie a particolari telescopi, dotati di "spettrometri multifibra", che permettono di analizzare le lunghezze d'onda che compongono la luce di molte galassie simultaneamente. Risulta che le Galassie e gli ammassi di Galassie sono distribuiti in una struttura cellulare, "spugnosa", con filamenti e fogli di Galassie separati da enormi vuoti cosmici. Questa struttura cellulare riempie uniformemente tutto l'universo, almeno fin dove possiamo misurare le distanze delle galassie. Si tratta quindi di un universo disomogeneo, che diventa omogeneo solo se si media su volumi molto grandi (di dimensioni lineari superiori a 300 anni luce).

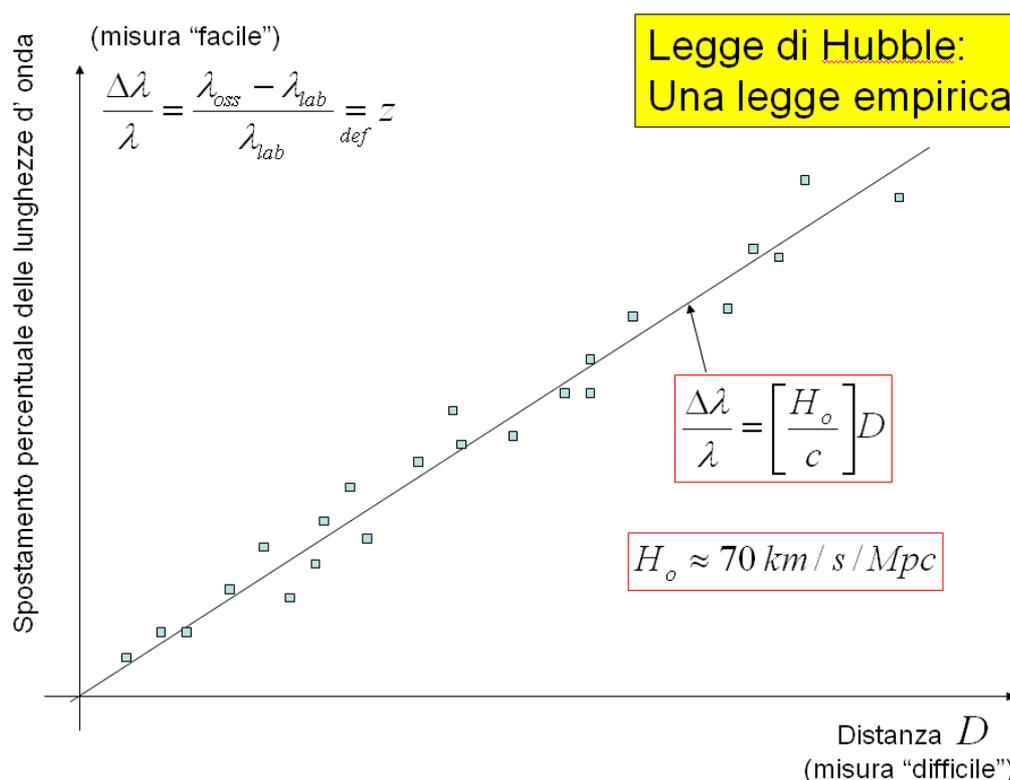
La misura delle posizioni delle galassie lontane è stata possibile sfruttando la "legge di Hubble"; la stessa legge ci suggerisce che l'Universo provenga da una fase iniziale di "Big Bang", e ci permette di studiare l'età dell'universo. Quindi è bene capire meglio di che si tratta.

Viviamo in un universo in espansione, perché le Galassie - i mattoni costitutivi dell'universo visibile - si allontanano le une dalle altre. A questa conclusione giunsero Carl Wirtz ed Edwin Hubble negli anni 20-30, osservando ed interpretando il fatto che più una galassia è distante, più la sua luce è spostata verso il colore rosso.

La relatività generale di Einstein prevede che, in un universo in espansione, le lunghezze d'onda  $\lambda$  dei fotoni si allunghino esattamente quanto le altre lunghezze. Più distante è una galassia, più è lungo il cammino che la luce deve percorrere, più lungo è il tempo che impiega, maggiore è l'espansione dell'universo dal momento dell'emissione a quello dalla ricezione, e più la lunghezza d'onda viene allungata. Se si tratta di luce visibile, viene spostata verso il colore rosso (redshift, vedi figura 1). Questo fenomeno, detto *redshift cosmologico*, non va confuso con l'effetto Doppler, che inizialmente fu invocato per spiegare le osservazioni di Hubble e Wirtz. Il diagramma di Hubble mette in relazione la variazione percentuale della lunghezza d'onda della luce emessa da una galassia con la sua distanza. Ciò che fu scoperto da Hubble e Wirtz fu una relazione di proporzionalità tra queste due quantità (legge di Hubble, vedi figura 2). Questa relazione dimostra sperimentalmente una espansione isotropa (uguale in tutte le direzioni) dello spazio. Se tutte le galassie si allontanano le une dalle altre, più sono lontane e più velocemente le vediamo allontanarsi:  $v = Hd$ , dove  $H$  è una costante, detta costante di Hubble.



**Figura 1:** illustrazione del redshift cosmologico. La radiazione proveniente da una galassia lontana aumenta la sua lunghezza d'onda dello stesso fattore di cui aumentano tutte le altre lunghezze dell'universo in espansione.



**Figura 2:** legge di Hubble: a causa dell'espansione dell'universo, la radiazione proveniente da galassie più distanti ha viaggiato per più tempo, e quindi ha subito un maggiore allungamento delle lunghezze d'onda. Il redshift cosmologico è quindi direttamente proporzionale (almeno fino a distanze relativamente piccole) alla distanza delle sorgenti.

È bene notare che il redshift è un effetto relativistico, descrivibile come contrazione temporale. Secondo l'interpretazione data sopra, sono possibili redshift molto elevati, determinati solo dal rapporto tra le distanze cosmiche oggi e le stesse distanze all'epoca dell'emissione della luce. La galassia più lontana che sia mai stata osservata mostra un redshift di circa 10: le distanze cosmiche erano circa 10 volte più piccole all'epoca in cui in quella remota galassia è stata emessa la luce che riceviamo oggi qui. Ma per la radiazione cosmica a microonde il redshift è circa 1100: osserviamo quindi radiazione di lunghezze d'onda intorno al millimetro (microonde), che all'epoca, quando è stata emessa, era radiazione nel vicino infrarosso (circa  $1 \mu\text{m}$ ), in un universo in cui le distanze cosmiche erano 1100 volte più piccole di oggi.

Se le galassie si allontanano, in passato erano più vicine tra loro. Se estrapoliamo ad un passato sempre più remoto, dovremo trovare un momento in la distanza tra le galassie era nulla. Chiameremo questo momento Big Bang.

Supponiamo, per semplicità e per avere un'idea degli ordini di grandezza, che la velocità di espansione sia sempre stata costante e pari a  $v_o$ . Allora per raggiungere la separazione  $d_o$  attuale, a partire da una separazione nulla al momento del Big Bang è necessario un tempo  $t_o = d_o/v_o$ . Ma dalla legge di Hubble sappiamo che  $v_o = H_o d_o$ , e quindi il tempo  $t_o$  (cioè l'età dell'universo, dal Big Bang a oggi) vale

$$t_o = \frac{d_o}{v_o} = \frac{d_o}{H_o d_o} = \frac{1}{H_o} = \frac{3.086 \times 10^{19} \text{ km/Mpc}}{70 \text{ km/s/Mpc}} = 14 \times 10^9 \text{ anni}$$

Quattordici miliardi di anni: è questo un ordine di grandezza ragionevole per l'età dell'universo ?

L'età dell' universo deve essere quanto meno superiore all'età delle singole parti che lo compongono. Possiamo ad esempio stimare l'età delle stelle sapendo che esse traggono la loro energia da reazioni nucleari che avvengono nel nucleo. Ad esempio per il sole le reazioni più importanti trasformano 4 nuclei di idrogeno in 2 nuclei di He, con un rilascio di energia  $\Delta E = 26 \text{ MeV} = 4 \times 10^{-12} \text{ J}$ . Ma  $M_{\text{sole}} = 2 \times 10^{30} \text{ Kg}$ , e supponendo che 1/10 degli atomi di H sia nel nucleo, dove la temperatura è sufficiente per innescare le reazioni, ci sono a disposizione

$$N = \frac{M_{\text{sole}}}{10m_H} = 10^{56}$$

atomi. Quindi la vita di una stella è dell'ordine di

$$t = \frac{N \Delta E}{4 W} = \frac{10^{56} \times 4 \times 10^{-12} \text{ J}}{4 \times 4 \times 10^{26} \text{ W}} = 3 \times 10^{17} \text{ s} = 10^{10} \text{ anni} .$$

Almeno l'ordine di grandezza non è molto più lungo della nostra stima dell'età dell'universo.

Nessuno ci assicura che la velocità di espansione dell'universo  $v$  sia sempre stata la stessa nel passato. Quindi il calcolo fatto ci fornisce solo un ordine di grandezza.

Per capire come si espande davvero l'universo al passare del tempo dobbiamo studiare la dinamica dell'universo, che dipende dalle forze in gioco e dai costituenti dell'universo. Delle quattro forze che conosciamo, alle distanze cosmologiche l'unica efficace è la gravitazione (la forza debole e quella forte hanno raggi d'azione microscopici, e le galassie sono in media elettricamente neutre, quindi la forza elettromagnetica non agisce). Dobbiamo quindi studiare l'evoluzione dell'universo sotto l'azione della forza gravitazionale. Consideriamo una galassia di massa  $m$ , a distanza  $r$  dall'origine, in cui ci troviamo noi, in uno spazio infinitamente riempito di galassie. L'energia totale della galassia sarà la somma di energia cinetica ed energia potenziale. Per quanto detto, l'energia potenziale è dovuta all'attrazione gravitazionale di tutte le altre galassie. Ma per il Teorema di Gauss, solo le attrazioni delle galassie che si trovano all'interno di una sfera di raggio  $r$  centrata nell'origine hanno effetto. Possiamo quindi scrivere:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r}$$

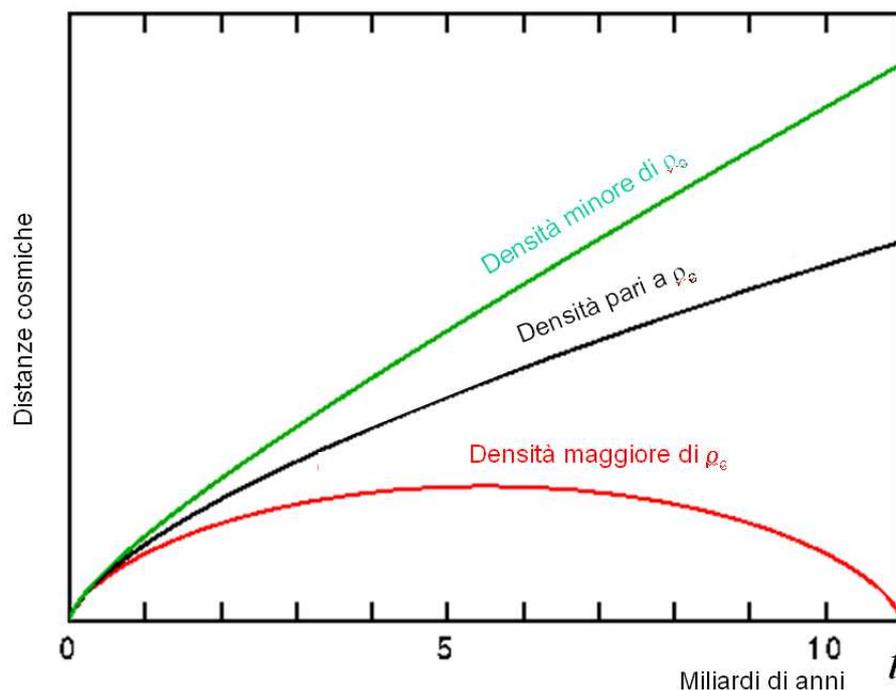
dove

$$M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o$$

è la massa contenuta nella sfera, che rimane costante durante l'espansione. Usando la legge di Hubble possiamo riscrivere la relazione per l'energia come

$$E = mr^2 \left[ \frac{1}{2} H_o^2 - \frac{4\pi G}{3} \rho_o \right]$$

Da qui si vede che: se l'energia totale  $E$  è positiva (cioè se l'energia cinetica è maggiore di quella potenziale) la galassia non è legata alla massa  $M$ , quindi continua ad allontanarsi indefinitamente. Se l'energia totale è negativa prevale l'energia potenziale della gravitazione, e quindi il sistema è legato, e la galassia dopo una fase di allontanamento si riavvicinerà all'origine. Se  $E=0$  la galassia decelera, ma cessa di allontanarsi solo dopo un tempo infinito (vedi figura 3).



**Figura 3:** espansione dell'universo (contenente solo materia) per diversi valori della densità totale.  $\rho_c$  è la densità critica, pari a  $9 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ .

La situazione è analoga a quella del lancio verso l'alto di un oggetto, con velocità  $v$ , nel campo gravitazionale della terra (massa  $M$ ): Può l'oggetto allontanarsi indefinitamente da terra? La sua energia totale (che si conserva) deve essere maggiore o uguale a zero al lancio. Così può arrivare a distanza infinita (energia potenziale nulla) con velocità zero (energia cinetica nulla). Siccome

$$E_{\text{lancio}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_T m}{r_T}$$

La velocità iniziale deve essere maggiore della velocità di fuga:

$$E_{\text{lancio}} > 0 \rightarrow v > \sqrt{\frac{2GM_T}{r_T}}$$

Per la terra, questa velocità di fuga vale 11.2 km/s. Lanciando con velocità maggiore di quella di fuga l'oggetto si allontanerà da noi senza mai riavvicinarsi.

Se invece che sulla terra fossimo su giovè, che ha un rapporto massa/raggio molto maggiore della terra, a parità di velocità iniziale l'energia sarebbe negativa, e l'oggetto salirebbe rallentando per poi ricadere. Maggiore massa implica allontanamento seguito da riavvicinamento.

Quindi la dinamica dell'universo dipende dalla quantità totale di massa-energia, quantificata dal parametro  $\rho_o$ , e dalla velocità di espansione, quantificata dal parametro  $H_o$ . Quest'ultima è stata misurata dalla legge di Hubble, quindi l'evoluzione dipende da  $r_o$ , densità media di massa nell'universo oggi. Il caso  $E=0$  fa da spartiacque tra il caso di espansione senza limite (energia positiva) e il caso di espansione con successivo collasso (energia negativa). Questo caso, che chiameremo critico, si realizza per un valore ben preciso della densità totale di massa energia odierna, che chiameremo densità critica:

$$0 = E = mr^2 \left[ \frac{1}{2}H_o^2 - \frac{4\pi G}{3}\rho_o \right] \rightarrow \rho_o = \rho_c = \frac{3H_o^2}{8\pi G}$$

La galassia considerata e la nostra sono una qualsiasi coppia di galassie nell'universo.

Quindi le conclusioni tratte per  $r$  valgono in generale per la distanza tra due galassie qualsiasi nell'universo. Possiamo concludere quindi che si avrà una espansione inarrestabile dell'universo, oppure una espansione seguita da un arresto e poi da un collasso, a seconda che la densità media di massa dell'universo oggi sia minore o maggiore della densità critica: se si sostituiscono i valori delle costanti si trova che questa vale

$$\rho_c = \frac{3H_o^2}{8\pi G} \cong 9 \times 10^{-27} \text{ kg / m}^3$$

che equivale ad una media di cinque protoni per ogni metro cubo di universo.

Nel caso critico ( $E=0$ ) possiamo calcolare il tempo necessario a raggiungere oggi la distanza  $r_o$ . Si ha infatti:

$$0 = E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} \rightarrow \frac{1}{2}m\left[\frac{dr}{dt}\right]^2 = \frac{GMm}{r} \rightarrow \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

da cui si trova, integrando

$$r^{1/2}dr = \sqrt{2GM} dt \rightarrow \frac{2}{3}r_o^{3/2} = \sqrt{2GM}t_o$$

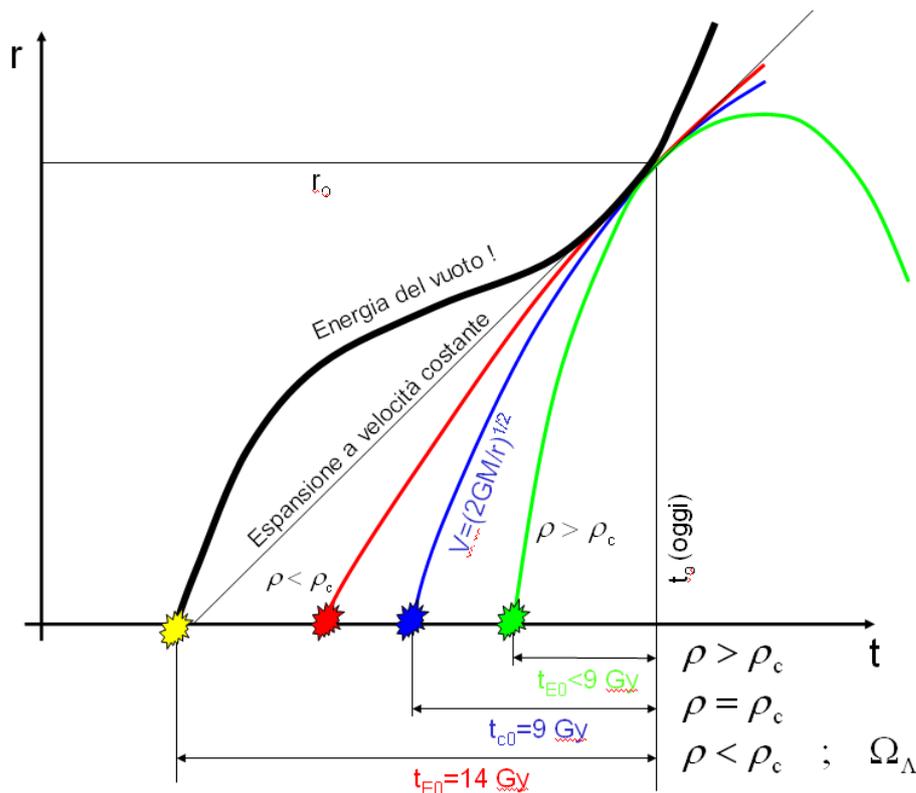
D' altra parte

$$H_o r_o = v_o = \sqrt{\frac{2GM}{r_o}} \rightarrow r_o^{3/2} = \frac{\sqrt{2GM}}{H_o}$$

per cui

$$\frac{2}{3} \frac{\sqrt{2GM}}{H_o} = \sqrt{2GM}t_o \rightarrow t_o = \frac{2}{3} \frac{1}{H_o} \cong 9 \times 10^9 \text{ anni}$$

Nove miliardi di anni. In un universo in decelerazione, la velocità di espansione era maggiore in passato rispetto a oggi, quindi si trova una età inferiore rispetto a quella che avevamo valutato per una espansione a velocità costante (vedi fig. 4).



**Figura 4:** espansione dell'universo e sua età, per diverse dinamiche determinate dal diverso contenuto di massa-energia. Dato il valore odierno della velocità di espansione, espresso dal valore misurato della costante di Hubble, una espansione a velocità costante implicherebbe una età dell'universo pari a 14 miliardi di anni. Invece l'espansione dell'universo a densità critica e contenente solo materia comporta una età dell'universo di 9 miliardi di anni. Se la densità è inferiore a quella critica, l'età è superiore a 9 miliardi di anni, mentre se la densità è superiore, l'età è inferiore a 9 miliardi di anni. Infine, se nell'universo è presente energia oscura (energia del vuoto), allora anche in un universo a densità critica l'età può essere di 14 miliardi di anni.

Ma un'età dell'universo di 9 miliardi di anni è meno dell'età delle stelle più antiche. Esistono ammassi globulari con una età di circa 12 miliardi di anni! Quindi almeno una delle nostre ipotesi è sbagliata. Può darsi ad esempio che la densità non sia critica (e quindi l'energia totale non sia zero). Quando la densità è inferiore a quella critica, succedono due cose: l'universo impiega più tempo ad arrivare alla velocità di espansione misurata oggi, e la geometria dello spazio è curva (universo "aperto", a curvatura negativa). La prima affermazione è facilmente dimostrabile considerando il fatto che

$$E = \frac{1}{2} m v_E^2 - \frac{GM_E m}{r} \rightarrow v_E = \sqrt{\frac{2GM_E}{r} - \frac{2E}{m}}$$

D' altra parte, oggi

$$v_{E0} = H_0 r_0 = v_0 \rightarrow \sqrt{\frac{2GM_E}{r_0} - \frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2GM}{r_0}} \rightarrow 2GM_E = 2GM - \frac{2Er_0}{m}$$

e quindi

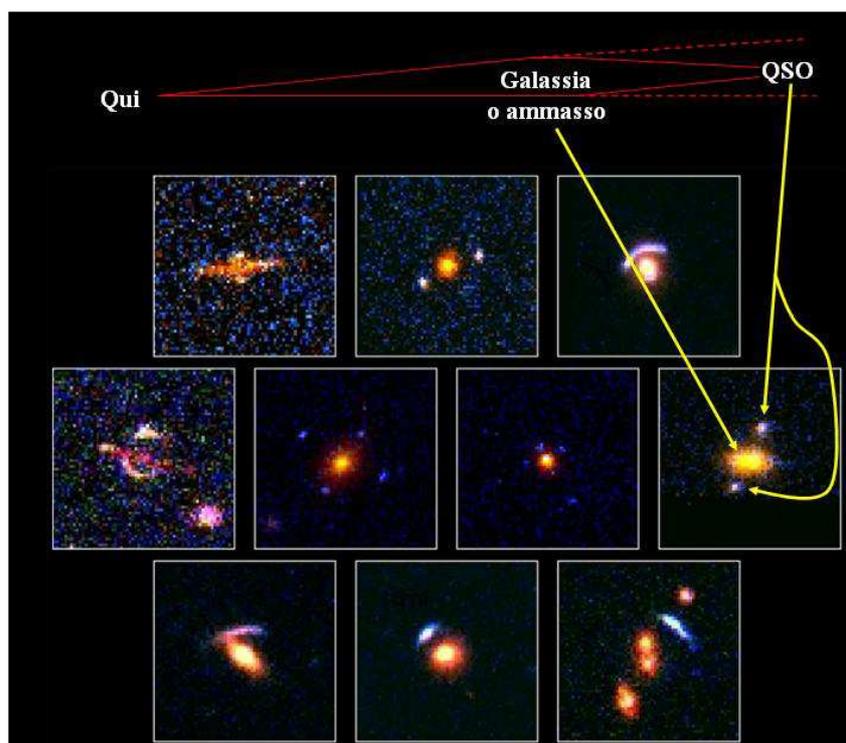
$$v_E = \sqrt{\frac{2GM - 2Er_0/m}{r} - \frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2GM}{r} - \frac{2E}{m} \left[ \frac{r_0}{r} - 1 \right]}$$

$$\rightarrow v_E < \sqrt{\frac{2GM}{r}} = v \text{ per } r < r_0 \rightarrow t_{E0} > t_{c0}$$

Quindi in un universo con densità inferiore a quella critica, la velocità di espansione è inferiore a quella del caso critico, e quindi ci vuole più tempo per arrivare alle dimensioni odierne: l'età è superiore. Il contrario avverrebbe in un universo a densità maggiore di quella critica (vedi fig.4).

Per quanto riguarda la seconda affermazione, questa deriva dal fatto che la presenza di massa curva la geometria dello spazio.

Questa previsione della relatività generale di Einstein è stata confermata osservando le traiettorie dei raggi di luce che passano vicino a grandi masse. Fin dal 1919, quando fu possibile osservare la deflessione operata sui raggi di luce di stelle lontane a causa della massa del sole. Oggi i fenomeni di "lenti gravitazionali" sono all'ordine del giorno, e si osservano tutte le volte che si fanno immagini di galassie lontane che si trovano dietro a grandi concentrazioni di massa, come gli ammassi di galassie (vedi fig. 5). Le immagini appaiono distorte, sdoppiate o moltiplicate, a causa delle diverse traiettorie (curve) che la luce percorre per arrivare fino a noi "aggirando" la grande concentrazione di massa interposta tra noi e la sorgente.



**Figura 5:** il fenomeno delle lenti gravitazionali (nelle foto, cortesia di NASA Hubble Space Telescope) conferma che la presenza della grande massa di una galassia o di un ammasso di galassie interposta tra noi e una sorgente lontana, ad esempio un QSO, curva i raggi di luce provenienti dalla sorgente lontana, producendone immagini multiple.

Questo fenomeno deve avvenire anche alle scale cosmologiche che ci interessano. Risulta che una densità totale di massa-energia maggiore di quella critica curva lo spazio a grande scala producendo una curvatura positiva (come su una sfera), mentre una densità totale di massa-energia inferiore a quella critica produce una curvatura negativa dello spazio. Nel primo caso due raggi di luce inizialmente paralleli tenderanno a convergere, come due persone che, partendo da due punti sull'equatore terrestre a distanza di 1 km, si dirigano ambedue verso nord. I due viaggiano su traiettorie inizialmente parallele, ma, a causa della curvatura della superficie su cui camminano, arriveranno ad incontrarsi al polo nord. Nel secondo caso i raggi di luce tenderanno invece a divergere, come linee inizialmente parallele tracciate su una sella (superficie a curvatura negativa).

Dobbiamo quindi chiederci quale sia la densità totale di massa-energia presente nell'universo per poter determinare la sua età.

Ma c'è una approssimazione ancora più importante nel ragionamento fatto finora. Secondo la teoria più moderna della gravitazione (la relatività generale di A. Einstein) tutte le forme di massa-energia (non solo la massa) contribuiscono alla dinamica dell'universo. Nell'universo ci sono:

- Materia (la cui densità di massa-energia diminuisce come  $1/a^3$ )
- Radiazione (la cui densità di massa-energia diminuisce come  $1/a^4$ )
- Energia del vuoto (la cui densità di massa-energia non diminuisce con l'espansione (!))

Noi finora abbiamo considerato solo la prima forma di massa-energia. Nel caso generale dobbiamo risolvere il problema della dinamica dell'universo a grande scala, considerato come un fluido omogeneo ed isotropo. In questo caso le equazioni di Einstein della relatività generale si riducono all'equazione di Friedmann, che permette di calcolare l'evoluzione dell'universo in funzione della quantità e del tipo di massa-energia presenti in media nell'universo. L'equazione di Friedmann per il fattore di scala dell'universo  $a(t)$  (cioè per il fattore moltiplicativo per cui vanno moltiplicate tutte le distanze odierne per ottenere le distanze all'istante  $t$ ) è la seguente:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left[ \Omega_{R0} \frac{1}{a^4} + \Omega_{M0} \frac{1}{a^3} + (1 - \Omega_0) \frac{1}{a^2} + \Omega_\Lambda \right]$$

dove  $\Omega_{R0}$ ,  $\Omega_{M0}$ ,  $\Omega_\Lambda$  rappresentano rispettivamente la densità di radiazione, la densità di materia e la densità di energia del vuoto, in unità della densità critica, oggi. Inoltre  $\Omega_0 = \Omega_{R0} + \Omega_{M0} + \Omega_\Lambda$ .

Studiando questa equazione si trova che mentre la presenza della radiazione non cambia molto l'età dell'universo (conta solo nel breve periodo iniziale, quando  $a$  è molto piccolo) la presenza dell'energia del vuoto, che non si diluisce, cambia radicalmente l'evoluzione dell'universo, tendendo a farlo accelerare quando essa diventa dominante.

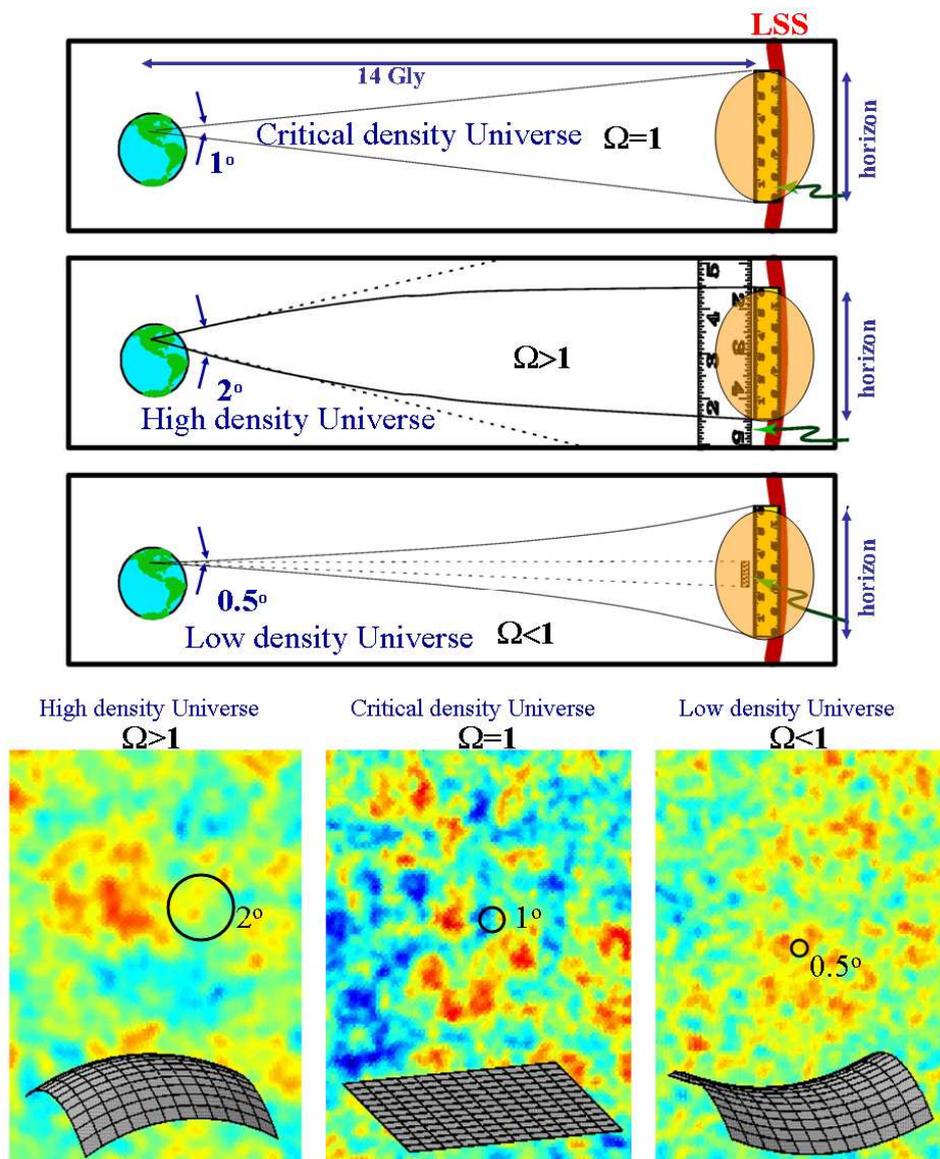
Questo si vede facilmente derivando l'equazione di Friedmann e quindi trovando l'espressione dell'accelerazione dell'espansione:

$$\ddot{a} = H_0^2 \left[ -\Omega_{R0} \left(\frac{1}{a}\right)^3 - \frac{1}{2} \Omega_{M0} \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \Omega_\Lambda a \right]$$

I termini che rappresentano i contributi all'accelerazione da parte della densità di radiazione e della densità di materia sono ambedue negativi, mentre quello che rappresenta l'energia del vuoto è l'unico positivo. Per valori di  $a$  piccoli (inizio dell'espansione) dominano i primi due termini, e l'universo decelera la sua espansione. Per valori di  $a$  sufficientemente grandi diventa invece dominante il terzo termine, e l'universo accelera la sua espansione (vedi fig. 4).

Per trovare la soluzione  $a(t)$  è necessario sapere che densità hanno le diverse forme di massa-energia presenti nell'universo, cioè quali sono i valori dei parametri  $\Omega$ .

I dati sperimentali mostrano che oggi la densità totale di massa-energia è pari a quella critica, quindi  $\Omega_0=1$ . Questo risultato è stato ottenuto dalle osservazioni delle anisotropie della radiazione di fondo a microonde, tramite esperimenti come BOOMERanG, WMAP e molti altri (vedi ad esempio *Un click sull'universo*, de Bernardis P. e Masi S., in «Sapere», giugno 2000, e *BOOMERanG e la nuova immagine dell'Universo*, de Bernardis P. e Masi S., in «Sapere», agosto 2001; vedi anche figura 6).



**Figura 6:** mappe della radiazione cosmica di fondo a microonde aspettate per diversi valori della densità totale di massa-energia nell'universo. Le macchie calde e fredde corrispondono ad orizzonti causali all'epoca in cui è stata rilasciata la radiazione cosmica a microonde, circa 380000 anni dopo il Big Bang. Ciascun orizzonte deve avere una dimensione propria tipica di 380000 anni luce, e, visto dalla nostra posizione, ad una distanza di circa 14 miliardi di anni luce, deve sottendere un angolo di circa un grado. Questo se la geometria dell'universo è euclidea, e quindi i raggi di luce viaggiano su geodetiche rettilinee. Altrimenti l'angolo sotteso può essere inferiore (densità inferiore a quella critica) o superiore (densità superiore a quella critica). Le misure di BOOMERanG, WMAP e altri esperimenti mostrano che viviamo in un universo a densità critica, con geometria a grande scala euclidea.

La presenza del fondo cosmico a microonde, il gas di fotoni generatisi nell'universo primordiale, pochi microsecondi dopo il Big Bang, quando materia e antimateria si annichilarono quasi completamente, fornisce un orologio standard sul quale tutti gli osservatori dell'universo possono sincronizzarsi. Infatti, la temperatura del gas di fotoni del fondo cosmico a microonde diminuisce in modo esattamente inverso al fattore di scala: se l'universo raddoppia tutte le sue distanze, la temperatura del fondo cosmico dimezza, e così via. Tutti gli osservatori nell'universo oggi misurano 2.725K di temperatura, e in futuro misureranno temperature inferiori, mentre in passato misuravano temperature superiori. È quindi possibile, almeno concettualmente, in qualunque posizione del nostro universo determinare il tempo passato dal Big Bang.

Combinando osservazioni del fondo cosmico a microonde con osservazioni di supernovae ad alto redshift e di altri indicatori cosmologici, si trova che solo il 4% della massa energia presente nell'universo è costituito da materia ordinaria, mentre il 22% è costituito da materia oscura. La radiazione fornisce un contributo trascurabile al totale, mentre il restante 74% della massa-energia è sottoforma di energia del vuoto, chiamata più in generale energia oscura. Questo significa che siamo in un universo che oggi sta accelerando. Il che vuol dire che si espandeva più lentamente nel passato, e che quindi ha impiegato più tempo per raggiungere le dimensioni attuali. Quindi l'età dell'universo è più lunga di quella che abbiamo calcolato finora (vedi fig.4): risulta essere di 13.7 Miliardi di anni.

Cosa avvenne all' inizio dell'espansione, in quello che chiamiamo genericamente Big Bang, non è dato sapere, perché a tutt'oggi non abbiamo una teoria fisica capace di descrivere uno stato ad energie così elevate. Ciò richiederebbe una teoria unificata della meccanica quantistica e della relatività generale, della quale non esiste ancora una forma consolidata e sperimentata adeguatamente. La nostra trattazione fisica dell'evoluzione dell'universo, basata su leggi fisiche ben sperimentate, deve necessariamente iniziare pochi attimi dopo il Big Bang. ma si tratta di attimi rispetto a miliardi di anni !

Resta anche da stabilire, dal punto di vista fisico, quale sia la natura dell'energia oscura e quale quella della materia oscura. Ambedue queste forme di massa-energia sono richieste da molte osservazioni di tipo astrofisico e cosmologico, ma i loro costituenti elementari non sono mai stati misurati in laboratorio. Questa è per ora una grande sfida per gli scienziati, che probabilmente li impegnerà per diversi anni a venire.

## **Prodigiosa importanza della nozione di invarianza in fisica.**

**Carlo Bernardini**

Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza", Roma

e-mail: carlo.bernardini@roma1.infn.it

Il problema "teorico" più importante è presto detto: che ci fosse un principio di causalità, lo pensavano anche gli antichi filosofi, Aristotele compreso. Se un "agente" fa qualcosa a un corpo pesante, ne consegue un "effetto". L'agente sarà una "forza", ma l'effetto visibile è, per gli "ingenui", la velocità del corpo: forza = causa, velocità = effetto. Questa è la base persistente (ahimé, ancora oggi) della cosiddetta "fisica ingenua". La nozione di accelerazione, nella fisica ingenua, non c'è: i livelli della percezione sono troppo primitivi perché un umano distratto si accorga della variazione della velocità piuttosto che della velocità. Per maneggiare nozioni come la "dipendenza della velocità dal tempo" – e non solo la posizione del corpo, ben visibile – occorre un'idea almeno intuitiva di funzione di una variabile e della sua possibile variazione (e non parliamo di una notazione simbolica adeguata).

In tutta la scienza pregalileiana si trovano, indubbiamente seppure raramente, enunciati e nozioni formalizzate, ma la formalizzazione non va al di là di relazioni algebriche rudimentali o di figure atte a utilizzare risultati della geometria euclidea. Quando Galilei compare sulla scena italiana e mondiale, uno dei suoi contributi importanti è una formalizzazione enormemente innovativa, da cui molto dopo prenderanno le mosse sia la relatività speciale (dal discorso detto "della nave", vedi avanti) che la relatività generale ("principio di equivalenza", vedi avanti): si tratta dell'invarianza della fisica e delle sue leggi sotto *trasformazioni* – questa è la parola chiave – di particolari elementi della formalizzazione stessa. Tuttavia, gli strumenti formali per produrre la versione generale delle trasformazioni di fatto non ci sono ancora e non ci saranno per un bel po'. Sicché Galileo dovrà cavarsela a parole; e lo farà brillantemente, in quell'italiano espressivo che solo per Italo Calvino avrà il doppio pregio del valore letterario e scientifico.

La notazione  $f(x)$  per indicare una "funzione della variabile  $x$ " fu infatti introdotta da Leonard Euler solo negli anni 1734-35, sui *Commentarii Academie scientiarum imperialis Petropoli*; e, per giunta, la nozione attuale di funzione di una o più variabili risale al 1837 ed è di J. Lejeune-Dirichlet (Repert. Phys. Berlin, 1, pg 152). E' difficile immaginare come facessero i matematici e i fisici del '600 ad avere rappresentazioni mentali formalizzate in un linguaggio operativo efficiente; del resto, dell'importanza delle notazioni anche al livello più elementare dell'analisi testimonia la diatriba Newton-Leibniz: è innegabile che le notazioni di Leibniz, simili a quelle ancora in uso, fossero assai più accettabili delle "flussioni" di Newton. Ma Galilei fa, a modo suo, dell'eccellente fisica teorica, almeno cento anni prima di queste acquisizioni: evidentemente, con altri mezzi. Ma allora, su che cosa si basano le rappresentazioni mentali di Galilei? Egli stesso dice, nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche attorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*: "[il libro della natura] è scritto in lingua matematica e i caratteri sono triangoli, cerchi e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente in un oscuro laberinto". Dunque, Galilei conosce quella parte della matematica che oggi chiamiamo "Geometria Euclidea", indubbiamente già molto sviluppata. Ma conosce anche la parola accelerazione e perfino la composizione vettoriale di moti ortogonali, come dice nella quarta giornata dei *Discorsi*: "...il mobile, che immagino dotato di gravità, giunto all'estremo del piano [inclinato] aggiungerà al primo moto uniforme ed indelebile, l'inclinazione verso il basso acquistata dalla propria gravità e ne sorgerà un moto composto di un moto orizzontale uniforme e di un moto verticale naturalmente accelerato". Questo modo di vedere le cose, i fatti naturali, già nella propria mente, scomposti e ricomposti secondo regole che danno un significato alla rappresentazione è già un elemento di teoria nel senso più moderno del termine.

Ma Galilei mostra tutta la sua straordinaria grandezza in un'altra capacità che condivide solo con i massimi fisici contemporanei: Einstein, primo tra tutti, Bohr, Schroedinger e pochissimi altri. E' capace di argomentare con "esperimenti pensati", *Gedankenexperimenten* nella letteratura che usiamo oggi. Il suo celebre passo che annulla il significato "assoluto" della parola velocità e ne fa un concetto relativo da cui nasceranno i già detti sviluppi più stupefacenti della fisica del '900 è un esempio che tutti conoscono ma non è mai abbastanza ripetuto. Si trova nel *Dialogo sopra i due Massimi Sistemi del Mondo* ed è sobriamente intitolato: *In mare, sotto coverta*. Ecco cosa dice Salviati, nelle sue parti essenziali:

*"Riserratevi con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun gran naviglio e quivi fate di aver mosche farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze siano eguali [...]. Osservate che avrete tutte queste cose, benché niun dubbio vi sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina o sta ferma [...]. E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione 'essere il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che perciò dissi io che si stesse sotto coverta [...].* Interviene a questo punto Sagredo, con una perspicua osservazione che fa ben capire la genialità dell'argomento che trasforma osservazioni comunissime in una conclusione sbalorditiva:

*Queste osservazioni, ancorché navigando non mi sia caduto in mente di farle a posta, tuttavia son più che sicuro che succederanno nella maniera raccontata: in confermazione di che mi ricordo essermi cento volte trovato, essendo nella mia camera, a domandar se la nave camminava o stava ferma e talvolta, essendo sopra fantasia, ho creduto che ella andasse per un verso, mentre il moto era al contrario. [...]*

Uno dei motivi per i quali penso che Galilei debba ancora oggi essere studiato nelle scuole con estrema attenzione e soprattutto nei corsi di filosofia e letteratura è che non è difficile constatare che molta gente fa ancora fatica a capire questa nozione di relatività e il suo stretto legame con il principio di inerzia, con la nozione di forza, con l'importanza dell'accelerazione. La "fisica ingenua" non è mai salita sul naviglio di Galilei per verificare l'invarianza sotto *trasformazioni dei sistemi di riferimento in moto relativo uniforme*. Ma, sia per la chiarezza del discorso (all'epoca, una vera e propria rivalsea del "volgare" sull'oscurità del latino) sia per la forza del ragionamento induttivo che prelude a tutte le fenomenologie moderne (dopo gli innumerevoli sterili tentativi di assiomatizzazione delle meccaniche razionali e delle fisiche matematiche, particolare vanto dell'accademia italiana dell'800, dominata da ossessioni deduttive), io credo che Galilei sia ancora oggi ricco di insegnamenti illuminanti.

E però, proprio prendendo lo spunto dai rapporti tra matematica e fisica, spesso deformati dalle estremizzazioni delle pregiudiziali ideologiche di cui queste scienze non si liberano facilmente (e mi basterà citare fenomeni come il bourbakismo per la matematica e come il realismo classico positivista per la fisica) vorrei tentare di spiegare che proprio Galilei ci ha mostrato che la fisica teorica è un modo di pensare la realtà non guidato da tecnicismi formali quanto da immaginazione e intuizione che riescono a superare in modo del tutto nuovo lo stadio delle congetture derivanti da "ciò che appare a prima vista". Ciò che appare a prima vista è oberato da ridondanze e da informazioni estranee derivanti da altri elementi culturali (*è un aggirarsi vanamente in un oscuro laberinto*; così aveva detto nei *Discorsi*). Galilei parla con gente che vede il Sole che gira nel cielo e deve discutere con religiosi che leggono sacre scritture in cui a quel Sole è ingiunto di fermarsi. Come potrebbe il popolino del suo tempo accettare un sistema copernicano in cui, per giunta, l'uomo non è più il centro di rotazione dell'universo? E che dire della constatazione che corpi pesanti e corpi leggeri cadono, nel vuoto, in tempi uguali partendo fermi dalla stessa altezza? Ancora oggi, molta gente pensa che la caduta sia più celere per oggetti pesanti che per oggetti leggeri; e comunque non saprebbe arrivare con mezzi propri alla conclusione che questo è vero "nel vuoto", in assenza di quell'aria in cui siamo nati e che rallenta le piume rispetto ai sassi. Meno che mai formulerà autonomamente quel principio di equivalenza tra l'effetto di un campo gravitazionale su un grave in caduta libera e un sistema di riferimento accelerato; nemmeno

quando leggerà sbalordito sui giornali che un problema, per gli astronauti moderni, è l'assenza di peso. Anche qui, le equazioni della relatività generale esibiranno una prodigiosa *invarianza per trasformazione di sistemi di riferimento*.

Insomma, tutto ciò che accade in natura è come una "macchina" semplice che nasconde l'essenziale sotto incrostazioni di elementi irrilevanti al fine di comprenderne il funzionamento; e l'operazione di liberarsi da ciò che è di troppo e, addirittura, intralcia la comprensione dell'essenziale è uno dei più importanti atti della rappresentazione teorica in fisica. In qualche modo, ciò che a volte si scopre è perfino una "inessenzialità imprevista", da cui scaturiranno leggi di significato superiore alla banalità delle evidenze immediate: pensate, Galilei scopre che il peso di un grave non ha rilevanza nell'accelerazione della sua caduta nel vuoto. Egli non lo sa, ma questa sua scoperta, come abbiamo detto, frutterà molti decenni dopo, rivisitata come "Principio di equivalenza", la relatività generale di Albert Einstein. Ma anche l'isocronismo delle piccole oscillazioni dei pendoli, cioè l'indipendenza del periodo dall'ampiezza delle oscillazioni stesse, che fa del pendolo il primo oscillatore armonico e quindi il primo orologio, è una grande scoperta teorica.

Forse non tutte le intuizioni di Galilei sono corrette: la sua immaginazione corre molto, soprattutto nel superare i filtri retorici attraverso i quali fanno passare le osservazioni persone anche colte, pensatori accreditati. La cultura umana è soverchiata da una abilità, considerata con molte buone ragioni la più importante: la parola, il linguaggio proposizionale. Ciò che si può dire a parole acquista un carico di "verità" che persino i fatti sembrano non avere. E' Galilei a interrompere questa gerarchia di valori avanzando l'idea che la comprensione dei fatti richieda un linguaggio che su quei fatti è costruito-concepito, ma piuttosto su ciò che di più semplice c'è e sia pur misurabile: i triangoli, i cerchi, e tutto l'apparato euclideo. Sicché si può ben dire che la grandezza del Nostro includa anche la previsione di un linguaggio da sviluppare per poter fare la fisica teorica. E come, e con che tempi rapidi, di lì a poco si svilupperà! Sopravvivendo alle controversie, alle esagerazioni rigoriste, alle pretese di assiomatizzazione: sarà il linguaggio della maltrattata filosofia induttiva, sarà il linguaggio che permetterà alla filosofia naturale di diventare fisica teorica, al di là sia delle colonne d'Ercole della retorica che dei gorghi involutivi delle matematiche astratte. Oggi ancora, questa straordinaria premonizione di Galilei appare ostica persino alle persone istruite: che ci possa essere un "linguaggio dei fatti" che produce rappresentazioni mentali ripulite dalle incrostazioni di ogni tipo (ridondanze e pregiudizi, ma soprattutto le arbitrarie convenzioni umane, utili ma non assolute) e su cui è possibile lavorare per scoprire che cosa regola l'evoluzione del mondo. Il problema, a mio parere, è forse rintracciabile nella triplice storia evolutiva di questo linguaggio, che ha dovuto occuparsi del "dimostrare" (come "fabbrica di teoremi", matematica pura) asserzioni astratte relative al significato di strutture simboliche; del "calcolare" (come "procedura affidabile") risultati a partire da una proposizione formalizzata; del "formalizzare" (come linguaggio sintetico ed efficiente oltretutto calcolabile), cioè produrre modelli equivalenti, simulacri simbolici attendibili dei sistemi fisici. Quest'ultima specialità è la più tipicamente ribattezzabile "fisica teorica" e avrà la sua apoteosi molto dopo Galilei, con Hamilton e Lagrange, le loro funzioni speciali e l'adozione di principi variazionali; Galilei non poteva averne idea, ma ne sarebbe stato entusiasta. Ma non è facile spiegare che un fisico teorico di oggi – giusto per fare un esempio - alla parola "cristallo", reagisce "pensando" non certo a uno scintillante zaffiro o un trasparente bicchiere per champagne. Bensì, a una rete estesa tridimensionale di oscillatori incolori, inodori, insapori ma accoppiati tra loro, attraversati da i loro "modi normali", i *fononi* – con elegante neologismo coltamente grecizzante – che esprimono l'equivalenza di quel cristallo a un "gas di eccitazioni che si propagano". A quelle eccitazioni individuali potrà applicare tutti gli strumenti della meccanica analitica e particolarmente quei principi geometrici di invarianza dello spazio-tempo da cui Emmy Noether, già nel 1918, ha ricavato le grandi leggi di conservazione. Non a caso, questi principi di invarianza saranno chiamati da Eugene Wigner *Superleggi*, per la loro capacità di sopravvivere al mutare delle teorie fenomenologiche: dalla meccanica hamiltoniana alla meccanica quantistica, dall'elettromagnetismo maxwelliano all'elettrodinamica quantistica e così via. Perciò, questo linguaggio della fisica teorica ha un che di prodigioso: è un vero dispiacere che sia solo un dialetto internazionale di una comunità così piccola di epigoni galileiani, ancora sopraffatti da lingue morte.

A mio parere, il pensiero galileiano non è stato ancora studiato con sufficiente profondità per estrarne la radice tutta particolare che lo distingue dalle costruzioni mentali non scientifiche. Purtroppo, chiunque viva e assorba il modo di pensare della fisica teorica contemporanea, specie nella sua versione detta "fenomenologia", non sembra più rendersi conto della eccezionalità e della differenza dagli altri modi, della filosofia, del-

la politica, delle arti: trova quel modo naturale e spontaneo, non bisognoso di valutazioni epistemologiche su base linguistica. Si insiste, a buon diritto, sull'unità della cultura, ma confondendola con una pretesa e velleitaria *identità* delle culture: ciascuna delle quali non è "buona per tutti gli usi". In nome di Galilei, sarà bene riconoscere a ciascuna specialità culturale la sua specificità. Forse, ci risparmieremmo inutili diatribe e prevaricazioni, incomprensioni o contrapposizioni dottrinali.

## **Il ruolo del tempo nei sistemi chimici**

**Giovanni Villani**

Istituto di Chimica dei Composti Organo-Metallici (UOS – Pisa)

e-mail: villani@pi.iccom.cnr.it

### **1. Introduzione**

Nella seconda metà del secolo scorso sono avvenute due “rivoluzioni” scientifiche che hanno modificato nella sostanza l’immagine del mondo offerta dalla scienza e, quindi, hanno posto fondamentali problemi alla didattica delle discipline scientifiche. Esse vanno sotto i nomi di “Scienze della Complessità” e “Teoria Generale dei Sistemi”. La portata di queste rivoluzioni non è stata ancora totalmente “assorbita”. Ad oggi, la stragrande maggioranza dei fisici, buona parte dei chimici e parte dei biologi continuano a ragionare con gli schemi Ottocenteschi, con il paradigma opposto della “semplicità”. Diversa è la situazione nelle nuove branche scientifiche (per esempio l’ecologia) o nei settori intrinsecamente interdisciplinari (scienze ambientali, dei materiali, ecc.) dove, seppure senza particolari riflessioni filosofico/concettuali, il nuovo paradigma è, di fatto, predominante e al lavoro. Nella didattica, poi, la situazione è del tutto statica. Nelle scuole italiane di ogni ordine e grado la scienza insegnata è quella “classica” e già le due rivoluzioni d’inizio Novecento (quella quantistica e quella relativistica) fanno fatica ad essere assorbite. Di conseguenza, l’immagine scientifica del mondo che hanno i “non addetti ai lavori”, quelli che completano i loro studi scientifici a livello delle Secondarie, è ancora incentrata sulla meccanica classica e sul substrato filosofico deterministico/riduzionistico ad essa sottesa. A questo si è aggiunto l’imitazione più o meno consapevole che altre discipline hanno fatto della fisica e il quadro che ne viene fuori è un’immagine del mondo “antica” e “inadeguata”.

In questo contesto, noi proponiamo la chimica come un grimaldello per scardinare l’immagine “semplice” del mondo materiale che ad oggi viene proposto. Il perché partire proprio dalla chimica speriamo sia chiaro alla fine del lavoro.

### **2. La chimica: prima scienza della complessità sistemica**

La chimica, come si è strutturata storicamente a partire dalla fine del Settecento (da Lavoisier in poi), ha da sempre usato concetti sistemici e tali concetti, implicando un abbandono del paradigma della “semplicità”, portano a poter dire che la chimica è stata la prima scienza della complessità sistemica. In particolare, i suoi concetti fondanti di composto e molecola (lo stesso discorso varrebbe in maniera meno evidente per i concetti di atomo ed elemento) rientrano a pieno titolo nella casistica dei sistemi strutturati e complessi. A riguardo, per il momento, portiamo la citazione di Morin che dice “Il fenomeno sistema è oggi evidente dappertutto. Ma l’idea-sistema emerge ancora a malapena nelle scienze che trattano i fenomeni sistemici. Certo, la chimica concepisce *de facto* la molecola come sistema, la fisica nucleare concepisce *de facto* l’atomo come sistema, l’astrofisica concepisce *de facto* la stella come sistema, ma da nessuna parte l’idea di sistema viene spiegata o risulta esplicatrice”.

La chimica, come scienza che ricerca la composizione (microscopica e macroscopica) di un pezzo di realtà, nasce in ottica riduzionista. Non è un caso che gli elementi chimici sono sempre stati pochi, sia che fossero i quattro elementi di Empedocle o di Aristotele (acqua, aria, terra, fuoco), o i tre principi di Paracelso, o gli altri tentativi fatti in questa ottica. È solamente con Lavoisier, e la sua ben nota definizione operativa, che di elementi se ne ottengono 33. Ciò fa fare alla chimica il salto logico che postulava una differenziazione qualitativa anche a livello “elementare”. Con l’introduzione di differenze qualitative irriducibili della materia si

superano le possibilità della trattazione esclusivamente "meccanica" e si introduce una complessità intrinseca.

Ancora più importante per la chimica sono, ovviamente, i concetti di composto e molecola. Può apparire strano che, mentre per il concetto di elemento e di atomo, la chimica moderna nasce moltiplicando le differenziazioni (da 4 elementi a 33, per arrivare al centinaio odierno), per i concetti di composto e molecola si debba seguire la strada opposta: ridurre le differenziazioni. Questo perché in una corretta ottica riduzionista, una volta associati i fondamenti semplici (atomo ed elemento), la loro composizione può e deve dare infiniti composti e molecole in quanto questi non sono concettualmente distinti dai miscugli e dagli aggregati e sono solamente le infinite situazioni concrete degli esperimenti a creare l'uno piuttosto che l'altro composto. È con la legge delle "proporzioni definite" (Proust, 1799) e quella delle "proporzioni multiple" (Dalton, 1808) che si pone un freno alla molteplicità dei composti, che ne sviliva anche il loro valore concettuale oltre che concreto. Da allora, la chimica ha sempre avuto a che fare con una miriade di soggetti differenti a cui attribuire proprietà e, in prima battuta, un nome che li identificasse.

### **3. Il concetto di sistema in fisica e biologia**

Nella fisica classica il concetto di sistema è largamente utilizzato, ma in un'accezione diversa da quella da noi utilizzata. Esso, infatti, significa sostanzialmente "pezzo di realtà" da indagare e non include la strutturazione di tale realtà. È solamente con la meccanica quantistica e con la termodinamica di non equilibrio che le limitazioni, che avevano portato all'inutilizzo in queste due branche della fisica del concetto di struttura, vengono rimosse. Guardiamolo un po' più in dettaglio il concetto di sistema in meccanica classica e in termodinamica di equilibrio proprio per vedere le differenze con il concetto di sistema strutturato.

Ogni sistema fisico in meccanica classica è costituito da un insieme di "punti materiali", cioè punti dotati di massa, ciascuno dei quali possiede tre gradi di libertà, rappresentati dalle sue coordinate spaziali. In meccanica, quindi, ogni sistema fisico è costituito da un insieme di  $P$  particelle (atomi, molecole, ecc.) con  $3P$  gradi di libertà ed il suo stato ad ogni istante è determinato da  $6P$  valori (3 coordinate e tre momenti per particella). In meccanica esistono leggi generali del moto, che si traducono in un insieme di equazioni differenziali, che, una volta risolte, permettono di ottenere le funzioni che descrivono l'evoluzione temporale di tutti i  $P$  punti materiali. Tali funzioni ci danno una traiettoria nello spazio delle fasi per ogni singolo punto materiale e l'insieme delle traiettorie ci dà la trasformazione nel tempo di uno stato del sistema. Ogni traiettoria resta interamente fissata una volta noto un suo punto (determinato dalle condizioni iniziali) e descrive, quindi, la storia completa (passata, presente e futura) del nostro punto materiale e l'insieme dei punti materiali quella del sistema, che è del tutto determinata e deterministico. Il problema fondamentale della termodinamica classica, invece, consiste nella determinazione dello stato di equilibrio verso il quale evolve un sistema composto e isolato quando alcuni vincoli interni sono rimossi. Esiste, quindi, la cosiddetta "freccia del tempo", cioè una direzionalità nel tempo che ci porta dallo stato iniziale allo stato finale di equilibrio. Il tempo, quindi, in termodinamica di equilibrio è visualizzato dalla evoluzione che trasforma i molteplici possibili stati iniziali nell'unico stato finale possibile: quello di equilibrio.

In biologia, il concetto che permette il passaggio da un aggregato ad un sistema è quello d'organizzazione: organismi, viene infatti da tale termine. Vivente, poi, è l'esempio più classico di proprietà emergente, cioè di una proprietà sistemica che non è presente nei costituenti. Gli organismi viventi, più delle molecole, si differenziano dai sistemi fisici e, quindi, esiste tutto un ambito filosofico che li ha da sempre differenziati. Secondo alcuni, vi è una nuova forma di riduzionismo in biologia, non più fiscalista e meccanicista, ma informazionale, legata alla decodifica del DNA. Monod dopo aver definito gli esseri viventi "macchine chimiche" aggiunge che come ogni macchina, ogni organismo, anche il più semplice, rappresenta un'unità funzionale coerente e integrata. È per lui ovvio che la coerenza funzionale di una macchina chimica tanto complessa, e per di più autonoma, esige l'intervento di un sistema cibernetico che controlli in più punti la sua attività. È infatti evidente che, anche se gli enzimi svolgessero alla perfezione il loro compito reazione per reazione, il metabolismo cellulare finirebbe inevitabilmente nel caos se tali reazioni non fossero subordinate le une alle altre. In realtà, l'aspetto informazionale può essere inglobato tanto nel contesto riduzionista quanto in quello olistico. Infatti, la genetica molecolare è una forma di riduzione *sui generis* (non più fisico-chimica, ma basata sulle scienze della comunicazione). In realtà, più che di riduzionismo in senso classico, qui si dovrebbe parlare di un "prestito metaforico" che, tra l'altro, non lascia invariato il linguaggio tratto

dalla teoria delle comunicazioni: codice, traduzione, errore di copiatura ecc. sono altrettanti termini teorici costitutivi dei dizionari della genetica, che si applicano alla interpretazione e spiegazione del significato del DNA e del suo funzionamento in maniera diversa dagli omologhi termini della scienza delle comunicazioni. È sicuramente vero che per cogliere il significato e la portata della decodifica del DNA ad opera di Watson e Crick, non si può non avere presente ciò che in quegli stessi anni avviene nel mondo delle scienze delle comunicazioni, con l'elaborazione del concetto di "informazione" di Shannon e Weaver. Tuttavia, bisogna anche vedere come tale concetto, esportato in genetica, è stato modificato da quello cibernetico.

#### **4. Il tempo nei sistemi chimici. Confronto con la fisica e la biologia**

Finora si è introdotta un'idea statica del concetto di sistema sia per la chimica che per la fisica e la biologia. A questo punto va fatto il passo successivo, va introdotto il rapporto stretto che esiste tra una realtà sistemica (per esempio la molecola con la sua struttura) e il concetto di tempo. Tale rapporto introduce in chimica due tipi diversi di "tempo": uno periodico e l'altro irreversibile, ambedue importanti nel mondo molecolare. Il tempo molecolare periodico è legato alla flessibilità della struttura che, a dispetto della sua rappresentazione grafica, non è mai qualcosa di statico. Un buon esempio di tempo periodico nel mondo molecolare è l'oscillare simultaneo degli atomi intorno alla loro posizione di equilibrio (modi normali di vibrazione). Tali processi portano ad una modifica periodica della struttura, con una struttura media, dal punto di vista spaziale costituita dall'insieme delle posizioni di equilibrio di tutti gli atomi, e coincidente spazialmente con la struttura molecolare nella sua visione statica, e delle strutture limiti, legate all'energia presente. A tale tempo sono correlate una serie di proprietà macroscopiche evidenziabili con apposite interazioni tra la molecola e diversi tipi di radiazione (spettroscopie). L'altro tempo presente nel mondo molecolare è quello di "nascita-morte" delle molecole, cioè il tempo legato alla reattività molecolare, ed è irreversibile nel senso che distrugge una struttura per formarne un'altra. In questo caso si dice che è avvenuta una reazione chimica e dall'originale molecola (reagente) si è formata una nuova molecola (prodotto), con una diversa struttura molecolare. Il risultato di questa trasformazione di struttura ha creato un nuovo ente: una molecola differente per proprietà da quella originaria, con un suo nome e, quindi, con una sua concreta individualità. L'esistenza poi di reazioni chimiche di equilibrio, in cui si va contemporaneamente dai reagenti ai prodotti e viceversa, fino a che non avviene una compensazione perfetta dei due processi, e quindi un'apparente non reattività, non modifica l'irreversibilità del singolo atto reattivo molecolare.

Il mondo dinamico della termodinamica appare più simile al nostro usuale mondo quotidiano della perfetta macchina newtoniana della meccanica classica. In esso gli oggetti non riescono a permanere in uno stato di moto senza che qualche sorgente di energia non li rifornisca continuamente. Il moto uniforme non è uno stato naturale che ha in sé stesso la propria giustificazione, come accade nel mondo newtoniano, ma uno *stato stazionario*, mantenuto a prezzo di una costante produzione di entropia. In questo mondo ogni processo è caratterizzato non solo da uno stato iniziale, ma anche da un ben preciso *stato finale*: lo stato di equilibrio termodinamico, raggiunto il quale il processo termina. In questa ottica va rivista anche la "negatività" della dissipazione. È ben vero che dobbiamo consumare carburante anche per mantenere in moto un'auto a velocità costante e in pianura, ma senza la dissipazione le ruote girerebbero a vuoto e l'auto starebbe in ogni caso ferma perché è l'attrito che consente di "agganciare" la strada e far procedere l'auto. È, infatti, ben noto che le ruote girano a vuoto senza spostare l'auto su di una superficie ghiacciata, dove l'attrito è piccolo.

Accenniamo adesso ad un aspetto fondamentale della termodinamica di non-equilibrio. Vicino all'equilibrio è sempre possibile linearizzare la descrizione del sistema, mentre lontano dall'equilibrio abbiamo una non-linearità dei comportamenti della materia. Non-equilibrio e non-linearità sono concetti legati tra loro. Abbiamo così nuovi stati fisici della materia, nuovi comportamenti in quanto le equazioni non-lineari hanno molte soluzioni possibili e pertanto una molteplicità ed una ricchezza di comportamenti che non si possono trovare vicino all'equilibrio. Questi sistemi instabili evolvono nel tempo e non sono "prevedibili" perché tenteranno a coprire tante possibilità quante ne hanno a loro disposizione in maniera casuale. L'esistenza di stati che si possono trasformare l'uno nell'altro anche in maniera aleatoria introduce anche un elemento storico nella descrizione. Non è l'unico caso fisico, ma è un caso importante. Si pensava che la storia fosse riservata alla biologia o alle scienze umane e, invece, appare persino nella descrizione di sistemi estremamente semplici. Il ruolo dell'irreversibilità nel creare "ordine", cioè strutture, a spese del flusso di energia è fondamentale ed apre uno spiraglio sui sistemi ordinati lontani dall'equilibrio che sono tutti gli

esseri viventi. Gli sviluppi dello studio dei fenomeni di non-equilibrio ci hanno dato una nuova immagine: i sistemi strutturati, le strutture ordinate, non sono più una prerogativa dei sistemi viventi, ma parte integrante dalle scienze naturali e, forse, non solo. Anche il concetto di probabilità ne è modificato. Nella concezione classica, l'irreversibilità era legata all'entropia e questa, a sua volta, a una probabilità intesa come "nostra ignoranza". Oggi, di fronte al ruolo dei fenomeni irreversibili nel creare struttura questa concezione della probabilità viene a cadere, altrimenti saremmo costretti ad attribuire alla nostra ignoranza le strutture che osserviamo, fino al potere di auto crearci. Questo significa non solo abbandonare un atteggiamento strettamente meccanicistico e deterministico, ma anche superare l'usuale termodinamica di equilibrio ed accettare fra le proprietà primarie dell'universo fisico anche la dissipazione, il caso e l'irreversibilità. Questi concetti sono ingredienti fondamentali per i sistemi, cioè quegli enti strutturati che tanto la meccanica classica e la termodinamica classica trascuravano e che, invece, sono il pane quotidiano per scienziati e gente comune.

Gli esseri viventi sono un tipo di sistema che dipende strettamente dall'ambiente. Essi, come è ben noto, sono sistemi lontani dall'equilibrio, al quale convergono con la morte, e mediate processi di creazione (anabolismo) e di degradazione (catabolismo) si mantengono in vita. Sono questi processi che implicano un continuo scambio di materia e di energia con l'ambiente, a rendere possibili, secondo Prigogine, un ordine sia architettonico che funzionale. Apparentemente ciò va contro il concetto di evoluzione descritto nella termodinamica dei sistemi isolati, che conduce semplicemente allo stato del massimo numero di complessioni e quindi al 'disordine'. Senza volere arrivare alle *macchine autopoietiche* (dal greco autòs = sé e pòiesis = produzione, creazione) di Maturana e Varela, in cui gli organismi viventi si preoccupano in primo luogo di rinnovare se stessi, e quindi esistono in quanto divengono, è indubbio che questi processi di scambio con l'ambiente siano fondamentali per gli esseri viventi e rendono possibile la sua strutturazione.

Ritornando al rapporto generale tra i concetti di sistema e quello di tempo, possiamo notare che per tutti i sistemi strutturati esistono dei processi interni e dei processi esterni di interazione e che tutti questi processi sono strettamente collegati ad un loro "tempo caratteristico". I processi di interazione, inoltre, possono essere distinti in due tipi: interazioni con l'ambiente, inteso come un'entità più grande del sistema e a-strutturato, e interazioni "alla pari" tra sistemi, di cui la reazione chimica può costituire un buon esempio. Va tenuto presente che non sempre i processi interni al sistema possono essere completamente distinti dai processi esterni di interazione. È chiaro che per un essere vivente, l'interazione con l'ambiente, ma anche l'interazione "alla pari" predatore-preda, sono strettamente correlati con ciò che avviene nell'individuo (sistema). Infatti, in questo caso i processi interni sono i tipici processi metabolici degli esseri viventi (fino al pensiero, per l'uomo) e tutti necessitano non solo di un apporto materiale esterno, per esempio la respirazione dell'ossigeno, ma la loro interazione con l'ambiente è molto più complessa e non si esaurisce nelle basi materiali necessarie. Inoltre, ogni essere vivente agisce e costruisce degli schemi per potere agire in futuro tramite un confronto continuo con l'ambiente. Si può dire che è l'ambiente a strutturarli in quel modo particolare in cui è strutturato.

## 5. Conclusione

Dalla notte dei tempi culturali, il concetto di ente ed il concetto di trasformazione sono il binomio con cui spiegare la persistenza e la variabilità di tutto il mondo che ci circonda, da quello inanimato a quello animato, all'uomo ed ai suoi prodotti. Da quanto detto, quindi, dovrebbe trasparire evidente l'importanza del concetto di sistema in scienza e il ruolo nelle sue trasformazioni temporali. Eppure tale concetto è così ben nascosto in fisica e in chimica che sembra proprio alla base della dicotomia animato-inanimato: l'organismo biologico contrapposto alle entità fisiche e chimiche astrutturate. L'indivisibilità del primo contrapposto alla divisibilità dell'analisi delle seconde. Se poi ci si sposta sul piano delle scienze umane, nelle discipline sociali e antropologiche, si vede crescere l'importanza del concetto di sistema fino all'individualità di ogni singolo sistema vivente umano, la singola persona. Qui si è cercato di far vedere che il concetto di sistema, pur nella differenza d'importanza, svolge un ruolo sia nelle scienze naturali dell'inanimato, sia in quelle dell'animato oltre che in quelle umane. Esso può essere, quindi, un concetto unificante e la Teoria dei Sistemi, con tutti i suoi limiti, ne rappresenta una controprova. Tutto questo, però, non va visto in maniera statica, non va in nessun caso creato una dicotomia tra gli enti sistemici e le loro trasformazioni. Il concetto di tempo, potremmo dire sistemico, aiuta a tenere insieme il persistente e il mutevole, due aspetti della realtà che devono sempre coesistere.

In questa ottica dinamica e sistemica, un ruolo centrale può essere svolto dalla chimica che, come detto, è la prima vera scienza sistemica. Essa popola il suo mondo (macroscopico e microscopico) di milioni di enti sistemici con caratteristiche specifiche, soggetti e oggetti di spiegazione del mondo reale. Essa pone sullo stesso piano la loro persistenza e la loro trasformabilità (reattività). Non è un caso che, tra il "semplice" mondo delle entità fisiche (sia meccaniche sia termodinamiche) e il prorompente mondo degli organismi viventi, la descrizione chimica permetta un passaggio graduale, distruggendo alla radice la dicotomia inanimato - animato.

Come applicare queste nozioni in ambito didattico e chimico in particolare? È fuori dallo scopo di questa discussione e dalle competenze dell'autore, dare "ricette" specifiche per portare nella maniera più opportuna in ambito didattico il concetto di sistema chimico e il ruolo del tempo in esso. Tuttavia, abbiamo visto che la chimica rappresenta una fondamentale scienza sistemica per l'importanza che in essa assume il concetto di molecola (sistema di atomi) e di composto chimico (sistema di elementi) e questa "verità scientifica" va sottolineata sul piano filosofico, rivendicata su quello culturale ed integrata in quello didattico. Inoltre, le reazioni chimiche rappresentano un buon esempio di compresenza di enti e trasformazioni. Sottolineare, quindi, in ambito didattico una nuova immagine del mondo materiale con l'aiuto della chimica può essere un buon servizio che tale disciplina può apportare alla più generale didattica delle scienze.

## **Il tempo nella Scuola: il punto di vista dei partecipanti a SPAIS sulla recente riforma Gelmini**

**Paola Ambrogi<sup>1</sup> e Elena Ghibaudi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>DD - SCI, ITIS "L. Nobili" Reggio Emilia

<sup>2</sup>Dipartimento di Chimica IFM., Università di Torino

e-mail: paola.ambrogi@unimore.it, elena.ghibaudi@unito.it

Fra i molti accenti nei quali il tema conduttore di SPAIS 2009 è stato declinato, vi è anche quello de "Il tempo nella Scuola". Questo tema – al quale è stato dedicato un pomeriggio di lavori di gruppo – voleva offrire al pubblico di SPAIS l'opportunità di analizzare le nuove tabelle orarie proposte dalla Riforma Gelmini e di discutere le problematiche ad esse associate, con particolare attenzione allo spazio dedicato alle materie scientifiche nei vari ordini di scuole secondarie.

Il pomeriggio di lavori si è aperto con una breve presentazione (a cura di Paola Ambrogi e Elena Ghibaudi) mirata ad illustrare alcuni aspetti della riforma Gelmini, allo scopo di stimolare il confronto tra i partecipanti e la successiva discussione nei gruppi di lavoro. Tra gli aspetti presi in considerazione in questa parte introduttiva elenchiamo: il confronto fra le vecchie e le nuove tabelle orarie; una comparazione tra attuali e possibili future classi concorsuali d'abilitazione e il nuovo assetto per Licei ed Istituti Tecnici; la facilità di passaggio tra tipologie di scuole differenti.

I partecipanti sono poi stati invitati a organizzarsi in gruppi per confrontarsi sul panorama che si sta delineando nell'insegnamento delle scienze e sulle conseguenti sfide che si prospettano tanto per gli insegnanti quanto per gli studenti.

A ciascuno dei cinque gruppi formati è stato chiesto di identificare 2 novità positive o negative del nuovo assetto e di formulare una domanda da discutere collettivamente. Al termine del tempo dedicato al confronto entro i singoli gruppi, le riflessioni e le domande da esse scaturite sono state restituite in plenaria. Ne è seguito un dibattito e, di comune accordo, si è stabilito che ogni gruppo inviasse un breve resoconto del lavoro sviluppato per poter avere un confronto più ampio.

L'analisi dei documenti prodotti dai gruppi permette di rilevare un certo numero di concordanze su punti critici della riforma, mentre alcuni aspetti sembrano essere stati percepiti da un minor numero di partecipanti.

La criticità segnalata con maggior enfasi e percepita con preoccupazione è la complessiva diminuzione del monte ore per le discipline scientifiche, riscontrabile in quasi tutti gli ordini di scuole, in contraddizione con gli intenti dichiarati della Riforma. Scrive a questo proposito uno dei gruppi: *"Ciò dimostra che l'immagine che si ha della scienza è quella di un tecnicismo privo di valore formativo e pertanto destinato non a tutti, ma essenzialmente ad indirizzi di tipo scientifico"*. Tale fatto viene dunque correlato ad una svalutazione del valore culturale della scienza, a favore di una concezione tecnologica della medesima (un saper fare, piuttosto che un sapere *tout court*). Alla luce di questa contestata concezione didattica, appare comunque ancor più contraddittoria e incomprensibile la diminuzione delle ore di laboratorio, il cui elevato valore didattico e formativo la Riforma finisce per rinnegare: *"Non si capisce come si possa migliorare la cultura scientifica dei ragazzi senza procedere ad attività pratico-teoriche quali il laboratorio impone e soprattutto (quando ciò è previsto) con classi così numerose"*.

Strettamente connesso a questi problemi è anche il nodo rappresentato dalla soppressione delle sperimentazioni: in nome di un pur necessario riordino, si procede alla cancellazione acritica di tutti gli esperimenti didattici intrapresi in questi anni, inclusi quelli che hanno prodotto risultati nettamente positivi. In questo modo si disperde un patrimonio di esperienze e si nega uno dei compiti precipi dell'istituzione scolastica

che è quello di *"ricercare ed incoraggiare innovative forme di trasmissione e di sviluppo del sapere. L'annullamento di qualunque forma di sperimentazione significa deprivare la Scuola di una importante occasione di crescita e di adeguamento culturale"*. In questa decisione si riscontrano gli elementi di un vero e proprio arretramento culturale: *"la cancellazione delle sperimentazioni implica la fine di esperienze (PNI, Brocca, ...) che per innovazione, creatività e progettualità costruttiva sono state particolarmente significative per l'apprendimento delle scienze. In questo quadro è lecito parlare di arretramento anche per i Licei"*.

Un punto particolarmente controverso della Riforma è la comparsa delle non meglio definite "Scienze integrate". Pur riconoscendo la necessità di una maggiore integrazione tra le discipline scientifiche, in linea con quell'approccio interdisciplinare alla realtà caldeggiato da vari documenti ministeriali<sup>74</sup>, si ritiene prioritario trovare una formula che salvaguardi la specificità culturale di ognuna, pena un approccio didattico superficiale ed inefficace: *"La conseguenza diretta sarebbe un'assoluta mancanza di specificità con un calo immediato della qualità tanto ricercata. Le competenze di ogni docente sono strettamente connesse al particolare corso di laurea seguito e, in media, è relativamente al proprio specifico campo disciplinare che si riesce a dare il meglio di sé, il che costituisce un importante fattore ai fini di un efficace processo di insegnamento-apprendimento. Non è con integrazioni superficiali che si migliora la qualità dell'apprendimento, ma con la collaborazione effettiva e strutturata tra discipline e competenze professionali diverse, non necessariamente di ambito scientifico propriamente detto ma, per esempio, con la filosofia, la storia, la storia dell'arte..."*

Una problematica particolarmente sentita dai docenti è quella della mancanza di attenzione nei confronti del "tempo di apprendimento" dell'allievo. Alcuni docenti rilevano che l'allievo *"inserito in un contesto-classe con ben oltre 30 compagni, non avrà l'opportunità di seguire le lezioni con la dovuta concentrazione/attenzione ed in tale contesto avrà pochissime possibilità di recuperare eventuali gap di apprendimento nell'ambito dell'ambiente classe"*.

Esiste dunque un problema di qualità dell'apprendimento. Di fronte alla domanda auto-formulata *"noi docenti siamo in grado di adeguarci ai nuovi metodi di apprendimento degli studenti?"*, i docenti stessi osservano che *"non si può e non si deve prescindere dalla constatazione che l'apprendimento è spesso caratterizzato da tempi lunghi che mal si conciliano con la generalizzata riduzione del monte orario, che indica semmai poca attenzione sia al metodo sia ai contenuti"*.

Pur riconoscendo la necessità di perseguire una politica di migliore gestione delle spese, ovvero di minimizzazione degli sprechi, i partecipanti di SPAIS 2009 paventano il pericolo che questo processo di razionalizzazione gestionale passi attraverso una mera riduzione di ore considerate "improduttive": *"Deve essere eliminato il concetto che le ore eccedenti, quelle necessarie alla mera riproposizione nozionistica dei concetti siano uno spreco, il tempo dell'apprendimento non può essere un di più se il fine è la formazione degli studenti!"*.

Ciò ripropone l'annoso problema del rapporto tra qualità e quantità nell'apprendimento.

Pare ovvio che il continuo accumulo delle conoscenze renda necessaria un'operazione di selezione dei contenuti da approfondire; ma essa deve conciliare la pur necessaria dimensione storica con l'esigenza di non trascurare le acquisizioni scientifiche dell'epoca più recente. E dunque *"seppur vero che esistono "saperi irrinunciabili", è altrettanto vero che molti argomenti sono fondamentali per lo studente non solo per avere una visione più chiara e dinamica di quanto egli sta studiando, ma sono propedeutici all'acquisizione delle conoscenze/competenze per gli anni successivi nel suo percorso scolastico/universitario. In tal senso è perciò necessario ristrutturare coerentemente tutti gli ordini di scuola per eliminare le ridondanze ed avere l'opportunità di affrontare, come fatto per la Storia, il programma di Scienze aggiornato al Novecento"*.

---

<sup>74</sup> Ministero della Pubblica Istruzione, Commissione ministeriale per la riorganizzazione degli Istituti Tecnici e Professionali, Documento finale, Roma, 3 marzo 2008 - *"La sfida che la complessità prospetta alla scienza è soprattutto quella di esplorare e sviluppare il territorio dell'interdisciplinarietà, della multidimensionalità del reale, della complementarietà dei saperi. Nel nuovo paradigma della complessità, le diverse discipline si presentano come un sistema a rete, con correlazione e nodi multipli. In questo modo vengono superate tutte le chiusure disciplinari, tutte le dicotomie che finiscono per paralizzare la ricerca e per impedire la comprensione e la trasformazione della realtà."*

Un ruolo-chiave in questa ridefinizione dei contenuti programmatici di riferimento dovrebbe essere svolto dalle associazioni disciplinari; non meno centrale è però la scelta del singolo docente *"di seguire percorsi didattici, di integrare i programmi ministeriali sviluppando in modo professionale la propria libertà di insegnamento"*. Il ruolo docente e la libertà di scelte che esso implica, seppure entro un quadro di riferimento ben definito, necessitano dunque di una rivalorizzazione. Questo ci porta ad affrontare il nodo dell'aggiornamento dei docenti e dei criteri di selezione dei medesimi. Uno dei gruppi di lavoro osserva che *"in quest'ottica diviene fondamentale anche il criterio di selezione dei docenti, la riorganizzazione delle classi di concorso e l'aggiornamento degli stessi sia sul piano metodologico che sul piano culturale: si ritiene necessario favorire e agevolare la partecipazione a convegni e corsi di formazione/aggiornamento per tutti i docenti di ogni ordine e grado"*, il che implica automaticamente l'impossibilità di una riforma a costo zero e la necessità di stanziare risorse mirate a questo compito specifico.

Alla richiesta di individuare aspetti positivi della Riforma, alcuni docenti - invero una minoranza - citano la formazione di cattedre di 18 ore, considerata *"una buona opportunità sotto l'aspetto organizzativo delle attività del docente e delle sue relazioni con gli alunni"*. Altrettanto positiva viene giudicata da alcuni *"la valorizzazione dell'esperienza didattica e formativa del percorso liceale ad indirizzo scientifico-tecnologico con il suo inserimento a pieno titolo nel nuovo ordinamento didattico"*. Si ribadisce comunque l'assoluta necessità di prevedere stanziamenti mirati di risorse, al fine di *"attrezzare questi Istituti con laboratori adeguati di cui sia garantita la piena agibilità (strumentazione e personale)"*.

Infine, un potenziale aspetto positivo della Riforma sembra essere la riorganizzazione dei saperi in un'ottica che privilegi le competenze. Sebbene il sospetto che si tratti di un'operazione puramente nominale è difficile da allontanare: *"Tale recupero rischia di essere solo nominale; è infatti improbabile che le competenze degli studenti possano essere migliorate a partire da premesse il cui motivo dominante sembra essere il risparmio di cassa"*.

In definitiva, pur riconoscendo nella Riforma la presenza di alcuni spunti interessanti, si ribadisce l'inconciliabilità di un pur auspicabile riassetto della scuola con esigenze contabili di corto respiro *"E' sostanzialmente solo a quest'ultimo fine che la riforma sarà probabilmente adeguata, il che costituisce motivo di merito esclusivamente in un'ottica ragionieristica di breve periodo. Si tratta infatti di un cattivo investimento per la società, per le possibilità formative dei futuri cittadini, dunque di un elemento di sostanziale negatività."*

Infine, tutti i docenti stigmatizzano il fatto che *"la voce degli addetti ai lavori non è stata presa in seria considerazione, che la Riforma non è scaturita da un'articolata fase di analisi e discussione"*. Alcuni si spingono fino a proporre la creazione di un organismo *ad hoc*, che possa lavorare di concerto con il Ministero della Pubblica Istruzione per la definizione di una riforma efficace *"Si ritiene necessario che le Associazioni disciplinari dei docenti di materie scientifiche e tecnologiche, unitamente alle corrispondenti Società scientifiche, costituiscano una Commissione Didattica Congiunta Nazionale, rappresentativa e paritetica, che elabori e comunichi ai decisori politici quali forme e quali contenuti devono essere presenti nell'insegnamento delle discipline scientifiche in tutti gli istituti di istruzione secondaria superiore. E' questa l'unica modalità di lavoro che può garantire una vera riforma strategica, condivisa, motivante ed efficace del nostro sistema educativo"*.

In conclusione, i temi posti in rilievo dai partecipanti di SPAIS possono essere schematizzati nei 10 punti seguenti:

1. generalizzata diminuzione delle ore dedicate alle materie scientifiche, con la sola eccezione del liceo scientifico-tecnologico
2. diminuzione delle ore di laboratorio
3. mancanza del rispetto dei tempi di apprendimento dell'alunno;
4. insoddisfacente rapporto docente/allievo a causa dell'eccessivo numero di alunni per classe (30 – 35 alunni/classe);
5. difficoltà nell'impostare il rapporto docente-alunno in forma più individualizzata, impostato sul dialogo educativo oltre che didattico;
6. difficoltà ad effettuare attività di recupero durante le ore curriculari tenuto conto del numero di alunni per classe e della riduzione oraria;

7. necessità di riorganizzare i cicli scolastici al fine di aggiornare il programma scientifico al Novecento evitando, ove possibile, le ridondanze
8. necessità di riorganizzare le classi di concorso e di revisione delle modalità di selezione dei docenti: evitare banali corsi di riconversione per risolvere il problema degli esuberanti, soprattutto su classi di concorso poco affini;
9. necessità di istituzionalizzare attività di aggiornamento e formazione permanente dei docenti di ogni ordine e grado
10. necessità di un maggior coinvolgimento delle Associazioni della docenza nella elaborazione dei progetti ministeriali

## **I modi della temporalità fra *Ratio* e *Relatio***

**Marina Alfano<sup>1</sup> e Rosolino Buccheri<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Conservatorio Statale di Musica «G. Frescobaldi» di Ferrara e «Akousmata – orizzonti dell'ascolto», Ferrara

<sup>2</sup> Istituto per le Tecnologie Didattiche, CNR di Palermo, INAF e «Akousmata – orizzonti dell'ascolto», Ferrara.

e-mail: [rosolino.buccheri@itd.cnr.it](mailto:rosolino.buccheri@itd.cnr.it)

**Abstract.** Rivisitando alcuni recenti snodi storiografici del pensiero, ci si propone di guadagnare una nuova prospettiva sul reale a partire dal confronto fra il tempo 'razionale' della fisica e il tempo 'relazionale' della percezione umana e dalla correlata dicotomia oggettività/soggettività, tenendo conto delle conquiste scientifiche dell'ultimo secolo – dalla fisica quantistica agli studi sulla complessità, alle neuroscienze –, senza escludere le dimensioni antropologica ed estetica.

L'articolo completo è disponibile in:

MARINA ALFANO, ROSOLINO BUCCHERI, «*Et cuculi cuculant, et rauca cicada fritinit*». *In dialogo fra Mito e Scienza*, Ferrara, AKOUSMATA. *orizzonti dell'ascolto*, 2012 («Il vaso di Pandora: la Speranza», 3).

Informazioni possono anche essere reperite online nel sito: [www.akousmataorizzontidellascolto.org](http://www.akousmataorizzontidellascolto.org).

## Scienziati nelle pieghe del tempo

**Gianmarco Ieluzzi**

Dipartimento di Chimica Generale e Chimica Organica, Università degli Studi di Torino

e-mail: gianmarco.ieluzzi@unito.it

Il problema del tempo è sempre stato una provocazione per il pensiero e per la condizione dell'uomo. La filosofia e la teologia si sono cimentate in svariati approcci al problema; diverse e variegate sono state le risposte proposte, mai una soluzione è stata individuata. Il tempo infatti è segno tangibile del mistero della condizione umana che sorpassa la speculazione sfuggendo alle categorie razionali; anche la scienza ovviamente ha affrontato il problema e non solo pensando il tempo come parametro quantificabile. Mi piacerebbe spostare l'accento del rapporto scienza-tempo tentando di dire qualcosa sul rapporto tra gli scienziati e il tempo, non solo perché mi occupo di storia della scienza e dunque di raccontare uomini e pratiche della scienza nella loro avventura temporale ma poiché gli scienziati sono uomini e donne che non possono sottrarsi al loro essere nel mondo, alla responsabilità civica che ciascuno è tenuto a esercitare, al loro porsi domande che dovrebbe accumunare ogni umano pensoso. È evidente dunque che c'è storia e storie, ufficiali e personali, conosciute o consegnate a ricordi obliati. Quello che unisce le prospettive tuttavia è la narrazione, attraverso la quale l'uomo e la donna possono interpretare se stessi e comprendersi. Il racconto è sia di finzione, sia di realtà; la narrazione tuttavia è il loro comune denominatore ed è la chiave di volta che fa nascere provocanti e sempre nuove prospettive alla speculazione umana. Non a caso da qualche anno il rapporto filosofia e romanzo si dimostra fecondo e rivitalizzante. Il racconto, ci si chiede in filosofia, è l'unica via d'uscita per una filosofia che si è trovata in acque basse? Molto interessante è l'opera di Sergio Givone (*Il bibliotecario di Leibniz*, Torino: Einaudi, 2006). Il tempo, quello umano, e non solo il parametro fisico, va indagato anche dagli scienziati perché risulta cifra interpretativa della loro vita e della loro azione responsabile verso il mondo.

Si è parlato di molti tempi, del tempo dell'anima e del tempo del cosmo, del tempo interiore e del tempo dell'evoluzione, di tempo della scienza e degli scienziati, come se il tempo di volta in volta potesse essere imbrigliato o categorizzato una volta per tutte. Ma esso sempre sfugge, proprio come le incisioni su alcune meridiane ricordano: *sic fugit*.

Se per il tempo non è dicibile una parola definitiva, si possono tuttavia tracciare differenti percorsi di vicende di uomini e donne di scienza, del loro ragionare e sperimentare riguardo i problemi che la loro ricerca tenta di affrontare; un approccio storico risulta utile anche in campo didattico e museale e recentemente lo si è riscoperto con risultati sorprendenti. Il tempo, dunque: interpella lo scienziato, lo limita nella sua propria azione, lo sprona a lasciare tracce che sfidano la memoria passeggera. Il tempo rimane comunque un enigma, è una ruminazione senza conclusione (Oreste Aime, *Senso e significato*, Assisi: Cittadella edizioni, 2007) poiché il ragionare intorno ad esso conduce a strade senza uscite, ad aporie che l'intelletto non risolve. E dunque? Desistere? La replica appartiene all'attività letteraria, non perché risolve le aporie ma le trasfigura, le colora di nuovo tratto poiché illumina non solo il tentativo di risposta ma anche la domanda stessa, libera dal non senso la questione e la eleva a livelli di nuovi significati: non solo l'attività razionale è chiamata ad affrontare la posta in gioco, ma anche l'aspetto relazionale e la pratica di vita debbono cimentarsi, come P. Ricoeur in più opere sostiene.

Ci sono stati grandi pensatori che hanno lasciato il segno sulla vita culturale e sulla condotta pratica della loro epoca e pure dei tempi a seguire. Agostino di Ippona riconosce l'aporia del tempo come impossibilità di misurarlo, poiché attiene al rapporto tra essere e non essere incastonando il tempo e la sua questione nel campo dell'ontologia. Come è possibile misurare ciò che non esiste più o non ancora è venuto all'essere?

Aristotele si occupa del tempo all'interno della sua indagine sull'intrigo poiché intrigo è racconto e arriva ad assegnare la precedenza all'azione rispetto al soggetto: è la composizione dell'azione umana che determina la qualità etica del personaggio.

Kant ed Husserl in qualche misura si rinviando l'un l'altro perché sono approcci che non sono sufficienti: Kant è convinto che il tempo oggettivo, determinante per la costruzione del mondo, è invisibile perché presupposto; Husserl tenta di determinarlo in modo intuitivo poiché è tempo in quanto appare come tale.

Con Heidegger e altri viene posto l'accento invece su tempo e voce della coscienza, su tempo e il nostro essere gettati nel mondo, su tempo e nascita e responsabilità. P. Ricoeur arriva a dire che l'uomo è la Gioia del sì nella tristezza del finito (*Finitudine e colpa*, pp. 156, 235).

Che cosa poter allora dire del tempo e dello scienziato o scienziata in quanto uomo o donna che stanno in questa storia che il tempo determina? Debitori sempre di Ricoeur, possiamo riconoscere che il tempo deve essere inteso come tempo umano. L'uomo si può 'appropriare' del tempo se lo delinea secondo stilemi narrativi, se è mezzo per raccontare la sua storia. Il tempo non si lascia afferrare né dire con il discorso diretto di tentativi fenomenologici; può però essere detto in modo indiretto secondo le modalità della narrazione. Certo, si incorre in un circolo vizioso seguendo questo procedere: l'uomo esperisce il tempo raccontando l'accaduto però gli avvenimenti sono fatti di materia narrativa. Dunque prigionieri di un circolo vizioso? No, se si cambia prospettiva e il circolo diventa una spirale che si snoda su livelli superiori proprio quando sembra che il cerchio si stia richiudendo. Il racconto libera tramite la parola ciò che sarebbe diversamente indicibile, inesperto, libera la funzione referenziale del racconto di finzione e di realtà poiché acconsente alla trasgressione di significati che riconduce il circolo vizioso in circolo virtuoso. Ci si può chiedere a questo punto: a che giova un simile approccio? Che importa a uno scienziato parlare e ragionare su questo? Sugeriamo, per usare sempre la terminologia di Ricoeur, che il tempo, in quanto umano, diventa abitabile, anche per lo scienziato che è interpellato a uscire dalla propria nicchia di ricerca, dalla incomprendibilità e incomunicabilità che spesso segna il rapporto scienza-società. Volere abitare il tempo è volontà di determinare la propria identità attraverso il rischio etico che la ricerca scientifica e la didattica disciplinare esige; è voler affermare che l'azione di uomini e donne di scienza porta un risvolto etico che interPELLa la responsabilità, proprio in questo preciso momento storico, chiedendo a chi vive di scienza posizione e coraggio ben consapevoli che si ipotizza la vita delle generazioni future. Si tratta a ben vedere di prendere posizione e cioè di scegliere di riconoscere il senso del mondo e del nostro esserci senza voler dominare il mondo stesso oppure di dominarlo e asservirlo. È campo importante di battaglia in cui sperimentare il pensiero e le pratiche scientifiche e tentare di dire il limite, di de-finirli.

La scienza così deve pensare il tempo, deve continuamente cimentarsi con esso per non essere schiavi di Kronos, per non vivere passando di istante in istante come segmenti affiancati. Lo scienziato e la scienziata devono invece abitare il tempo, perché hanno una responsabilità da vivere e testimoniare attraverso forme diverse di cittadinanza.

### **Bibliografia**

- P. Ricoeur, *Temps et récit*, I, Paris, Editions du Seuil, tom. I, II, III, 1983-85. [trad. it. *Tempo e Racconto*, Jaca Book, Milano 1986-88].
- P. Ricoeur, *Finitudine e Colpa*,
- S. Givone, *Il bibliotecario di Leibniz. Filosofia e romanzo*, Torino, Einaudi, 2005.
- Jacques Derrida, *Donare il tempo. La moneta falsa*, Milano: Raffaello Cortina Editore, 1996.
- Gilles Deleuze, *La piega. Leibniz e il Barocco*, Torino: Einaudi, 1990.
- O. Aime, *Senso ed essere. La filosofia riflessiva di Paul Ricoeur*, Assisi: Cittadella edizioni

## Una storia per immagini

**Gianmarco Ieluzzi**

Dipartimento di Chimica Generale e Chimica Organica, Università degli Studi di Torino

e-mail: gianmarco.ieluzzi@unito.it

Il presente può spesso sembrare *modernità piatta* se rimane soggetto alla tirannide di realtà che si presentano come uniche e totalizzanti o di messianismi nuovi o rinnovati; e la scienza stessa può occorrere in questa falsificazione. Può anch'essa rendere *Mnemosyne* in catene, se non aiuta l'uomo a domandare, a farsi domanda e guardare al passato con verace spirito critico. « La storia recente dell'uomo europeo si riassume in questa incapacità di cadere nel tempo, e riconoscerlo. Di lavorare sulla memoria, ma anche di oltrepassarla per estenderne i confini e costruire su di essa ».<sup>1</sup> La scienza non può alienare da sé lo sguardo sul passato, o pensare di rinchiudere in piccole nicchie lo studio delle storie disciplinari: pena passare da un istante all'altro della ricerca scientifica come collezionando esperienze ma non creando una visione critica, non trasformando la prassi della ricerca in occasione di cittadinanza e responsabilità. La storia disciplinare è infatti occasione di esercizio della memoria, di quella memoria critica<sup>2</sup> che si rende utile per il presente, che porta dinanzi al nostro pensiero il passato per elaborare e costruire. È fare la nostra identità, è dire chi siamo e pensare a dove andare. Ciò che ci arriva dal passato della nostra scienza non è polvere museale, ma ci aiuta a ricostruire il rapporti tra la scienza e la società, tra la pratica della scienza e la prassi della vita umana. Lo si può fare custodendo e interpretando i testi del passato, testi scritti e testi visivi. Anche mediante l'uso di immagini e icone è possibile studiare i contesti di produzione scientifica e tecnologica del passato e domandare al presente che cosa ne è del nostro fare scienza, del nostro essere scienziati.

Lo studio dell'uso delle immagini non è un tema di ricerca molto sviluppato all'interno della storiografia della scienza e della tecnologia, a differenza di altre discipline (come la storia dell'arte, la cinematografia, la psicologia) che vi hanno dedicato energie e tempo opportuno. Sulla scia di queste altre discipline, dobbiamo riconoscere alle immagini un proprio statuto che gli studi di storici d'arte e di scienziati del linguaggio hanno ben definito. L'assunto di base di tali indagini può essere così anche il nostro: le immagini sono come un testo da dover leggere, da poter leggere. Si può quindi instaurare un parallelismo tra parola e immagine, le quali possono essere investigate ricorrendo ad adeguate indagini linguistiche. Di immagini l'uomo si è sempre servito in sostituzione della parola, come testimonia la celebre affermazione di Alberto Magno<sup>3</sup> per il quale i grandi e meravigliosi dipinti delle chiese cristiane erano la «Bibbia dei poveri». Un uso delle immagini che da sempre è stato tuttavia ambiguo e foriero di timori, come il fenomeno dell'iconoclastia ha dolorosamente testimoniato e continua a testimoniare nelle sue varianti moderne. Un timore che già Platone intuì nella sua trattazione sulla retorica e che correlò alla forza insita nelle immagini ossia alla loro persuasione.<sup>4</sup> Come osserva Paul Ricœur [*La métaphore vive*, Paris: Editions du Seuil, 1975; tr. it., *La metafora viva*, Milano: Edi-

<sup>1</sup> Barbara Spinelli, *Il sonno della memoria*, Milano: Mondadori, 2001, p. 6.

<sup>2</sup> Friedrich Nietzsche, *Genealogia della morale*, 1887.

<sup>3</sup> Alberto Magno,

<sup>4</sup> Platone afferma che « la retorica è operatrice (signora) di persuasione – peithous demiourgos – » (Gorgia, 453a). P. Ricœur annota come tuttavia già in Corace, allievo di Empedocle, sia possibile reperire in germe questa concezione e così anche in Tisia di Siracusa. Ancora Ricœur: Diogene Laerzio (VIII, 57) afferma: «Aristotele nel *Sofista* riferisce che Empedocle fu il primo a scoprire (*eurein*) la retorica», citando a sua volta da Chaignet, *La Rhétorique et son histoire*, E. Bouillon et E. Vieweg, 1888, p. 3 nota 1.

toriale Jaca Book, 1976, p. 10], la retorica nasce in relazione all'eloquenza pubblica, diventa arma per influenzare il popolo quando diventa elemento decisivo per la decisione. Collocandosi proprio su questa scia Nietzsche [*Il libro del filosofo*, Padova: Savelli, 1978] ha sentenziato: «l'eloquenza è repubblicana». Queste considerazioni, che attengo in origine alle scienze del linguaggio, possono essere estese anche all'indagine sull'iconografia poiché la retorica è una technè che rende un testo (visivo o verbale) consapevole di se stesso. Ma a questo punto, Ricœur affronta una questione che possiamo estendere anche all'iconografia: è sempre possibile che l'arte del «ben dire» si emancipi dalla preoccupazione di «dir vero»<sup>5</sup>. Questo è un punto cruciale, perché è il nesso che ci permette di agganciarci ad un'affermazione cara alle scienze del linguaggio, ossia che linguaggio è strettamente correlato con la società. Dunque il linguaggio è pratica sociale. Dalla sociolinguistica alla sociosemiotica, le scienze del linguaggio contribuiscono in modo determinante a correlare linguaggio e società, sebbene poi ciascuna specializzazione orienti la propria ricerca in una complessa e multiforme materia nella quale ciascuna disciplina ritaglia la sua prospettiva e stabilisce i propri percorsi. Il termine materia è polisemantico: sta sia ad indicare un campo di studi, sia ad esplicitare il «fondamento materialistico del linguaggio» [P. Calafato, *Sociosemiotica*, Bari: Edizione B.A. Graphis, 1997; *Metafora e Immagine*, Bari: Edizione B.A. Graphis, 2005]. Ovviamente parlare di materia e di fondamento materialistico ci espone al rischio di un pernicioso dualismo, quello a cui René Descartes ha acconsentito con la distinzione tra *rex extensa* e *rex cogitans*; ma permane anche un altro rischio, quello cioè di rimanere invischiati in una visione *fisicista* della materia. Ciò stante, quella di materia è una nozione cardine per le scienze del linguaggio. Patrizia Calafato ricorda a questo proposito una metafora usata da Louis Hjelmslev [*Omkring sprogteoriens grundlaeggelse*, trad. ing. di Whitfield F. J., *Prolegomena to a Theory of Language*, Madison: The University of Wisconsin Press, 1961, trad. it. di Lepschy G. C., *I fondamenti della teoria del linguaggio*, Torino: Einaudi, 1968]. In Amleto si trova un dialogo tra Amleto e Polonio in cui Amleto, fingendosi pazzo, chiede a Polonio se la forma delle nuvole in cielo ricordi anche ad esso la forma di vari animali o oggetti. «La nuvola del principe di Danimarca indica così metaforicamente una materia amorfa che, a seconda di chi e di come la si guardi, assume forma e sensi diversi. Il gioco del fantasticare di Amleto può paragonarsi a ciò che chiamiamo linguaggio, vale a dire quella attività specificamente umana nella quale l'individuo modella in mondo, se stesso, lo spazio ed il tempo generando sistemi di segni e regole rappresentative in base alle quali diviene possibile riprodurre questa stessa attività»<sup>6</sup>. La nuvola è dunque paragonabile alla materia, qualcosa che è al tempo stesso «la condizione di possibilità del linguaggio e la sua realizzazione»<sup>7</sup>. Per linguaggio Calafato intende quel congegno modellizzante del mondo tipico esclusivamente degli umani (come le ricerche di Thomas Sebeok e Augusto Ponzio hanno dimostrato). Certo ogni essere animato possiede «una qualche modalità di organizzazione del suo mondo, del suo ambiente circostante, di quella che Sebeok chiama *Umwelt*. Una di queste modalità può essere ad esempio il territorio per la maggior parte dei mammiferi. Ma il linguaggio struttura soltanto la *Umwelt* umana, quel mondo, i cui “limiti” sono effettivamente, come diceva Wittgenstein, i limiti del linguaggio, poiché è il linguaggio che lo simula, lo rappresenta, lo organizza»<sup>8</sup>. Le differenti società umane si distinguono dalle forme di aggregazione animale in quanto, tramite il linguaggio, gli umani sono in grado di oggettivare il contesto sociale, sono cioè in grado di riprodurre e progettare non solo le condizioni naturali di vita ma anche le loro relazioni reciproche. Il linguaggio dunque è società nel senso che la prima materia che il linguaggio trasforma e organizza in segni è la relazione con altri, è il contesto sociale. Il linguaggio, a differenza del parlare, è dunque sia verbale che non verbale poiché in tutte le manifestazioni sussistono i tre elementi della modellizzazione tipica del linguaggio:

1. la lavorazione di una materia informe sulla base di
2. una valorizzazione di tratti salienti e
3. in virtù di un progetto.

Le immagini a pieno titolo sono linguaggio e comunicano in base alla forza contenuta nei segni che le formano e le informano. Studiare questi sistemi di segni nel loro momento di produzione, scambio e consu-

---

<sup>5</sup> Ricœur P., *op. cit.*, p. 11.

<sup>6</sup> Calafato, *op. cit.*, p. 11.

<sup>7</sup> *Ibidem*.

<sup>8</sup> Calafato P., *op. cit.*, p. 8.

mo, all'interno di un contesto sociale che è anche il contesto di senso, è compito della sociosemiotica. Tale disciplina è tutt'altro che materia ben definita, poiché arriva da tre percorsi non sempre sovrapponibili: la sociosemiotica discorsiva, la semiotica sociale e la sociosemiotica critica. Per non addentrarci in queste differenze, intendo riferirmi alla definizione che Gunther Kress e Theo van Leeuwen usano nella loro opera: «la semiotica sociale (*social semiotics*) è un tentativo di descrivere e comprendere come le persone producano e comunichino significato in specifici contesti (*settings*) sociali, siano essi 'micro' contesti come la famiglia o contesti in cui la produzione di segni è ben istituzionalizzata e introiettata da abitudini, convenzioni e regole» [G. Kress, T. van Leeuwen, *Reading Images: The Grammar of Visual Design*, London: Routledge, 1996].

Dunque ogni testo segnico possiede un carattere sociale, che ha da essere tenuto in conto per analizzare correttamente il meta-messaggio consegnato dal testo visivo. La iconografia scientifica non rimane dunque esente da questa prospettiva d'indagine; anzi la vasta gamma di tipologie di testi visive che possiamo considerare come iconografia scientifica (illustrazioni, diagrammi, schemi, immagini, fotografie, grafici, ...) presenta una marcata connotazione del carattere sociale del segno veicolato. Restringere l'attenzione su immagini celebri della tradizione iconografica e su alcune illustrazioni tecnico-scientifiche per tentare di mostrare come sia possibile decodificarne il messaggio e contemporaneamente cogliere il carattere sociale. Soprattutto per questa seconda categoria di immagini, il punto fondamentale da tenere sempre in mente è che non ci riferiamo a semplici illustrazioni, ma a immagini che sono di tipo tecnico-scientifico e dunque sono innervate in un contesto scientifico profondamente correlato alla selezione iconografica, in una struttura di rimandi vicendevoli. Inoltre sono immagini non naturali, escogitate per comunicare qualcosa e strutturate per convenzionalità. Mancanza di naturalità e convenzionalità sono strettamente giunti alla selettività dei tratti tipici che connotano l'immagine e su cui si punta per convogliare il messaggio comunicante.

L'analisi verrà scandita su due momenti, uno prettamente iconologico e l'altro strutturale. Per quanto concerne il primo momento, gli studi di Erwin Panofsky sono un confronto obbligato. Certamente l'istanza di Panofsky non era semiotica, ma critico-artistica. Tuttavia i suoi risultati sono utili per la nostra indagine, anzi si può affermare che c'è continuità tra i suoi studi e quelli semiotici. La terminologia usata da Panofsky non è quella dei teorici del linguaggio, e ciò non costituisce un ostacolo alla reciproca comprensione. I semiologi chiamano *espressione* ciò che Panofsky è la *forma*, mentre l'*analisi formale* è confrontabile con lo studio del linguaggio plastico. *Iconologia* è «quel ramo della storia dell'arte che si occupa del soggetto o significato delle opere d'arte contrapposto a quelli che sono i loro valori formali» [Panofsky E., *Studies in Iconology: Humanistic Themes in the Art of the Renaissance*, New York: Oxford University Press, 1939, trad. it. *Studi di iconologia. I temi umanistici nell'arte del Rinascimento*, Torino: 1975]. L'articolazione di questa analisi avviene su tre livelli. Innanzitutto c'è un *livello preiconografico*, dove si riconosce il *soggetto primario* o *naturale*. In questo livello si riconosce il motivo artistico che è rappresentato attraverso l'identificazione di pure forme, ad esempio una mano. Subito dopo c'è l'*analisi iconografica*, che ci permette, per esempio, di riconoscere la mano che tende verso un pane come un riferimento all'ultima cena in cui quella mano è simbolo che rimanda ad altro (vedi fig. 1 sinistra), oppure la mano che scrive viene riconosciuta come l'atto operoso di Lavoisier, ritratto da Jacques-Louis David, che metaforicamente ci rimanda alla sua opera di fondazione della chimica. «I motivi riconosciuti per questa via come portatori di un *significato secondario* o *convenzionale* possono essere chiamati *immagini*»<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Panofsky, *op. cit.*



**Figura 1:** riconoscimento del soggetto primario all'interno del significato convenzionale. (A sinistra Leonardo da Vinci, *Ultima cena*, 1494-1497 tempera e olio su gesso, 460 × 880 cm Milano, [Chiesa di Santa Maria delle Grazie](#) e a destra Jacques-Louis David, *Ritratto di Monsieur Lavoisier e sua moglie*, 1788, [Metropolitan Museum of Art, New York](#))

Infine si giunge all'ultimo livello, quello *iconologico*, in cui viene indagato il *significato intrinseco* o *contenuto*. «Lo si apprende individuando quei principi di fondo che rivelano l'atteggiamento fondamentale di una nazione, un periodo, una classe, una concezione religiosa o filosofica, qualificato da una personalità e condensato in un'opera»<sup>10</sup>.

Partendo da questo retroterra, l'analisi strutturale di Kress e van Leeuwen mira a leggere le immagini re-landole al messaggio sociale contenuto. Un primo punto importante da analizzare è l'interazione visuale, cioè il rapporto tra osservatore e soggetti ritratti. Possono esserci due tipi di interazioni visuali: la relazione tra persone, posti e oggetti rappresentati in una figura e la relazione che si instaura tra chi produce e chi osserva l'immagine. «Per dirla con altre parole, la comunicazione visiva coinvolge due classi di persone: i "partecipanti rappresentati" (*represented participants*) ossia persone, cose e luoghi riprodotti e i "partecipanti interattivi" (*interactive participants*) dunque le persone che comunicano mediante le immagini, ossia chi le immagini le fa e chi le osserva. Le relazioni che si possono instaurare sono di tre tipi: relazione tra i partecipanti rappresentati, relazione tra i partecipanti interattivi e relazione tra le due classi.

Essendo i partecipanti interattivi le persone reali che si accostano in modi e situazioni differenti alle immagini, sono proprio costoro che danno senso alle medesime all'interno di un contesto sociale, il quale regola ciò che l'immagine dice, come lo dice e infine come dovrebbe essere interpretato. Dunque, proprio allo stesso modo di come avviene per la parola scritta, sono fisicamente rilevanti colui che codifica l'immagine (il produttore-disegnatore) e colui che la decodifica (il lettore); e non solo i partecipanti rappresentati. Il contesto di produzione dell'immagine ed il contesto di ricezione, per quanto possano essere disgiunti, hanno in comune due elementi: l'immagine stessa cui ineriscono e il patrimonio conoscitivo che veicola l'articolazione e la comprensione dell'immagine, ossia il patrimonio conoscitivo come vettore di interazioni e relazioni sociali al cui interno l'immagine è decodificata» [Ieluzzi G., Turco F., Cerruti L., «Scienza, tecnologia e comunicazione iconografica. Il caso dell'*Enciclopedia Chimica* di Francesco Selmi» in *Le Culture della Tecnica*, 18, 2007]. Due soli tipi di interazione tra soggetti ritratti e i fruitori sono dati: o si stabilisce una forma visuale di coinvolgimento diretto, con la possibilità che l'immagine solleciti l'osservatore e lo interpellati (e siano dunque *immagine di domanda*) o non c'è interazione e l'immagine si offre solo come infor-

<sup>10</sup> Panofsky, op. cit.

mazione a chi la osservi (*immagine di offerta*). Delle due possibilità, una sola. E va sottolineato come la storia dell'arte ci offra un ben preciso primo esempio di interazione diretta tra soggetto rappresentato e osservatore, se si escudono alcuni bassorilievi medievali con soggetto la Passione di Gesù Cristo: *l'Uomo in un turbante rosso*.



**Figura 2:** Jan van Eyck, *Uomo in un turbante rosso*, 1433 (datazione presunta), National Gallery, Londra.

Panofsky chiosa a tale riguardo, proprio commentando l'acuto sguardo dell'uomo ritratto: «We feel observed and scrutinized by a wakeful intelligence».

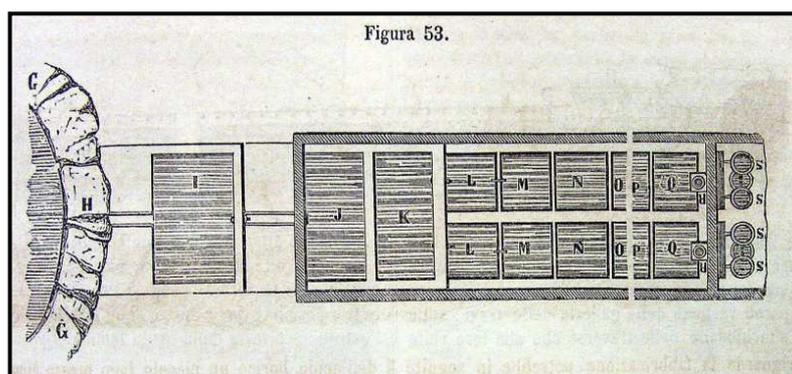
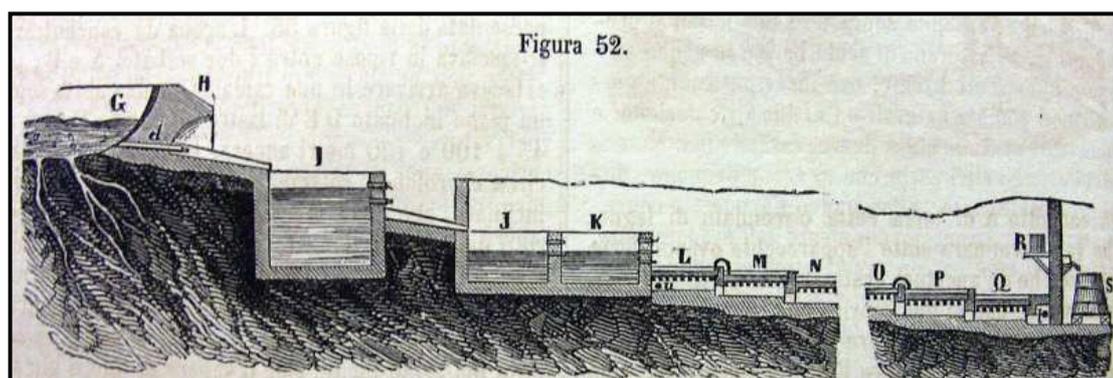
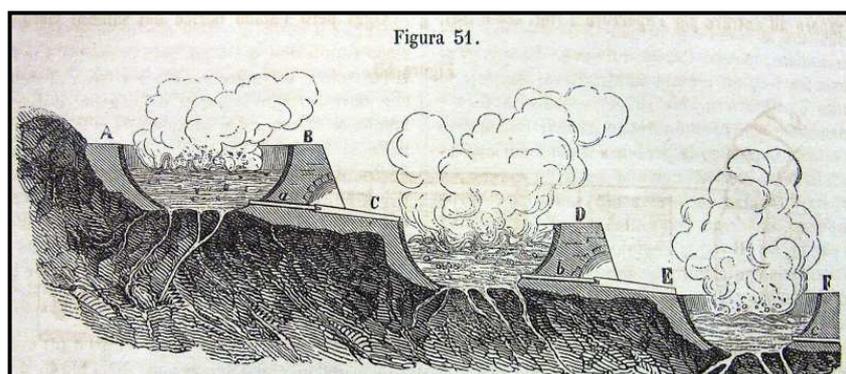
Qualunque immagine ci troviamo di fronte possiede una narrazione. Le modalità di questa narrazione sono molteplici e partono dal rapporto che si instaura tra soggetto rappresentato e osservatore. Oppure da un rapporto che non si instaura. Nel nostro caso interessano le immagini in cui tale rapporto non esiste, e tale negazione è il punto di partenza. La prima modalità narrativa che sottolineo è il punto di vista da qui sono riprodotti i soggetti. Per approfondire questo punto, possiamo analizzare immagini con mappe e diagrammi: sono queste riprodotte in un contesto che offre quel tipo di conoscenza che la cultura, almeno occidentale, ritiene oggettiva, astratta, scevra da ogni implicazione emotiva. Queste figure non recano con sé un'azione di domanda quanto piuttosto si polarizzano su un'offerta di informazione che altrimenti non si darebbe.

Quelle che qui ho scelto sono immagini tecniche, accomunate dall'intenzione di porgere informazioni particolareggiate al lettore che la rappresentazione naturalistica o realistica non consentirebbe. Differiscono, tuttavia, dall'angolazione sotto cui sono ritratte. La visuale frontale trasmette al lettore l'informazione su *come* funziona il processo, *com'è* che si sviluppa nello spazio tempo che gli assi cartesiani orientano.

La sezione dell'oggetto ("*X-ray view*") è una seconda possibilità di visualizzare il soggetto. Questo caso è spesso accostato all'idea di oggettività e questa deriva dal fatto che non ci si ferma all'apparenza, ma si va oltre la superficie delle cose, giù in profondità, come a farne una radiografia. Si ottiene in tale modo l'informazione della struttura dell'oggetto nel suo contesto esterno.

La vista dall'alto, d'altro canto, è la vista più potente, quella ancora più oggettiva, la vista teorica, che permette di contemplare da un punto distante l'oggetto (è il punto di vista di dio, *god-like point of view*).

La combinazione presente nell'immagine dei lagoni (fig. 3) cerca di raggruppare le informazioni complementari che ciascuna visione offre per dare un'offerta esaustiva.



**Figura 3:** Francesco Selmi, *Enciclopedia di Chimica*, 1868-1878.  
 Estrazione di acido borico in Toscana, vol. III, fig. 51,52,53, pp. 300-301.

Una seconda modalità narrativa è la distanza con cui si riprende il soggetto. Rimandando per i dettagli all'opera di Edward Hall [*The hidden dimension*, New York: Doubleday, 1966], sottolineo che è questa modalità permette intuitivamente all'osservatore di acquisire informazioni sul rapporto personale, sociale o pubblico che si intende veicolare.

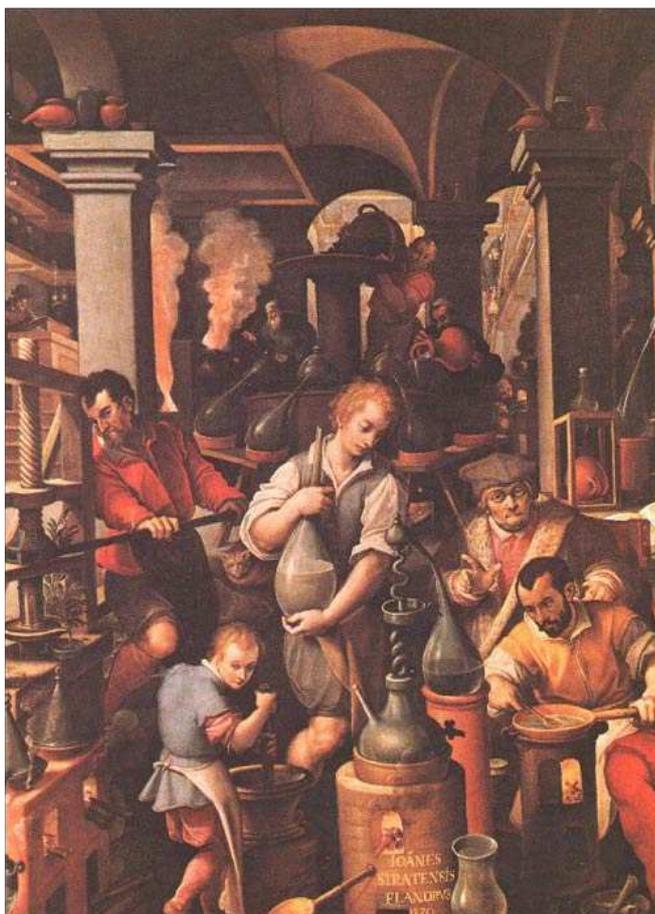
La terza modalità è anche la più densa perché è formata da tre componenti: il *valore interno* (la posizione dei soggetti e/o oggetti nel testo visuale:destra/sinistra, su/giù,...) che fornisce informazione rispetto alla soglia zero di partenza; la *saliienza*, ossia la presenza di accenti tonici risultanti dalla disposizione del tutto; il *framing*, ossia l'ossatura che viene strutturata dalla presenza di connettori. Kress e van Leeuwen propongono, per esemplificare tali concetti, un caso classico (vedi fig. 4).



**Figura 4.** A sinistra: Lorenzo Maitani, *La Creazione di Adamo*, XIV sec., Facciata del Duomo di Orvieto.  
A destra: Michelangelo, *La Creazione di Adamo*, 1510, Cappella Sistina, corredo dei Musei Vaticani, Roma.

Il cambio di collocazione di Dio Creatore e del primo uomo rispecchia il cambio culturale legato alla tematica della divinità e del rapporto con l'uomo nei due periodi di produzione delle opere: il Dio Creatore, alfa e omega del tempo e dello spazio, unica certezza non poteva che essere collocato a sinistra, nel rilievo medievale, poiché la sinistra occupa la zona del dato di fatto, certo e indiscutibile. Nel capolavoro michelangiolesco, invece, viene collocato a destra: l'uomo è il centro del mondo; Dio è, per i tempi che Michelangelo si trovò a vivere, un'ipotesi da dimostrare.

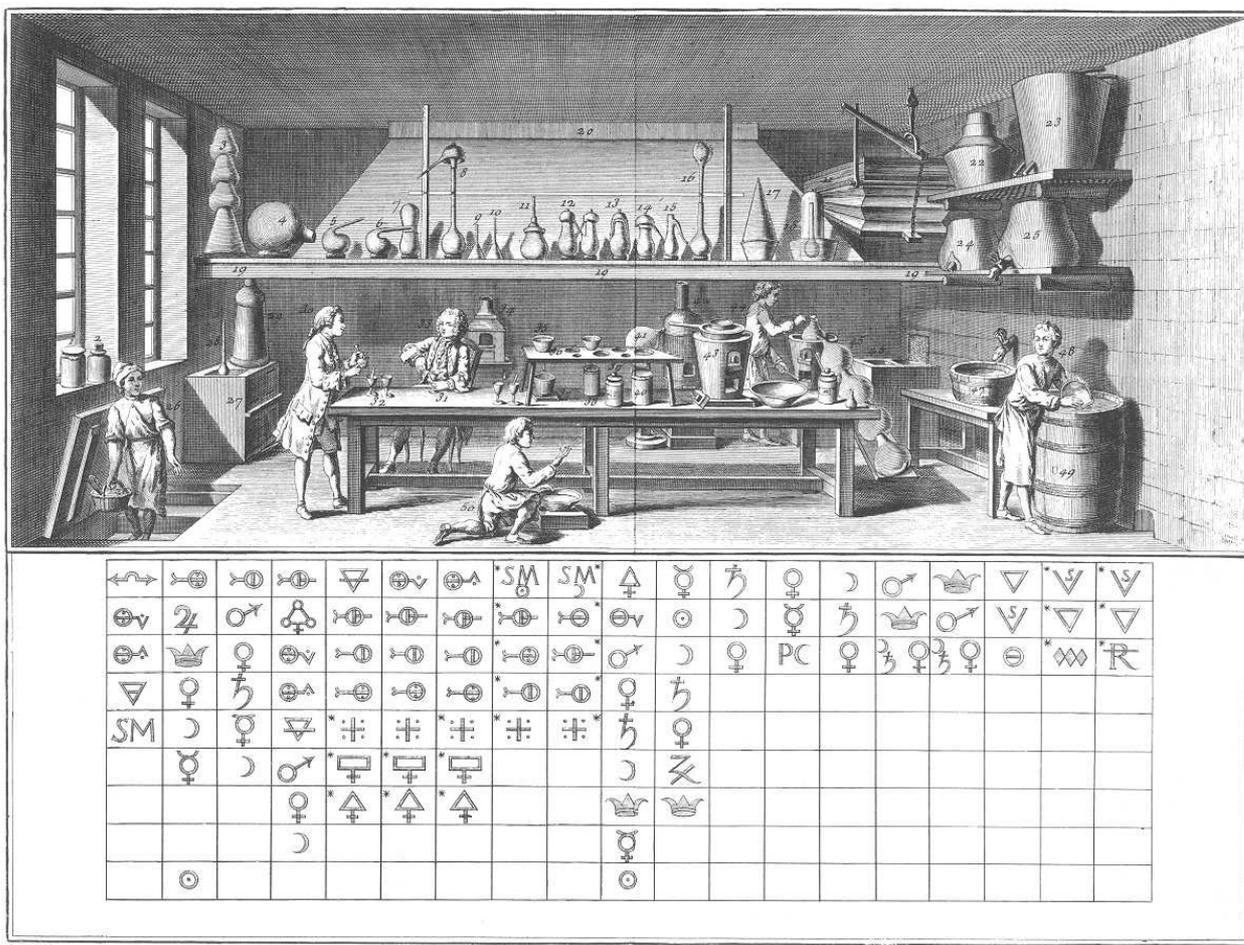
Partendo da queste tre modalità narrative, analizziamo alcuni soggetti dell'iconografia tradizionale scientifica.



**Figura 5:** Jan van der Straet detto Giovanni Stradano, *Laboratorio di Alchimia*, 1570, Palazzo Vecchio, Firenze.

Il famoso quadro di Stradano, conservato nello Studiolo di Palazzo Vecchio, rappresenta una scena concentrata su una sola navata, quella centrale, dell'intero spazio a disposizione. Subito percepiamo un'alta densità di figure: sono infatti dieci i personaggi raffigurati e accostati strettamente. La distanza da cui la scena è presa conferisce una certa familiarità poiché avvolge l'osservatore, quasi da farlo diventare uno tra i personaggi accanto al bagnomaria centrale: siamo in uno spazio da cui possiamo osservare una scena in modo distaccato, ma non siamo messi a un livello di estraneità formale. Non si cerca il coinvolgimento emotivo, questo è chiaro, ma il dipinto crea un relazione di familiarità in quanto non esiste ancora il livello che richiama alla formalità del rapporto. L'occasione e la destinazione dell'opera sono dunque presenti nella scelta delle caratteristiche strutturali delle due opere. Ci sono ovviamente figure umane: sono figure di studiosi o di inservienti che animano il laboratorio, che ce lo consegnano nella immediatezza del suo utilizzo, nella sua vita vera e propria; dunque non siamo in presenza di un laboratorio, seppur alchemico, ordinato e ben sistemato e proprio per questo *falso*, ma in un luogo presentato come un ambiente dell'attività umana colto nelle sue proprie dinamiche. Questi personaggi raffigurati (*represented participants*) sono all'opera e dunque rendono viva la scena e il laboratorio. In questo dipinto lo studioso guarda davanti a sé, con uno sguardo che sembra voler certamente indirizzare e controllare la pratica a cui sovrintende l'uomo con la barba sulla destra del quadro (Francesco Sforza); questo sguardo non si esaurisce però all'interno del quadro, perché guardando davanti a sé guarda dritto negli occhi lo spettatore. Dunque uno sguardo di controllo, di supervisione, uno sguardo diretto allo spettatore; in più uno sguardo attraverso gli occhiali. Gli occhiali, si sa, simboleggiano l'acutezza dello studioso, l'intelligenza propria di chi sa *inter legere*, legare insieme concetti e informazioni, di chi sa leggere dentro le cose. Perché questa differenza? La risposta è presto chiara collegando l'intenzione dell'artista e la fruizione dell'opera. Inserito nello Studiolo, il quadro doveva essere per Francesco I uno sprone a farsi acuto osservatore e studioso attento. Noi, che non siamo certamente i destinatari originari, possiamo cogliere tale relazione, di cui abbiamo appena detto e che lega l'autore e il destinatario. Ci sostituiamo

ovviamente al destinatario dell'epoca e pur tuttavia possiamo recepire il messaggio decodificandolo dall'insieme dell'opera. In tal modo il destinatario si trova proiettato in un'ottica differente da quella che normalmente lega l'immagine al destinatario. In genere l'osservatore non è oggetto dell'azione della figura, ossia "di domanda" (*demanding*) secondo la definizione usata da Kress e van Leeuwen; è invece soggetto che richiede un'azione "di offerta" (*offer*). Nel caso di questo quadro invece è chi osserva che diventa oggetto dell'informazione veicolata.



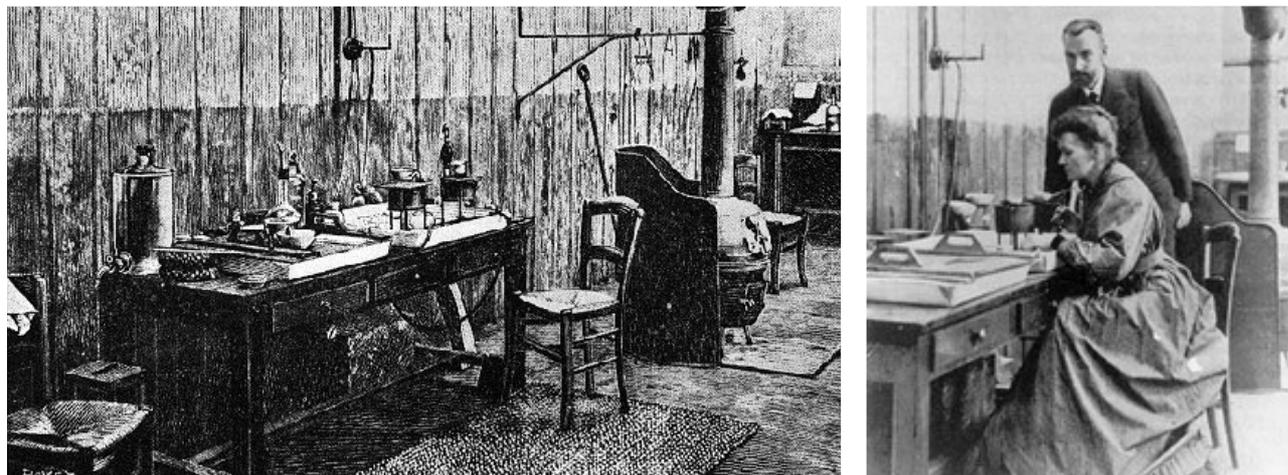
*Laboratoire et table des Raports*

**Figura 6:** Laboratoire et table des Raports, da *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences des arts et des métiers*, Louis-Jacques Goussier, 1763

L'ambiente sperimentale è stato un luogo che è cambiato tantissimo nel corso dei secoli, ma è sempre stato considerato come una specie di tempio della scienza. Con il passare dei secoli inoltre ne è stato accentuato sempre più anche il carattere pubblico. L'immagine riprodotta, tratta dal volume secondo delle tavole illustrate dell'*Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences des arts et des métiers* di Diderot e D'Alembert, evidenzia alcune caratteristiche che vale la pena sottolineare. Prima di tutto va osservato il piano da cui si osserva la scena: è una distanza pubblica, indice del contesto culturale illuministico dell'epoca e, in modo più particolare per il nostro discorso, conferisce un carattere sociale al luogo. I due scienziati sulla sinistra discutono tra loro e gli inservienti si occupano delle operazioni da svolgere. La scienza inizia ad essere un riferimento oggettivante per qualunque metodologia d'indagine; infatti a sinistra vengono collocati i due scienziati, proprio nella zona deputata a riportare il dato certo. La grande cappa con i suoi contorni trapezoidali, la prospettiva delle finestre e della stanza, le ombre e la disposizione delle figure che orientano il loro proprio

sguardo fanno convergere la nostra attenzione al centro della figura. Il picco di salienza infatti viene posto nel centro: i soggetti veri della figura sono gli strumenti e il loro ambiente, l'uso che se ne fa e l'utilità che può aversene. Sono oggetti in bella mostra, curati nei dettagli e facilmente "afferrabili". Il laboratorio non risulta più un antro magico, per pochi eletti; è piuttosto un luogo di formazione di un sapere che tenta di ordinare i dati empirici di cui ciascuno fa esperienza, luogo di discussione e di conferma delle ipotesi.

Una terza concezione del laboratorio chimico che propongo è il laboratorio di Madame Curie, luogo eroico della scienza.



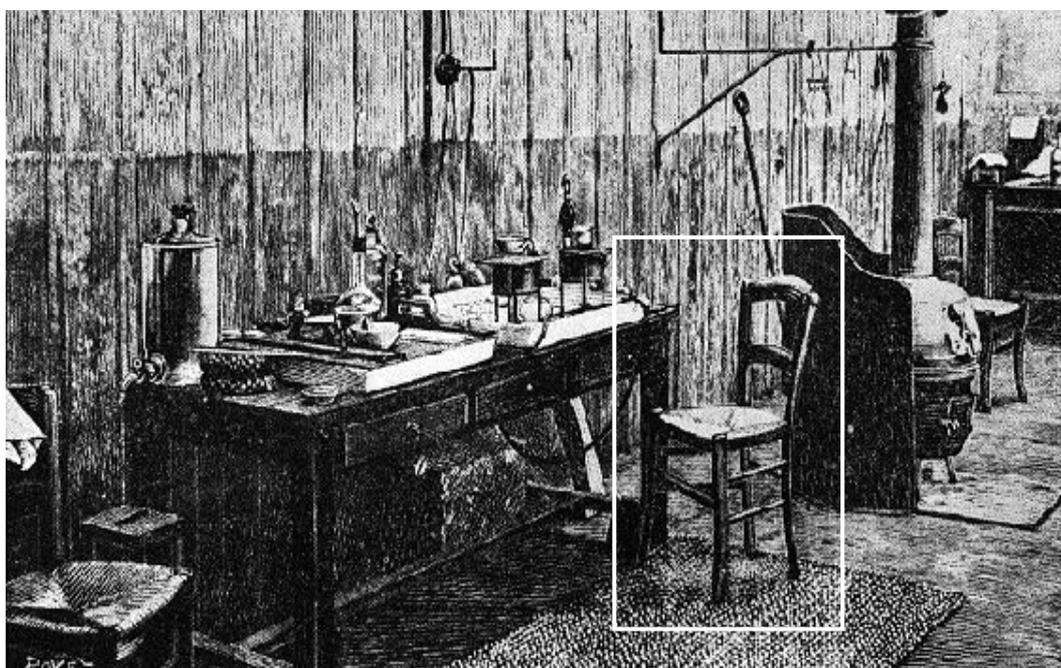
**Figura 7:** Laboratorio di Marja Sklodowska e di Pierre Curie nel cortile della École Municipale de Physique et Chimie Industrielle, in rue Lhomond.

Nell'incisione che riproduce il laboratorio non compaiono figure eppure è più realistica della più celebre foto (parte destra di fig. 7) con figure del medesimo luogo (è *esattamente* il medesimo: stesse sedie, stessa stufa sullo sfondo, l'incisione potrebbe anche derivare dalla foto), quella con i coniugi Curie vistosamente in posa, foto nella quale Skłodowska è seduta e, anziché il consueto camicione, indossa un vaporoso vestito, che avrebbe impedito di muoversi in laboratorio perfino a una vera signora di fine Ottocento.

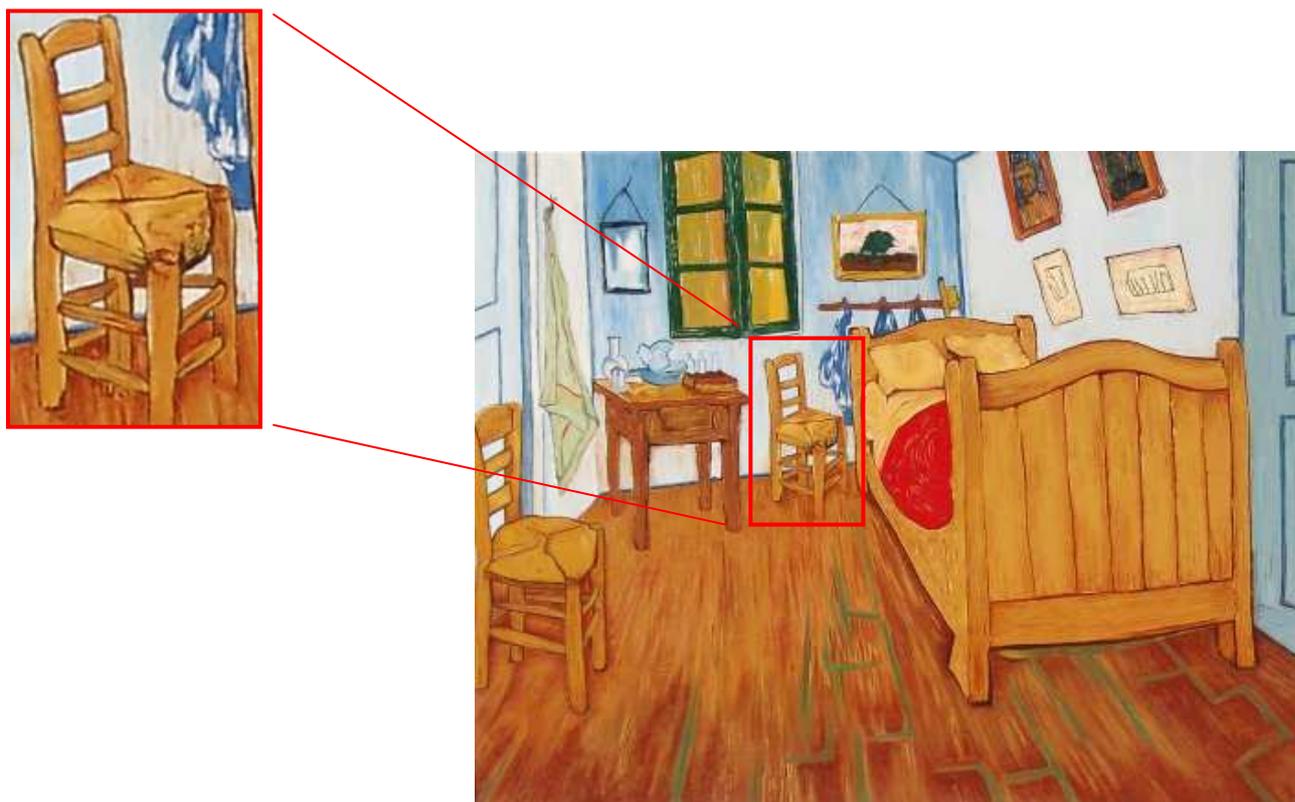
Analizziamo più approfonditamente l'incisione: riprende la stessa porzione di spazio del laboratorio della fotografia, la stessa prospettiva ma usando un'inquadratura più allargata. È una scelta certamente non è casuale: è una visuale con un punto di fuga lontano, che ci proietta alla destra indefinita dello sguardo, con lo sfondo della parete che accompagna, e nello stesso tempo delimita, la proiezione. La scena è ripresa ad altezza uomo, per farci entrare nella scena con naturalezza, come se entrassimo realmente nel laboratorio. È un modo per vedere la realtà così com'è, come appare. L'altezza e lo sguardo d'insieme sul laboratorio dunque ci permettono di cogliere la scena nella sua interezza, perché ci posizionano nella scena a un livello ben preciso e cioè a quello di chi riconosce in quella realtà che appare sotto gli occhi un luogo importante, che ha segnato una tappa importante nella strada della conoscenza scientifica. Alla sinistra della scena troviamo il tavolo con il materiale occorrente, messo in bella mostra, in esposizione; è una scena ricca di materiali e strumenti, molto più ricca della fotografia. Tutto questo è messo sulla sinistra dell'insieme, laddove si colloca lo spazio dedicato a ciò che è dato, alla realtà acquisita: si vuole sottolineare in tal modo come i risultati scientifici dei Curie ormai siano un patrimonio della scienza, non un miraggio lontano. Il progresso è a portata di mano, anzi già lo viviamo, lo possiamo afferrare: la concezione positivista permea il messaggio veicolato all'immagine. Sulla destra, dove generalmente viene messo il dato nuovo, l'incognita, la novità, una rinnovata concezione che si sta affermando, troviamo il resto del laboratorio ma come arredamento, inessenziale suppellettile, secondaria mobilia; certo quest'altra parte del laboratorio contribuisce a dare concretezza e veridicità alla scena, ma proprio perché messa nella prospettiva di fuga diventa labile e sfuggente.

Quello che salta subito agli occhi confrontando la fotografia e l'incisione è la sedia vuota al centro dell'incisione. Un'assenza che tuttavia riempie la scena. Va notato anche che questa sedia non è l'unica presente, ma le altre due addirittura quasi sfuggono alla nostra attenzione: sono incomplete e poste in spazi che

relativizzano la loro presenza. Le due linee portanti della fuga prospettica (il piano del tavolo e la linea della parete) vengono interrotte dalla sedia vuota, come una pausa che, sottolineando la mancanza dei coniugi, ne evoca le figure. Figure tuttavia che proprio nel momento in cui vengono sottratte ritornano nella mente dell'osservatore con maggiore vigore. La sedia, quella che importa, proprio per dove è posizionata, compensa il punto di fuga, diventa il punto di vista dell'immagine, evoca l'assenza dei due scienziati. Dunque la sedia vuota non è più semplice sedia, è allusione viva perché rimanda alla fisicità dei due scienziati; purtuttavia rimaniamo come sospesi perché non è univoca questa evocazione. Perché non disegnare i coniugi? O quantomeno un particolare, un indizio preciso? A nostro avviso la sedia interroga e nello stesso tempo allude, suggerisce la risposta. Certamente questa sedia, proprio quel tipo di sedia, con quell'impagliatura, con quell'angolazione (notiamo per inciso che nella fotografia la sedia è quasi tutta completa e sembra leggermente differente da quella dell'incisione: la curvatura dello schienale e le gambe) non possono che richiamarci un'altra sedia, altra ma identica: la sedia de *La camera di Arles*, che Vincent van Gogh dipinse nel 1888.



**Figura 8:** Evidenziazione di un particolare della fig. 9.



**Figura 9:** Confronto tra l'incisione del Laboratorio di Marya Sklodowska e di Pierre Curie e Vincent van Gogh, *La camera di Arles*, 1888, Rijksmuseum Vincent Van Gogh, Amsterdam.

Un quadro fondamentale e rivoluzionario quello di van Gogh, che aveva stravolto la tradizionale rappresentazione. L'accostamento è implicito, immediato tanto che con questo richiamo, come si suol dire, si chiude il cerchio. L'assenza-presenza degli scienziati è suggerita ma non soddisfa l'evocazione che la sedia produce. Proprio a questo punto il messaggio veicolato diventa chiaro: è uno sforzo di far accomodare l'osservatore, di accoglierlo in modo tale che l'assenza evocativa degli scienziati diventi presenza completa con l'osservatore, dunque è tensione verso la completezza, volontà di accogliere il lettore nell'avventura scientifica che grande ha reso i coniugi Curie, così come l'osservatore viene invitato ad accomodarsi nella camera di Van Gogh.

A conclusione di questa proposta di analisi sull'iconografia scientifica intrecciata alla storia dell'arte, vorrei riportare uno spunto di riflessione che necessiterà di ulteriori approfondimenti, dimostrazione di quanto il tema dell'iconografia scientifica sia recente e ancora agli stadi iniziali.

Riprendendo il lavoro denso e fondamentale di Ricoeur, va notato come anche per la narrazione visuale si debba evidenziare l'intrinseco valore metaforico e quindi poetico del testo, poiché questo è un fattore storiografico che l'immagine conserva. Ciò implica il problema della referenza. Che per l'ambito storiografico è referenza a quanto realmente accaduto, quale che sia la traccia rimasta. Il problema della referenza pone dunque anche per i testi segnici delle immagini la questione della veridicità della narrazione. Di fronte a un testo segnico visuale, opera dell'invenzione artistica, ricadiamo invece nell'ambito di finzione, e dunque il problema da affrontare è la verosimiglianza della narrazione e delle sue modalità, modulate per rendere verosimile il risultato. Quindi la referenza è riportata sul terreno delle descrizioni. Tuttavia c'è da sottolineare una significativa differenza, ossia che la funzione referenziale opera anche a livello del discorso più nascosto e profondo di quanto non operi la descrizione. Attraverso la sospensione del valore descrittivo degli enunciati (come succede quando la narrazione sposta l'attenzione sul valore metaforico-poetico), la funzione referenziale appare liberata e in grado di portare a galla aspetti della realtà che altrimenti non potrebbero essere espressione. «Ciò avviene in forza di una trasgressione dei significati governata dalla funzione referenziale

trans-descrittiva: a dettare le regole è la metafora, è la poesia»<sup>11</sup>. L'analisi iconografica possiede anche essa un valore metaforico che va ricercato e analizzato sul terreno proprio di un sistema di segni visivi, che rimodula il tono degli elementi componenti il testo e che, come afferma Ricœur, dà vita all'immagine stessa perché si misura con la verità della sua rappresentazione.

La comunicazione iconografica è dunque tema da approfondire, anche in relazione alla storia della scienza di cui sono parte integrante. Il carattere sociale del segno infatti determina profondamente il messaggio che viene comunicato e inoltre si deve ricordare come il mondo rappresentato visualmente sia differente da un mondo rappresentato verbalmente, e quanto differenti siano i soggetti/cittadini che da questi si originano.

---

<sup>11</sup> Ricœur P., *op. cit.*

## **Origine ed evoluzione dei genomi: dal brodo primordiale al DNA umano**

**Fabio Caradonna**

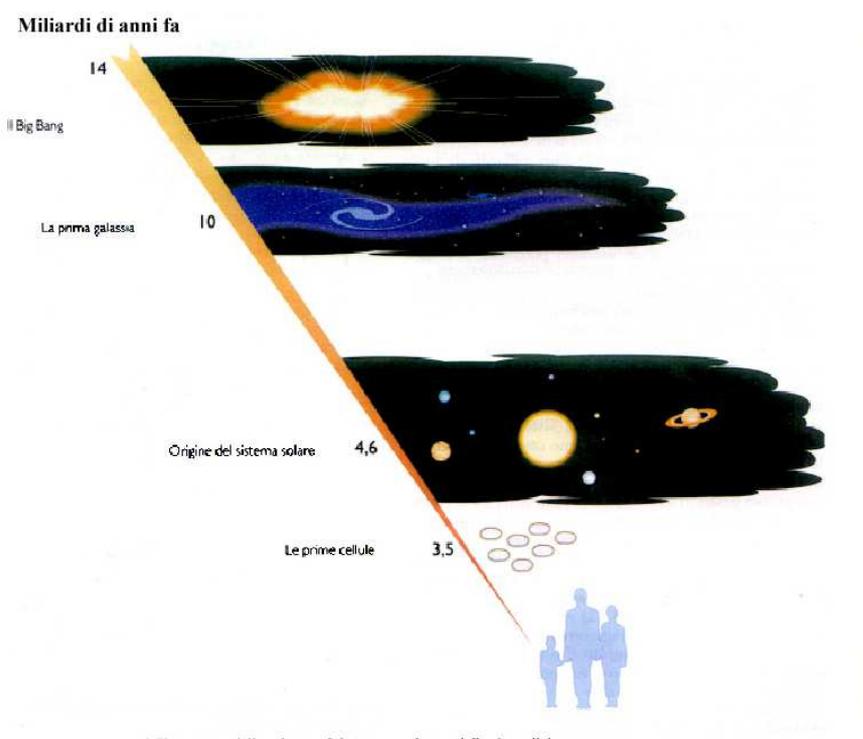
Dipartimento di Biologia Cellulare e dello Sviluppo, Università di Palermo

**Premessa.** Per una migliore comprensione dell'origine e dell'evoluzione dei genomi è conveniente posizionare l'inizio e il decorso di tale processo all'interno della successione di evoluzioni che partono dall'origine dell'universo e che ancora oggi non si possono, per definizione, ritenere conclusi. Il Big Bang conclude l'evoluzione cosmica universale e dà origine all'evoluzione planetaria con la formazione dei sistemi solari ed i loro pianeti. Considerando il nostro sistema solare, e la terra in particolare, l'evoluzione geotermica, il raffreddamento del pianeta, fornisce una condizione fisica opportuna ad un'evoluzione chimica che, a conclusione, porta al brodo primordiale. Le molecole semplici possono aggregarsi a formare monomeri di un polimero o policondensato, basi fondamentali per la chimica complessa, la chimica della vita: parte l'evoluzione biochimica con i primi proto-genomi a RNA con proprietà replicanti e funzioni non solo codificanti ma anche catalitiche del tipo "ribozyme-like". L'archo-atmosfera, fortemente riducente, favorì la comparsa del ribonucleotide ridotto, cioè del desossiribonucleotide, e alcune proto-molecole di RNA poterono replicarsi in maniera casuale includendo anche desossiribonucleotidi. Attraverso un intermedio evolutivo, il PNA, si arriva quindi al DNA. Solo le macromolecole racchiuse in ambienti ristretti riescono ad essere più efficaci e dunque si fa strada l'evoluzione cellulare con la comparsa dei cromosomi. Da questo momento la cellula, unità fondamentale della vita è protagonista di un'evoluzione i cui stadi intermedi ancora oggi sono visibili.

L'uomo, figlio evoluto pro tempore di quest'ultimo tipo di evoluzione, quella biologica, a sua volta è protagonista di un'evoluzione molto più rapida e dagli effetti visibili a tempi brevi, come quella culturale. Molto affascinante risulta l'accostamento dell'evoluzione biologica con quella informatica che recentemente e con tempi rapidissimi si sta imponendo nel mondo umano. Molte analogie, i virus ad esempio, dimostrano che i processi evolutivi procedono con uno schema-tipo che non può variare anche al cambiare dei parametri di base, valido "dal cosmo al byte". I virus informatici sono informazioni semi-autonome, come lo sono quelli biologici, entrambi sono in grado di diffondersi, entrambi potrebbero essere utili se opportunamente "trasformati" ma entrambi non sono in grado di vivere e diffondersi se avulsi da un contesto esecutore delle informazioni.

I genomi, cioè la totalità delle informazioni genetiche necessarie alla costruzione ed al mantenimento di un organismo vivente, possono essere considerati delle vere e proprie "cabine di regia" di un organismo vivente.

Queste informazioni sono contenute e mantenute in una macromolecola, il DNA, che, per avere questa struttura e questo grado di complessità, garanzia di efficienza, è l'ultimo arrivato di tutta una serie di processi evolutivi che partono dalla nascita dell'universo (Fig. 1).



**Figura 1:** (Brown, 2003)

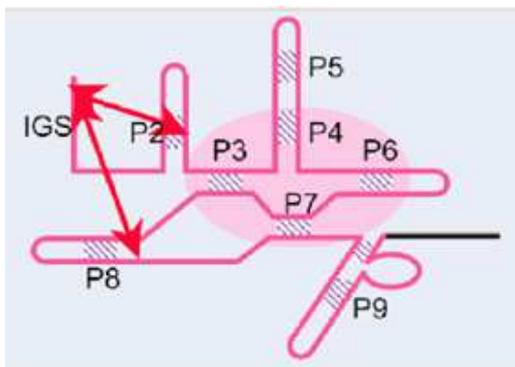
La successione delle evoluzioni che hanno portato al costituente primo dei genomi sono veramente tante e, soprattutto, non sono ancora concluse, visto che un processo evolutivo, per definizione, è proprio quel processo che non conosce mai fine in quanto anche la stessa conclusione può essere definita come una transizione ad un altro processo.

Miller ricreò in laboratorio quello che presumibilmente è successo miliardi di anni fa quando ebbe inizio sulla terra l'evoluzione chimica. Egli dimostrò che in condizioni verosimilmente esistenti al tempo, cioè atmosfera riducente, assenza di ossigeno, e presenza di scariche elettriche, idrocarburi primari come il metano ed altri riuscivano a catalizzare la loro trasformazione in amminoacidi ed acidi nucleici primordiali, che costituiscono ancora oggi i costituenti strutturali e funzionali di tutti i viventi (Fig. 2).



**Figura 2**

I primi genomi, detti protogenomi, ormai è assodato, furono di RNA e non di DNA. Questo non poté essere storicamente compreso prima della scoperta dei ribozimi (Fig. 3), molecole di RNA oggi esistenti negli organismi viventi che hanno funzione catalitica, quasi come se fossero enzimi. Essendo degli acidi nucleici, però, oltre alla funzione catalitica conservano sempre la funzione codificante cioè quella capacità di contenere nella propria struttura chimica un "messaggio".



**Figura 3:** (Lewin, 2006)

Inoltre gli RNA primordiali non erano dotati di replicazione accurata né tantomeno di sistemi di correzione delle bozze; questo ha causato una replicazione lenta e poco accurata che ha generato una grande varietà di sequenze di RNA, sulle quali l'ambiente ha operato una forma di selezione naturale in modo tale che predominassero i sistemi migliori.

Ad un certo punto dell'evoluzione comparvero i primi enzimi (Fig. 4). Gli enzimi sono più efficienti perché più plastici in quanto fatti da 20 amminoacidi anziché da 4 nucleotidi; rimpiazzano i ribozimi lasciando all'RNA la possibilità di diventare solo codificante, ruolo per il quale non è adatto perché instabile: comincia dunque il processo evolutivo che porta alla formazione del DNA ed alla sua affermazione sulla scena della vita come molecola autoreplicante depositaria dell'informazione genetica.



**Figura 4**

L'atmosfera riducente spinge alla riduzione dei ribonucleotidi formando i primi desossiribonucleotidi. Forse comparve un intermedio chiamato PNA che contraeva legami più stabili (peptidici al posto dei futuri fosfodiesterici) conferendo ai sistemi primordiali sia un vantaggio che uno svantaggio.

I primi genomi a DNA sarebbero stati quindi formati da tante molecole a DNA, ognuna codificante una singola proteina. L'unione dei singoli geni nei primi cromosomi ha migliorato l'efficienza della distribuzione dei geni durante la divisione cellulare e da questo momento parte l'evoluzione della vita ad una velocità che sicuramente non è uguale a prima (Fig. 5). L'evoluzione infatti procede "a balzelli" piuttosto che in maniera costante.



Figura 5

L'evoluzione morfologica di ogni organismo vivente è stata sempre accompagnata dall'acquisizione di nuovi geni secondo un ritmo non costante, come detto prima. Una prima esplosione del numero dei geni, da poche migliaia a più di 10.000, è avvenuta con la comparsa degli eucarioti e, successivamente con l'apparizione dei primi vertebrati. Nuovi geni possono essere comparsi per duplicazione di interi genomi (poliploidia) quando, ad esempio, un errore durante la meiosi portò alla formazione di gameti fertili diploidi che si incrociavano. A dimostrazione di ciò si consideri che anche oggi molte specie, in particolare piante e anfi-bi hanno un genoma poliploide. Oppure, nuovi geni possano aver fatto la loro prima apparizione per duplicazione di un gene o gruppi di geni preesistenti (Fig. 6). *La duplicazione di tratti più o meno estesi del genoma costituisce un meccanismo evolutivo fondamentale e ripetutamente sfruttato dall'evoluzione.* Le duplicazioni possono aver avuto luogo anche tramite scambio diseguale tra cromatidi fratelli. Il risultato iniziale della duplicazione è la formazione di due geni identici. La pressione selettiva assicurerà che uno mantenga la sua funzione iniziale, mentre l'altro può accumulare mutazioni, che spesso lo inattivano facendolo diventare un pseudogene, ma possono anche conferire una nuova attività genica utile all'organismo.

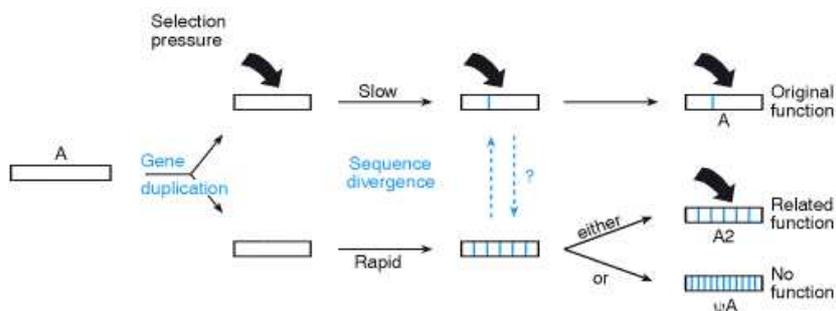
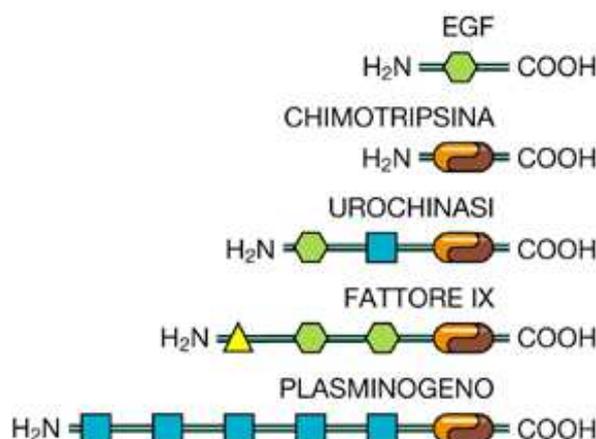


Figura 6

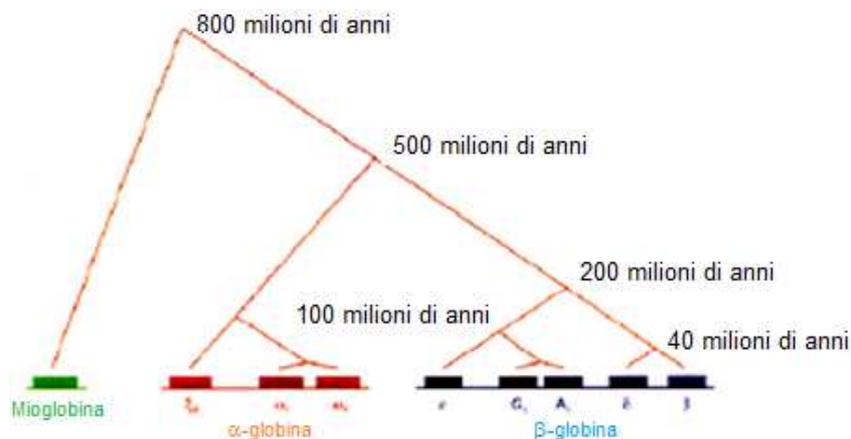
Che le cose siano andate secondo queste direttive, è dimostrato dalla composizione in sequenze peptidiche di alcune proteine con funzione correlata fra loro, quali quelle implicate nel processo della coagulazione del sangue (Fig. 7). La chimotripsina ed il fattore IX della coagulazione hanno vaste zone di omologia segno che hanno un'origine comune e che poi la divergenza genica abbia portato alla differenziazione in funzioni diverse.



**Figura 7**

Inoltre questo modello predice l'esistenza delle famiglie multigeniche cioè quelle famiglie di geni simili in sequenza e funzione che coesistono in varie parti del genoma e che assolvono a funzioni diverse ma inquadrate in un unico segmento del metabolismo, come la famiglia delle globine; oppure come i geni facenti parte del cosiddetto DNA ripetitivo come i geni per l'RNA ribosomale che è organizzato a ripetizioni dello stesso "motivo" questa volta non per differenziare la sua funzione ma per sopperire alla necessità della cellula di dover avere gran quantità di quel particolare prodotto in pochissimo tempo.

Se questa ipotesi è vera è possibile dunque "sistemare" gli organismi viventi che sfruttano questi geni riordinandoli da quello che possiede il gene ancestrale non duplicato a quello che ne possiede tantissime copie: si può fare quello che gli esperti chiamano "orologio molecolare" (Fig. 8).



**Figura 8:** (Brown, 2003)

Infine, la sussistenza di questa ipotesi fa scaturire come automatica la presenza di un DNA non codificante che si potrebbe chiamare "spazzatura" in quanto a funzione sconosciuta. Infatti, dopo i processi di duplicazione e divergenza di sequenze ancestrali secondo meccanismi del tutto casuali, è molto probabile che alcune di queste combinazioni siano risultate assolutamente abortive in quanto non possiedono un messaggio con senso e dunque oggi, nei genomi degli organismi evoluti, dovrebbe trovarsi una gran quantità di DNA "inutile" cioè frutto di statistici tentativi attualmente considerati falliti con cui il genoma si è evoluto. Infatti è proprio così: prendendo in considerazione un genoma "evoluto" (quello umano) il DNA codificante è solo il 3% del totale; il resto è tutto DNA non codificante ma assolutamente utile per il presente, una certa parte, e per il futuro la restante parte.

Ad onor del vero potrebbe valere anche il contrario. Cioè il DNA non codificante potrebbe essere un serbatoio da cui attingere per formare nuove combinazioni di geni con cui fare evolvere il genoma. Probabilmente sono vere entrambe le ipotesi: ma la realtà delle cose ci spinge a dire che questo tipo di DNA chiamato per troppo tempo DNA spazzatura, lungi dall'essere inutile, rappresenta invece antiche vestigia di ciò che siamo stati e mattoni primordiali di ciò che potremmo essere.

**Bibliografia:**

Brown, TA: Genomi 2, Edises, 2003  
Lewin, B: Il gene VIII, Zanichelli, 2006

## I tempi delle molecole

**Mariano Venanzi**

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche. Università di Roma Tor Vergata

e-mail: venanzi@uniroma2.it

### 1. Il tempo dei moti elettronici.

Da un punto di vista fondamentale una molecola non è altro che l'assemblaggio di un certo numero di nuclei, costituiti da neutroni e protoni, tenuti insieme da una 'colla' costituita da un numero di elettroni pari al numero di protoni presenti. In realtà quasi tutti gli elettroni provenienti da un dato atomo risiedono intorno al nucleo dell'atomo di origine e sono solo quelli che i chimici chiamano gli elettroni di valenza a dare un contributo significativo al legame chimico, con la formazione di orbitali molecolari che si estendono sull'intera molecola.

Protoni ed elettroni hanno la stessa carica elettrica, anche se di segno opposto, ma differiscono profondamente per le loro proprietà dinamiche. La massa del protone è di  $1.67 \cdot 10^{-24}$  g, mentre quella dell'elettrone è di  $9.11 \cdot 10^{-28}$  g, cioè un elettrone è circa 1840 volte più leggero di un protone. Questo vuole anche dire che, a parità di energia cinetica, un elettrone ha una velocità circa 43 volte maggiore di quella di un protone (senza tener conto delle correzioni relativistiche).

Questa semplice considerazione ha portato alla formulazione di una delle approssimazioni più utilizzate dai chimici teorici nei calcoli delle energie e della struttura molecolare: infatti, il moto degli elettroni viene risolto considerando i nuclei fermi e calcolando le densità elettroniche per ogni posizione (fissa) dei nuclei (*Approssimazione di Born-Oppenheimer*).<sup>1</sup>

Consideriamo un atomo di idrogeno nell'ambito del semplice modello planetario di Bohr (1913).<sup>2</sup> Secondo questo modello l'elettrone compie un'orbita circolare intorno al nucleo, costituito da un solo protone, con un raggio caratteristico di  $5.29 \cdot 10^{-9}$  cm ( $0.53 \text{ \AA}$ ). Durante il moto, il momento angolare dell'elettrone è quantizzato, può assumere cioè solo multipli interi di una costante fondamentale ( $h = 6.626 \cdot 10^{-27}$  erg·s, costante di Planck):

$$mvr = \frac{nh}{2\pi}$$

E' facile da questa relazione calcolare la velocità di un elettrone che percorre un'orbita circolare 1s ( $n=1$ ), pari a  $2.2 \cdot 10^8$  cm·s<sup>-1</sup>. Dal raggio di Bohr, è facile anche trovare che l'elettrone percorre l'orbita in circa  $1.5 \cdot 10^{-16}$  s (0.15 fs, femtosecondi).

Per un elettrone 1s di un atomo di ferro, la velocità è notevolmente più alta, perché deve vincere l'attrazione di un nucleo composto da 26 protoni. Una stima della velocità di questo elettrone è di circa  $5.7 \cdot 10^9$  cm·s<sup>-1</sup>, ma questo valore è largamente inaccurato, almeno per due motivi: i) si è trascurata la presenza di un secondo elettrone sulla stessa orbita; ii) la velocità degli elettroni più interni in atomi a numero atomico elevato è grande al punto che non possono essere trascurate le correzioni relativistiche.

Il modello di Bohr dell'atomo di idrogeno è una delle conquiste più importanti della fisica moderna. In questo modo trovava spiegazione uno dei problemi fondamentali a cui la fisica classica non sapeva dare una spiegazione accettabile, e cioè gli spettri di riga ottenuti misurando l'emissione della radiazione solare.

Secondo il modello di Bohr, anche l'energia è quantizzata e, per l'atomo di idrogeno, dipende in maniera semplice da un numero intero e da un'altra costante fondamentale, la costante di Rydberg ( $R = 109377$  cm<sup>-1</sup>):

$$\varepsilon(\text{cm}^{-1}) = -\frac{R}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

L'energia necessaria ad un elettrone per saltare dal livello 1 al livello 2 è semplicemente:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = -R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{1^2}\right) = 82033 \text{ cm}^{-1}$$

Tradotto in frequenze questo numero diventa  $2.46 \cdot 10^{15}$  Hz, che riportato in tempi ci dice che un elettrone impiega circa 0.4 fs per compiere questo salto.

Possiamo concludere dunque che:

- 1) L'assorbimento di radiazione è un processo praticamente istantaneo che avviene in tempi dell'ordine della frazione dei femtosecondi ( $10^{-15}$  s);
- 2) I nuclei rimangono sostanzialmente fermi durante il tempo necessario per una transizione elettronica (Principio Franck-Condon).

## 2. Il tempo dei moto molecolari

Risolto il problema del moto elettronico, è tempo di far muovere i nuclei. Per questo prendiamo in esame la molecola più semplice che possiamo considerare, la molecola di idrogeno (nel nostro approccio fondamentale un problema a due protoni e due elettroni).

Una molecola biatomica (per forza di cose lineare), ha tre tipi di moto possibili: può spostarsi lungo le tre possibili direzioni dello spazio (*traslazioni*), può ruotare nello spazio (*rotazioni*), può allungare o accorciare la propria distanza di legame (*vibrazioni*). E' possibile dimostrare che i moti indipendenti di una molecola sono  $3N$ , dove  $N$  sono gli atomi che la compongono. Per una molecola biatomica come l' $\text{H}_2$  ( $3N=6$ ), tre sono traslazioni (le tre direzioni nello spazio), due sono le rotazioni (la rotazione intorno all'asse di legame è nulla), e quindi una sola è la vibrazione possibile, detta moto di *stretching* (allungamento/accorciamento del legame).

Per il moto traslazionale è sufficiente prendere in considerazione le conclusioni della fisica classica (*teorema di equipartizione*) che associa ad ogni traslazione un contributo alla energia cinetica pari a  $\frac{1}{2}kT$ , dove  $T$  è la temperatura assoluta e  $k$  è la costante di Boltzmann,  $k=1.38 \cdot 10^{-16}$  erg·K<sup>-1</sup>.

Di conseguenza:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

E' facile calcolare [ $m(\text{H}_2)=3.32 \cdot 10^{-24}$  g] che, per  $T=300\text{K}$  ( $27^\circ\text{C}$ ), la velocità di una molecola è pari a  $1.9 \cdot 10^5$  cm·s<sup>-1</sup>, cioè circa 2 Km al secondo. Nella realtà le collisioni in fase gassosa riducono fortemente il cammino percorso da una molecola nell'unità di tempo.

Anche per le rotazioni, purché la temperatura sia superiore ai 100K, è possibile ricorrere ai risultati del teorema di equipartizione, che assegna lo stesso contributo di  $\frac{1}{2}kT$  ad ogni moto rotazionale.

Quindi (2 rotazioni):

$$\frac{1}{2}I\omega^2 = kT$$

dove  $I$  è il momento di inerzia della molecola [ $I(\text{H}_2)=4.57 \cdot 10^{-41}$  g·cm<sup>2</sup>] e  $\omega$  la sua velocità angolare (rad·s<sup>-1</sup>). Per la molecola di Idrogeno a 300K, questa velocità è pari a  $4.25 \cdot 10^{13}$  rad·s<sup>-1</sup>, il che vuol dire che una molecola di Idrogeno impiega un tempo pari a circa  $15 \cdot 10^{-12}$ s (15 ps, picosecondi) per compiere una rotazione.

Per quanto riguarda le vibrazioni molecolari non ci sono scorciatoie possibili, il moto vibrazionale deve essere necessariamente trattato quantisticamente. Per fortuna il risultato quantistico è dal punto di vista numerico molto semplice. A temperature ordinarie le molecole si comportano in maniera molto simile ad un oscillatore armonico e in generale popolano solo lo stato vibrazionale fondamentale con energia pari a:

$$E_0 = \frac{1}{2} h\nu$$

dove  $\nu$  rappresenta la frequenza propria di un oscillatore armonico:  $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$

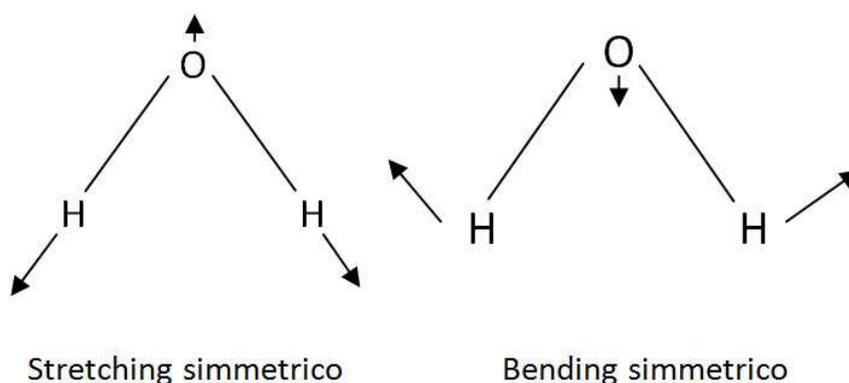
avente costante di forza  $k$  e massa ridotta  $\mu$ .<sup>1</sup>

Più difficile è accettare, da un punto di vista concettuale, che gli oscillatori quantistici non siano mai fermi, ma abbiamo comunque una energia vibrazionale  $E_0$  (energia di punto zero) anche nello stato fondamentale. Dal risultato quantistico è comunque facile calcolare la frequenza di vibrazione naturale di ogni molecola e quindi il tempo necessario a compiere una vibrazione.

Per la molecola di Idrogeno:  $k=1.14 \cdot 10^6$  dyne·cm<sup>-1</sup> e  $\mu=0.835 \cdot 10^{-24}$ g, da cui si ottiene  $\nu=1.86 \cdot 10^{14}$  Hz. Il tempo tipico di una vibrazione di una molecola di idrogeno è quindi  $5.4 \cdot 10^{-15}$ s (5.4 fs).

Per l'ossido di carbonio il tempo caratteristico di vibrazione è 15fs, per il cloruro di iodio è 87 fs.

Molecole poliatomiche presentano più di una vibrazione. La molecola di acqua ha 3 vibrazioni fondamentali ( $3N=9$ , 3 traslazioni, 3 rotazioni), che coinvolgono anche variazioni degli angoli di legame (*bending*). L'allungamento simmetrico dei legami OH ha un tempo caratteristico di 9fs, mentre il piegamento dell'angolo di legame avviene in circa 21 fs.



**Figura 1:** moti vibrazionali dell'acqua (stretching e bending simmetrici).

Per l'anidride carbonica il moto di stretching simmetrico richiede 25fs, mentre quello di bending 50fs.<sup>3</sup>

Il risultato davvero generale che abbiamo ottenuto è che le rotazioni molecolari sono molto più lente delle vibrazioni. In generale, nel tempo necessario ad una singola rotazione avvengono un centinaio di vibrazioni.

Il moto degli elettroni, le vibrazioni e le rotazioni delle molecole avvengono quindi su tempi scala molto differenti. E' per questo che capita di vedere nei libri di spettroscopia, spesso come prima figura, la separazione dello spettro elettromagnetico in regioni spettrali differenti: raggi gamma, raggi X, ultravioletto(UV), visibile, infrarosso (IR), microonde (MW), radiofrequenze (RW) e a ciascuna di queste associati diversi moti nucleari ed elettronici (compresi quelli di spin di cui non parleremo).<sup>4</sup>

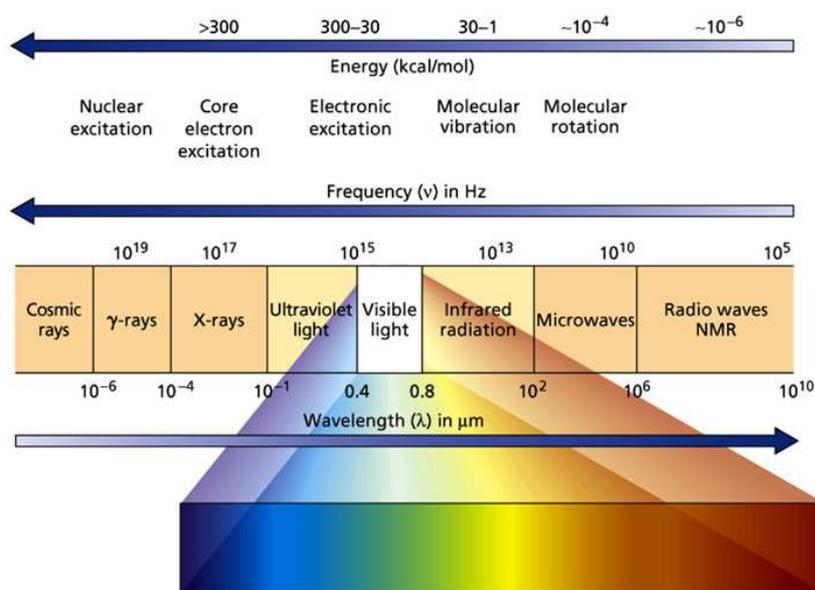


Figura 2: Spettro elettromagnetico e proprietà molecolari.

### 3. L'energia ridistribuita. I tempi del rilassamento energetico delle molecole.

Il problema che potremmo porci adesso è: che fine fa l'energia assorbita?

La figura 3 (Diagramma di Jablonski) riassume i processi fotofisici legati al rilassamento delle molecole e ci riporta a molte delle considerazioni già svolte.

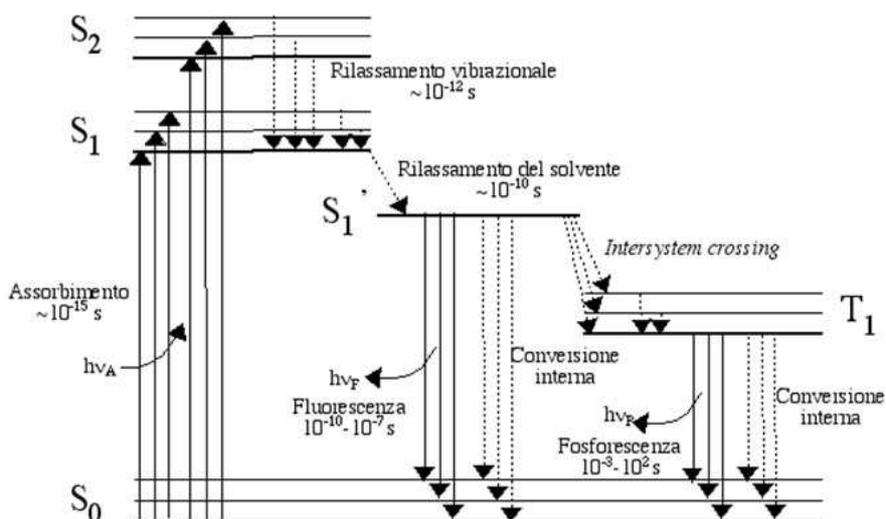


Figura 3: processi fotofisici di rilassamento intramolecolari (Diagramma di Jablonski).

Abbiamo già visto che il processo di assorbimento di energia per via elettronica è un processo praticamente istantaneo, che avviene in tempi delle frazioni di femtosecondi. Si tratta infatti del passaggio di un elettrone dal suo stato fondamentale ad uno stato elettronico eccitato. Il primo processo che avviene a seguito

dell'assorbimento di energia luminosa è il ritorno a stati elettronici più bassi in energia (*conversione interna*), e questo avviene con tempi intorno ai  $10^{-14}$ - $10^{-12}$  s. All'interno di ogni stato elettronico prende poi il via la conversione di energia da energia elettronica ad energia vibrazionale (*rilassamento vibrazionale*), un processo che di solito ha luogo con tempi dell'ordine dei picosecondi. Arrivati sul gradino vibrazionale più basso del primo stato elettronico eccitato, le molecole possono ancora liberarsi dell'energia in eccesso o per collisione con le molecole di solvente, o per trasferimento verso stati elettronici a spin diverso (un processo lento che ha luogo su scale dei tempi dei microsecondi), oppure possono emettere radiazione tra stati con lo stesso spin (e allora si parla di *fluorescenza*, tempi tipici dell'ordine dei nanosecondi) o tra stati a spin differente (di nuovo un processo proibito che avviene con tempi dell'ordine dei millisecondi, *fosforescenza*).

Proprio la fluorescenza ci darà modo di svolgere alcune considerazioni interessanti sui moti molecolari e, in particolare, sui moti che interessano sistemi relativamente complessi come le molecole biologiche.

#### 4. I tempi delle interazioni intermolecolari. I moti del solvente.

Quando si misura uno spettro di fluorescenza la prima cosa che si nota è che lo spettro di emissione è invariabilmente spostato a energie minori (lunghezze d'onda maggiori) rispetto allo spettro di assorbimento. L'effetto è in parte dovuto ai processi di rilassamento che abbiamo appena analizzato con le relative perdite di energia, ma in generale, la causa più importante della variazione energetica osservata è costituita dalle interazioni che si stabiliscono tra la molecola nel suo stato elettronico eccitato e le molecole di solvente (*Stokes shift*).

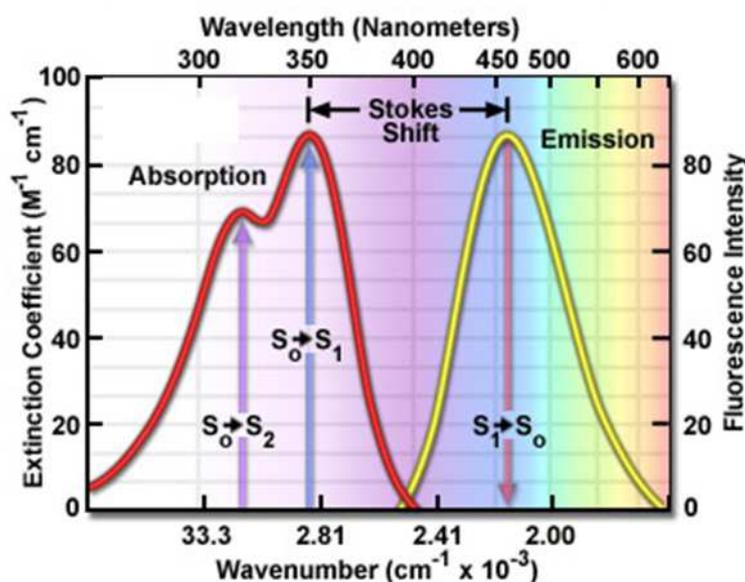
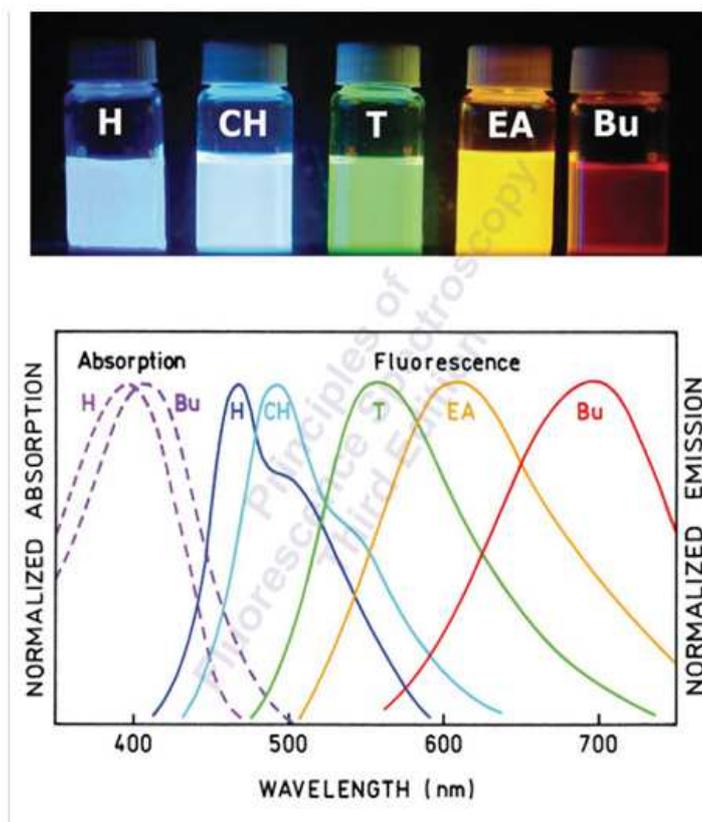


Figura 4: spettro di assorbimento (rosso) e di emissione (giallo) del solfato di chinino.

Il problema può essere ricondotto alla differente velocità dei moti elettronici e nucleari. Abbiamo visto infatti che l'assorbimento di radiazione è praticamente istantaneo. Questo vuol dire che una molecola che *prima* di essere eccitata per radiazione si trova in equilibrio con il solvente, *dopo* l'assorbimento di un fotone si troverà in uno stato eccitato in una situazione di non equilibrio con le molecole di solvente che la circondano. A questo punto il solvente dovrà riaggiustarsi intorno al nuovo stato. I suoi elettroni lo faranno rapidamente (*polarizzazione elettronica*), ma i nuclei dovranno ruotare per raggiungere la nuova orientazione di equilibrio: un moto relativamente lento che può prendere anche decine o centinaia di picosecondi (*polarizzazione per riorientazione*). L'emissione di fluorescenza ha tempi caratteristici dell'ordine dei nanosecondi, quindi avviene tipicamente *dopo* che il solvente ha trovato il suo nuovo stato di equilibrio, stabilizzando e quindi abbassando l'energia dello stato eccitato. La radiazione emessa avrà dunque energie minori (lunghezze d'onda maggiori), proprio perché il salto energetico avviene tra lo stato elettronico eccitato stabilizzato dalla ripolarizzazione del solvente e lo stato fondamentale.

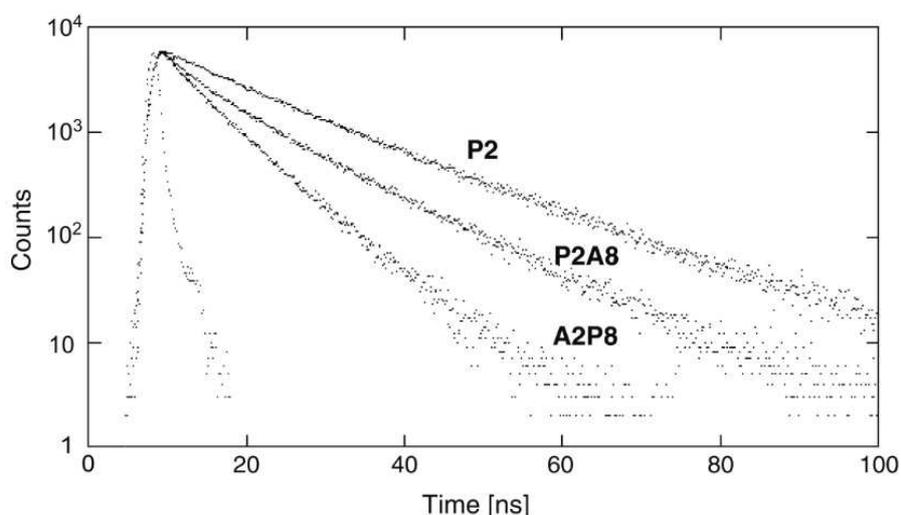
La variazione energetica sarà tanto più grande quanto più polare è lo stato eccitato molecolare e quanto più polare è il solvente: solventi fortemente polari stabilizzeranno lo stato eccitato più di solventi meno polari o apolari, che a loro volta risentiranno poco della variazione di polarità della molecola nel passare dal suo stato fondamentale allo stato eccitato.

La figura 5 riporta la evidente variazione di colore della fluorescenza emessa dal dinitrostilbene all'aumentare della polarità del solvente. L'effetto è dovuto alla formazione di uno stato a parziale trasferimento di carica che conferisce allo stato eccitato una forte polarità. Si noti per contro come lo spettro di assorbimento (linee tratteggiate in figura) risulti sostanzialmente imperturbato a riprova del già enunciato Principio di Franck-Condon.



**Figura 5:** spettro di emissione del dimetilammino-dinitrostilbene. H: esano; CH: cicloesano; T: toluene; EA: etilacetato; Bu: alcool butilico.<sup>5</sup>

Tutto questo ha un corrispettivo non solo negli spettri, ma anche nella misura dei tempi di vita di fluorescenza. E' infatti possibile misurare direttamente il tempo di vita degli stati eccitati mediante esperimenti di fluorescenza risolta in tempo. La tecnica di misura più usata è detta a conteggio di fotone singolo (*Single Photon Counting*), proprio perché la sensibilità della tecnica permette di rivelare il singolo fotone emesso per fluorescenza (i puntini che compaiono nella figura 6 sono proprio i conteggi dei singoli fotoni emessi ai vari tempi).



**Figura 6:** decadimento temporale di fluorescenza di peptidi funzionalizzati con una sonda pirenica.<sup>6</sup>

Da questi dati sperimentali si possono ottenere i tempi di decadimento di sonde fluorescenti, e quindi analizzare le interazioni con l'intorno chimico e i processi fotofisici in atto. Esperimenti di fluorescenza risolta in tempo hanno così permesso di misurare i tempi di rilassamento associati ai moti del solvente per riorientarsi intorno alla molecola eccitata.

Il tempo di rilassamento dielettrico ( $\tau_D$ ) e il tempo di rilassamento longitudinale ( $\tau_L$ ) sono legati all'indice di rifrazione ( $n$ ) e alla costante dielettrica ( $\epsilon$ ) del solvente attraverso la relazione:

$$\tau_L = \frac{2\epsilon(\infty) + 1}{2\epsilon(0) + 1} \tau_D = \frac{2n^2 + 1}{2\epsilon + 1} \tau_D \approx \frac{n^2}{\epsilon} \tau_D$$

**Tabella 1:** tempi di rilassamento dielettrico ( $\tau_D$ ) e longitudinale ( $\tau_L$ ) di vari solventi

Solvente	T(°C)	$\tau_D$ (ps)	$\tau_L$ (ps)
H <sub>2</sub> O	25	8.3	0.4
CH <sub>3</sub> OH	19	60	8.2
EtOH	19	90	12.4
n-PropOH	19	320	59
	-20	1300	340
Glycerol	12	39	-
	-70	1100	-

Come si può notare i tempi sono dell'ordine dei picosecondi, ma per solventi viscosi a bassa temperatura possono diventare anche molto lunghi (dell'ordine dei nanosecondi) e quindi avvenire nella stessa scala dei tempi dell'emissione di fluorescenza. In questo caso si osserverà un decadimento complesso, frutto della compresenza dei diversi meccanismi di rilassamento sia intramolecolari, che intermolecolari.

Studi accurati condotti con impulsi laser della durata di un centinaio di femtosecondi hanno permesso di analizzare in dettaglio i moti del solvente nelle sue diverse componenti. Così per l'alcol metilico sono stati determinati il tempo tipico di ri-orientazione di molecole impegnate in legame idrogeno ( $\approx 50$ ps), quello tipico di molecole libere in soluzione (13ps) e finanche le rotazioni veloci di gruppi OH ( $\approx 1$ ps).<sup>7</sup>

## 5. I tempi di molecole complesse.

Oltre a misure di tipo spettrale e risolte in tempo, una ulteriore tecnica di fluorescenza è basata sulla misura della polarizzazione della radiazione emessa. Se una molecola fluorescente viene eccitata con radiazione polarizzata lungo un determinato piano, la radiazione emessa dovrebbe, in linea di principio, conservare le stesse caratteristiche di polarizzazione. In realtà la radiazione emessa conterrà sia una componente parallela al piano di polarizzazione della radiazione assorbita, sia una componente perpendicolare ad essa. Questo perché nell'intervallo temporale che passa tra l'assorbimento e l'emissione di radiazione la molecola avrà avuto modo di ruotare, cambiando la propria orientazione nello spazio. La differenza tra la componente parallela ( $I_{//}$ ) e perpendicolare ( $I_{\perp}$ ) della radiazione emessa, è detta anisotropia di fluorescenza ed è funzione diretta della libertà rotazionale del fluoroforo. Può essere così definito un coefficiente di anisotropia:

$$r = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{//} + 2I_{\perp}}$$

Quest'ultimo dipende dal tempo di vita del fluoroforo ( $\tau$ ) e dal tempo di rotazione della molecola ( $\theta$ ) secondo la formula:

$$r = \frac{r_0}{1 + \frac{\tau}{\theta}}$$

Se la molecola ruota liberamente ( $\theta \ll \tau$ ), l'orientazione della molecola al momento della emissione di radiazione sarà completamente casuale e, di conseguenza,  $r=0$ . Al contrario, se la rotazione della molecola è bloccata, come accade in un solvente viscoso a bassa temperatura,  $\theta \gg \tau$  e  $r \approx r_0$ , l'anisotropia massima della molecola.<sup>8</sup> Da misure del coefficiente di anisotropia è stato possibile determinare i tempi di rotazione di proteine, legati direttamente al loro peso molecolare o meglio al loro volume idrodinamico.

Ad esempio, la apomiglobina (p.m.=17000) ha un tempo di rotazione di 8.3 ns, mentre la siero albumina (p.m.=66000) ha un tempo di rotazione di 41.7 ns.

Innumerevoli sono le possibili applicazioni delle misure di anisotropia di fluorescenza spettrale e risolta in tempo: dallo studio della microviscosità locale di soluzioni di differente viscosità e temperatura, alla dinamica di sonde fluorescenti legate a biomolecole (es. rodamina su destrano), alle transizioni di fasi in modelli di membrana (difenilesatriene in DMPC), ai processi di associazione tra proteine e acidi nucleici (es. associazione tra metionina e filamenti di RNA marcati con fluoresceina), allo studio della dinamica rotazionale di residui di triptofano posti all'interno della struttura proteica o esposti sulla superficie a contatto con il solvente.

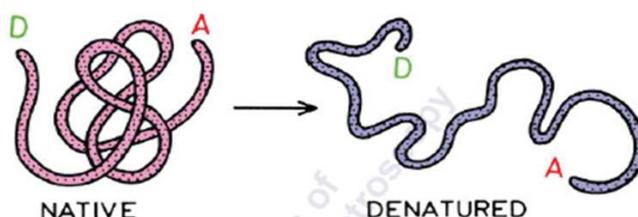
Un processo di stato eccitato, che ha fornito informazioni preziose sulla dinamica di sistemi biologici è costituito dal trasferimento energetico risonante (FRET, Fluorescence Resonance Energy Transfer).<sup>5</sup> Secondo questo meccanismo un fluoroforo cede la sua energia di eccitazione ad un accettore con una costante di velocità caratteristica ( $k_{ET}$ ) che dipende dalle proprietà spettrali della coppia donatore-accettore ( $R_0$ ) e dalla loro distanza reciproca R:

$$k_{ET} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{R}{R_0} \right)^6$$

$R_0$  rappresenta la distanza alla quale l'energia viene trasferita per il 50%, mentre  $\tau$  è il tempo di vita del donatore. Tanto più vicini saranno donatore ed accettore, tanto più diminuirà l'intensità della fluorescenza del donatore e, corrispondentemente, aumenterà l'intensità della fluorescenza emessa dall'accettore.

Le applicazioni più interessanti di questa tecnica riguardano lo studio della dinamica di sistemi biologici, e in particolare la caratterizzazione dei processi di folding proteico, cioè delle transizioni conformazionali che accompagnano la strutturazione della proteina nella sua forma nativa.

Questo perché la FRET risolta in tempo permette di ottenere informazioni sulle distanze Donatore-Acettore in tempi dell'ordine dei nanosecondi. Così la denaturazione di una proteina può essere seguita misurando la variazione con il tempo delle distanze della coppia D-A (Figura 7).



**Figura 7:** schematizzazione di un esperimento FRET per lo studio del processo di denaturazione di una proteina.<sup>5</sup>

In questo modo si è studiata la flessibilità di catene peptidiche in funzione della sequenza di aminoacidi, l'aggregazione di peptidi amiloidi (responsabili dell'insorgere di malattie neurodegenerative) e le transizioni conformazionali tra strutture secondarie differenti.

La tabella seguente riassume i tempi caratteristici della dinamica di proteine e acidi nucleici. Come si può notare i tempi riportati variano su più di 15 ordini di grandezza, svelando la ricchezza e complessità dei fenomeni chimico-fisici sottostanti ai diversi eventi molecolari.

**Tabella 2:** moti e tempi caratteristici della dinamica di proteine e acidi nucleici

<i>Vibrazioni di atomi legati</i>	10 - 100 fs
<i>Moto delle basi nucleotidiche</i>	10fs – 1ps
<i>Vibrazioni globali (DNA)</i>	0.1 - 10 ps
<i>Twisting globale (DNA)</i>	0.1 - 10 ps
<i>Vibrazioni di regioni globulari</i>	1 - 10 ps
<i>Inversione degli zuccheri (acidi nucleici)</i>	1ps - 1ns
<i>Rotazioni di catene laterali di residui esterni</i>	10 - 100 ps
<i>Moti torsionali di residui interni</i>	10ps - 1 ns
<i>Moti relativi di domini proteici</i>	10ps -100 ns
<i>Piegamenti globali (acidi nucleici)</i>	100ps-100ns
<i>Rotazioni di catene laterali di residui interni</i>	0.1ms-1s
<i>Transizioni allosteriche</i>	10μs-1s
<i>Denaturazione locale</i>	10μs-10s

### **Note e riferimenti bibliografici**

1. P. W. Atkins, R.S. Friedman *Meccanica Quantistica Molecolare*, Zanichelli Ed., Bologna, 2004.
2. Nelle considerazioni sviluppate dimenticheremo volontariamente i problemi legati al principio di indeterminazione e parleremo di traiettorie, velocità e posizioni come se fossero grandezze pienamente definite. Lo scopo che ci proponiamo in queste brevi pagine è solo quello di dare una stima dei tempi caratteristici dei moti elettronici e nucleari.
3. Un risultato del tutto generale verificabile direttamente in palestra. Ci vuole più tempo (e fatica) per piegarsi che per allungarsi!
4. C.N. Banwell *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*, Mc Graw-Hill, London.
5. J. Lakowicz *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Plenum Press, New York.
6. E. Gatto, A. Porchetta, L. Stella, I. Guryanov, F. Formaggio, C. Toniolo, B. Kaptein, Q.B. Broxterman, M. Venanzi *Chemistry&Biodiversity* (2008) 5, 1263-1278.
7. J.D. Simon *Acc. Chem. Res.* (1988) 21, 128-134.
8. L'anisotropia massima è una proprietà della singola molecola fluorescente ed è determinata dall'angolo tra il momento di transizione di assorbimento e di emissione. Per approfondimenti vedi referenza 5.

# La morte di una stella, la morte di una stella morta e la sua rinascita

**Rosario Iaria**

Dipartimento di Fisica - Università di Palermo

**Abstract.** Quando una stella muore ha come possibile destino quello di diventare una stella di neutroni. Un oggetto celeste compatto di massa simile a quella del nostro Sole ( $2 \times 10^{33}$  g) concentrata in una sfera di raggio di 10 km. Sebbene comunemente si afferma che le stelle di neutroni siano "stelle morte" discuteremo come questi siano oggetti vivi e molti di essi siano in grado di vivere due volte.

## 1. Introduzione

Una stella, come il nostro Sole, ha un tempo caratteristico di vita dettato dal tempo che essa impiega a bruciare il combustibile nucleare nel suo nucleo, quando tale combustibile si esaurisce la stella si avvia verso la sua morte. Una stella è un oggetto in equilibrio, le forze in gioco che si bilanciano sono la forza gravitazionale, che tende a comprimere radialmente l'oggetto, e la forza di pressione di radiazione dovuta alla produzione di energia termonucleare all'interno del nucleo.

La principale interazione termonucleare nel nucleo stellare è la reazione protone-protone, i protoni hanno una elevata energia cinetica poiché le temperature nel nucleo raggiungono 10-15 milioni di kelvin, l'energia cinetica dei protoni è tale da superare la barriera Coulombiana dovuta alla loro repulsione elettrostatica (sono cariche di egual segno), dall'interazione di due protoni si ha come prodotto finale un atomo di elio e un rilascio di energia. Tale energia è quantificabile in  $E_n = 0.007 m_p c^2$ , dove  $m_p$  è la massa a riposo del protone e  $c$  la velocità della luce nel vuoto.

Come rozza stima, poiché il nucleo è circa il 10% dell'intera massa della stella  $M$ , il numero di protoni nel nucleo può essere parametrizzato in termini di  $M$ , ovvero  $n_p = 0.1M/m_p$ . L'energia nucleare totale prodotta nel nucleo è dunque  $E_n = 0.007 m_p c^2 n_p = 0.007 c^2 0.1 M$ . La luminosità di una stella è l'energia emessa nell'unità di tempo, poiché l'energia emessa è quella prodotta nel suo nucleo il tempo caratteristico di vita della stella è dato da  $\tau_n = E_n/L$ , che riscritto in termini di massa e luminosità del Sole ( $M_{\odot}$  e  $L_{\odot}$ , rispettivamente) diventa:

$$\tau_n = 1.1 \cdot 10^{10} \frac{M}{M_{\odot}} \frac{L_{\odot}}{L} \text{ yr} \quad (1)$$

Il tempo evolutivo di una stella dipende dalla sua massa e dalla sua luminosità. Lo studio di diversi campioni di stelle adulte ha evidenziato che la luminosità e la massa sono legati dalla relazione  $L/L_{\odot} = (M/M_{\odot})^{3.5}$ . Una stella 10 volte più massiccia del Sole è ben 3000 volte più luminosa del Sole stesso; una stella di massa pari a un decimo della massa del Sole è 3000 volte meno brillante. Dunque sostituendo nell'equazione 1 la relazione massa-luminosità otteniamo:

$$\tau_n = 1.1 \cdot 10^{10} \left( \frac{M_{\star}}{M} \right)^{2.5} \text{ yr} \quad (2)$$

più la stella è massiccia e più breve è il suo tempo di vita.

Seguiamo cosa succede ad una stella di  $10M_{\star}$ . Questa rimarrà tranquilla per 35 milioni di anni circa, dopo tale intervallo di tempo avrà bruciato tutto il suo combustibile nucleare (l'idrogeno nel nucleo), non ci sarà più nessuna forza che si opporrà alla gravità, la stella inizierà a contrarsi sotto la spinta gravitazionale, le regioni interne, soggette ad una gravità maggiore, si contrarranno maggiormente rispetto a quelle esterne, le regioni prossime al nucleo aumenteranno la loro temperatura e l'idrogeno inizierà a bruciare negli strati più esterni al nucleo. La pressione radiativa prodotta in tali regioni sarà maggiore della pressione gravitazionale poiché siamo più lontani dal nucleo, gli strati esterni si espanderanno mentre il nucleo si contrarrà. La stella diventerà una gigante rossa, con temperatura superficiale bassa e raggio più ampio.

Il nucleo continuerà a contrarsi sin quando, raggiunti i 200 milioni di Kelvin, inizierà a bruciare elio nel nucleo. In questa fase la stella gigante avrà anche forti venti superficiali e perderà parte della sua massa, il nucleo brucerà elementi più pesanti e li brucerà sempre più rapidamente poiché le temperature sempre più elevate al suo interno porteranno ad un tasso di interazione più elevato degli elementi presenti nel suo nucleo.

Questo frenetico bruciamento del combustibile nel nucleo avrà luogo fin quando non vi sarà che ferro al suo interno. Al contrario degli elementi più leggeri, che interagendo tra loro danno come prodotto finale un elemento più pesante e produzione energetica, l'interazione di due atomi di ferro non può avvenire spontaneamente, deve essere fornita energia dall'esterno affinché due atomi di ferro interagiscano. L'interazione tra i nuclei di ferro è endoenergetica. Dunque il nucleo non avrà più carburante al suo interno, il nucleo crollerà radialmente.

## 2. La fine della stella: meccanica quantistica e relatività speciale si incontrano

In una stella adulta la pressione legata alle reazioni termonucleari al suo interno bilanciano la forza gravitazionale. Se non vi è più combustibile nucleare come può il nucleo dare come prodotto finale una stella di neutroni?

Un pianeta, come la Terra, è un oggetto in equilibrio dove la forza gravitazionale è controbilanciata dalle forze elettrostatiche degli atomi costituenti, nel nucleo di una stella morente la gravità è talmente alta che la distanza tra protoni ed elettroni è inferiore al raggio di Bohr, la materia è globalmente neutra e forze elettrostatiche non si oppongono alla forza gravitazionale.

Entra in gioco la pressione di degenerazione. Questa nasce da 2 proprietà quantistiche della materia:

1. I fermioni obbediscono al principio di esclusione di Pauli: due elettroni (o protoni) non possono coesistere nello stesso stato quantico.
2. Vale il principio di indeterminazione di Heisenberg, ovvero  $\Delta x \Delta P_x \geq \frac{h}{2\pi}$

Se il nucleo centrale è molto denso allora la distanza tra due elettroni può diventare minore di  $\Delta x$ , in tal caso la quantità di moto degli elettroni deve differire di una quantità maggiore di  $\Delta P_x = h / (2\pi \Delta x)$  perché altrimenti i due elettroni avrebbero differenze inferiori alle incertezze intrinseche dettate dal principio di indeterminazione di Heisenberg e risulterebbero uguali.

Nel caso in cui la velocità degli elettroni è non relativistica otteniamo che la pressione di degenerazione è:

$$P_{\text{deg}} = \frac{h^2}{2\pi^2 m_e} \left( \frac{Z}{A} \right)^{5/3} \frac{\rho^{5/3}}{m_p^{5/3}} \quad (3)$$

dove  $Z$  ed  $A$  sono il numero atomico ed il numero di massa,  $m_e$  ed  $m_p$  la massa elettronica e protonica, e  $\rho$  e la densità della materia. Eguagliando la pressione gravitazionale ( $P_{grav} \propto M^2 / R^4$ ) alla pressione di degenerazione ricaviamo che  $R \propto M^{-1/3}$ . Questa relazione massa-raggio vale per oggetti celesti come nane bianche (WD) e stelle di neutroni (NS), è una relazione contro-intuitiva poiché ci dice che più è alta la massa più piccolo è il raggio dell'oggetto.

Nel caso in cui la velocità degli elettroni  $v_x \sim c$  allora la pressione di degenerazione si scrive come  $P_{deg} = 2p_x n c$ . Eguagliando in questo caso pressione gravitazionale e di degenerazione troviamo una condizione sulla massa del nucleo stellare ovvero  $M = 1.4 M_{\odot}$

Questo significa che se il nucleo della stella collassa gli elettroni oppongono una resistenza alla pressione gravitazionale attraverso la pressione di degenerazione, se la gravità è più elevata la velocità degli elettroni, per il principio di indeterminazione di Heisenberg aumenta, ma dalla relatività speciale sappiamo che tale velocità non può essere superiore a quella della luce. Se la massa del nucleo è superiore a 1.4 volte la massa del Sole allora la pressione di degenerazione non si oppone alla pressione gravitazionale ed il nucleo continua a collassare.

Quando la massa del nucleo della stella (costituito da atomi di ferro) raggiunge la massa critica di  $1.4 M_{\odot}$  (limite di Chandrasekhar), esso decade spontaneamente in neutroni attraverso un processo di fotodisintegrazione e cattura elettronica e, sotto l'effetto della sua stessa gravità, il nucleo della stella diventa una stella di neutroni. Tale oggetto è nuovamente in equilibrio, la sua pressione di degenerazione bilancia la pressione gravitazionale poiché adesso la pressione di degenerazione è dettata dai neutroni, che sono un fattore mille più pesanti degli elettroni e dunque con velocità sub-relativistiche.

### 3. Le stelle di neutroni e le pulsar: la vita di una stella morta

Dunque la stella di neutroni è quel che rimane di una stella di circa 10 masse solari. Le stelle di neutroni sono oggetti celesti con massa 1.4 volte quella del sole ma concentrata in un raggio di 10 km (il Sole ha un raggio di settecentomila km). Che tempo può impiegare una NS a ruotare su se stessa? Il nostro Sole impiega circa 25 giorni a compiere un rotazione su stesso. Rozzamente possiamo pensare di comprimere la massa del Sole in una sfera di 10 km, ovvero il volume della NS, nell'ipotesi che il momento angolare del sistema si conservi. Allora:

$$I_i \omega_i = I_f \omega_f \rightarrow T_f = \frac{I_f}{I_i} T_i$$

dove  $I_i, I_f, T_i, T_f$  sono il momento inerziale iniziale e finale ed il periodo di rotazione iniziale e finale. Assumendo una forma sferica per il Sole e per la NS otteniamo che:

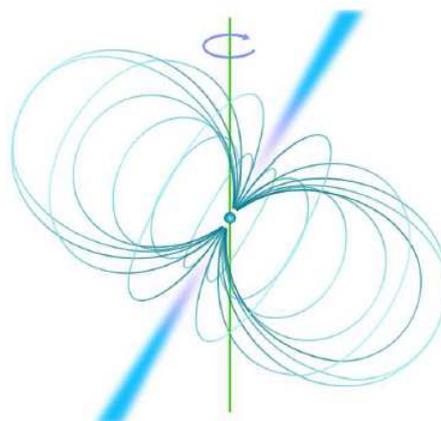
$$T_f = \frac{M_{NS} R_{NS}^2}{M_{\odot} R_{\odot}^2} T_i \simeq 1 \text{ ms}$$

la stella di neutroni può compiere mille giri su se stessa in un secondo. Una nana bianca, che ha un raggio di 10.000 km ha un periodo di rotazione di circa 620 s.

Il limite inferiore al periodo di spin di una stella di neutroni è legato al suo equilibrio meccanico. Ovvero la forza gravitazionale deve essere maggiore o uguale alla forza centrifuga altrimenti l'oggetto celeste si romperebbe. Eguagliando la forza centrifuga alla forza gravitazionale sulla superficie della NS ricaviamo che il periodo minimo di rotazione è:

$$\omega^2 R_{NS} = \frac{GM_{NS}}{R_{NS}^2} \rightarrow P_{\min} = 0.5 \text{ ms} \quad (4)$$

Un'altra caratteristica delle NS è il loro elevato campo magnetico, dell'ordine di  $10^{12}$  gauss (il campo magnetico del Sole è 1 gauss). Questo campo magnetico è causa dell'*effetto faro* delle stelle di neutroni. Una stella di neutroni ruotante con alto campo magnetico è chiamata **Pulsar**, poiché da tali oggetti è emessa luce radio con un periodo che è il periodo di rotazione della stella di neutroni stessa. L'effetto faro ha permesso di individuare più di 1500 pulsar e di censire il loro periodo di rotazione.



**Figura 1:** Il campo magnetico di una NS è dipolare. Se l'asse magnetico è disassato rispetto all'asse di rotazione della stella, l'osservatore vedrà un fascio collimato di luce nella banda radio con un periodo che è il periodo rotazione della NS.

In Figura 2 riportiamo la distribuzione del periodo di rotazione delle pulsar.  
 La stella di neutroni emette come un dipolo magnetico secondo la relazione:

$$\frac{dE}{dt} \propto B^2 \omega^4 \quad (5)$$

dove  $B$  e  $\omega$  sono il campo magnetico e la frequenza angolare della pulsar, ovvero più velocemente ruota la stella di neutroni più velocemente perde energia, cioè l'oggetto rallenta. Da semplici considerazioni di meccanica classica si ottiene la seguente relazione che lega campo magnetico periodo di rotazione e rate di decrescita del periodo rotazionale.

$$B = 3.2 \cdot 10^{19} \sqrt{P\dot{P}} \text{ gauss} \quad (6)$$

Una delle pulsar prototipo è la Crab Pulsar, resto di un'esplosione di supernova avvenuta nel 1054 d.C., come anche riportato dalle cronache cinesi ed arabe.

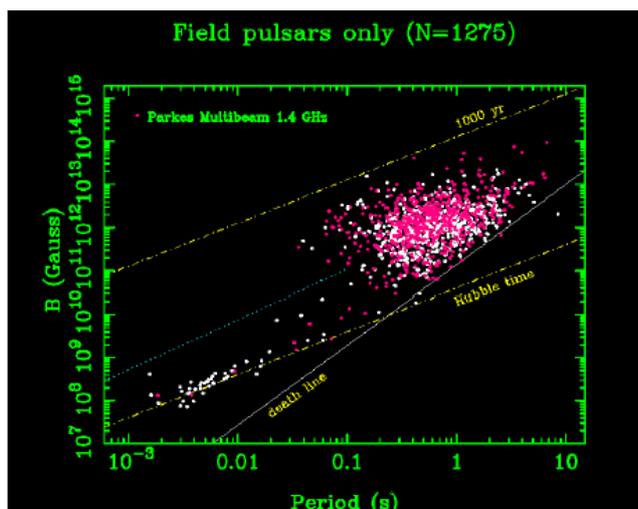


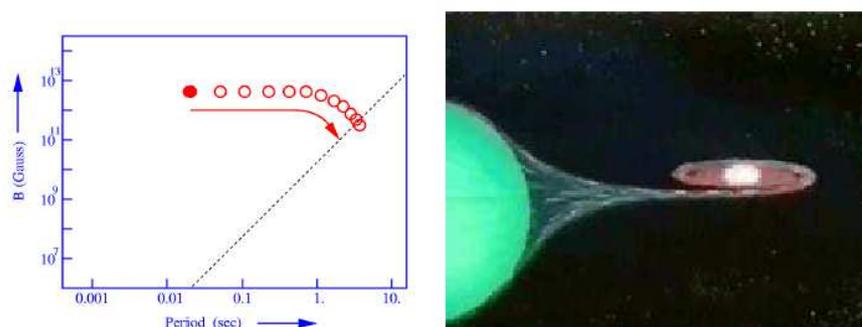
Figura 2: Distribuzione dei periodi di rotazione delle pulsar in funzione del campo magnetico.

La Crab ha un periodo di rotazione  $P$  di 0.033 s ed una derivata del periodo  $\dot{P}$  di  $4.2 \times 10^{-13}$  s/s; combinando questi valori nella eq. 6 troviamo che il campo magnetico della Crab è  $10^{12}$  gauss. Il tempo di vita media di una pulsar (*characteristic age*  $\tau$ ) indica il tempo necessario perché la pulsar subisca, dato il  $\dot{P}$ , una variazione del suo periodo dell'ordine del periodo stesso, cioè il tempo necessario perché la pulsar perda tutta la sua energia rotazionale e si fermi. Questo tempo caratteristico è definito come  $\tau = P / (2\dot{P})$ ; da ciò otteniamo che il tempo di vita restante della Crab pulsar è di appena 1300 anni. In Figura 2 riportiamo la distribuzione dei periodi di rotazione delle pulsar in funzione del campo magnetico. Si nota che i periodi sono compresi tra 2 ms e 10 s. Nel grafico è riportato anche l'*Hubble time*, ovvero il tempo di vita dell'universo parametrizzato in funzione di  $P$  e  $B$ , si nota che al di sotto di tale linea non vi sono pulsar poiché il tempo di vita di un qualsiasi oggetto celeste non può essere maggiore del tempo di vita dell'Universo. Un'altra linea riportata in figura 2 è la *death line*, al di sotto di tale linea una pulsar non emette più in radio poiché il meccanismo fisico di emissione è inibito dai bassi campi magnetici e dagli alti periodi di rotazione, possiamo dire che la zona al di sotto della death line è il cimitero delle pulsar.

Molto più interessante è la discussione sulla distribuzione della popolazione delle pulsar. Dalla figura 2 sembra evidente che vi siano due classi di pulsar: quelle con intensi campi magnetici attorno a  $10^{12}$  gauss e periodi orbitali di circa 1s, e quelle massimamente rotanti con periodi tra 2 e 10 ms, campi magnetici molto bassi dell'ordine di  $10^8 - 10^9$  gauss e tempo di vita prossimo a quello dell'Universo. Il secondo gruppo di pulsar è più vecchio del primo. Abbiamo visto che nel tempo una pulsar perde energia cinetica e rallenta come è possibile che le pulsar più vecchie sono più veloci?

#### 4. Le pulsar possono risorgere

Quando una pulsar invecchia rallenta ed il suo campo magnetico diminuisce. La pulsar si muove sul diagramma P-B come indicato in figura 3, fino a raggiungere il cimitero delle pulsar. A questo punto la pulsar è morta. Questo destino può essere evitato se la pulsar non è isolata, ovvero se essa è legata gravitazionalmente ad una altra stella con la quale interagisce, cioè se la pulsar fa parte di un sistema binario. Circa 80% delle stelle stanno in un sistema binario dunque ciò è molto probabile. Se le due stelle hanno massa diversa la loro evoluzione sarà diversa. Se la stella da cui ha avuto origine la pulsar aveva inizialmente massa maggiore morirà prima dunque il sistema sarà formato da una stella normale e da una pulsar. Quando la compagna ha bruciato il suo combustibile nel nucleo inizia ad espandersi e parte della sua materia accresce sulla pulsar (cattura gravitazionale) con emissione di radiazione X. Si forma così un sistema binario X di bassa massa (LMXB), costituito da una NS (la pulsar morta) ed una stella di massa minore di una massa solare.

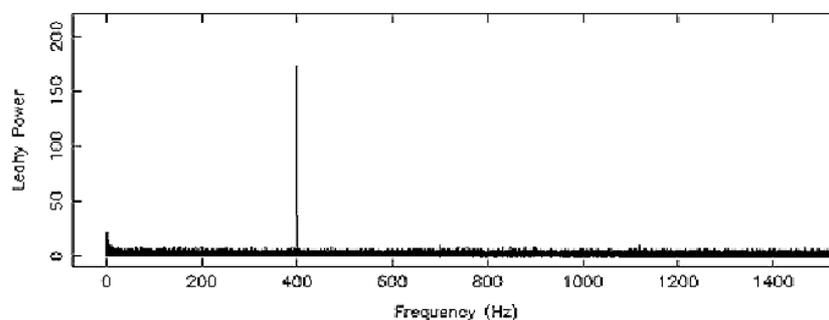


**Figura 3:** sinistra: evoluzione temporale di un pulsar sino alla sua morte in un diagramma B – P; destra: rappresentazione artistica di un sistema binario X di bassa massa.

Il sistema LMXBs ha un tempo di vita di 100 milioni di anni ed in tale intervallo di tempo la NS viene accelerata mentre il suo campo magnetico scende a valori di  $10^8 - 10^9$  gauss.

La materia che accresce sull'oggetto compatto porta con sé momento angolare che accelera la NS (ovvero diminuisce il periodo di rotazione della NS). La teoria del riciclaggio delle pulsar ha avuto conferma nel 1998 quando venne osservato per la prima volta il periodo di rotazione della NS nel sistema binario X SAX J1808.4-3658. In tale sistema la frequenza di rotazione della stella di neutroni è 401 Hz, ovvero  $P \approx 2.5$  ms (vedi figura 4).

Quando la NS non accresce più materia avrà periodi dell'ordine del millisecondo e bassi campi magnetici. L'alta velocità angolare della NS sarà sufficiente a fare riaccendere la NS come pulsar, ovvero la pulsar sarà fuori dal cimitero e la osserviamo come membro della popolazione delle pulsar con tempi prossimi all'età dell'universo e bassi periodi di rotazione.



**Figura 4:** frequenza di rotazione della sorgente SAX J1808.4-3658.

## Bibliografia

- Verbunt F., Origin and evolution of X-ray binaries and binary radio pulsars, ARA&A, 1993, 31, 93-127  
 King, A. R., The evolution of compact binaries, Q. Jl. R. Astr. Soc., 1988, 29, 1-25  
 Longair, M. S., High Energy Astrophysics vol. 2, Cambridge University press, pagg 84-114

## L'importanza degli Studi di Genere (Gender Studies) nella trasmissione del sapere

**Vita Fortunati**

Dipartimento di Lingue e Letterature Straniere Moderne, Università di Bologna

e-mail: vita.fortunati@unibo.it

Il mio intervento vuole essere una testimonianza di una docente che all'interno dell'Università ha cercato di trasmettere a diverse generazioni di studentesse/studenti il patrimonio culturale delle donne. Vorrei nel mio intervento toccare alcuni punti che sono rilevanti all'interno di questo corso dedicato all'aggiornamento degli insegnanti di Scienza. Intendo articolare il mio intervento in quattro punti.

### 1. Le caratteristiche degli Studi di Genere

Gli studi di Genere sono studi transdisciplinari e comparati e mirano a sistematizzare gli sforzi intellettuali delle donne e della tradizione teorica femminista. Fin dal loro inizio gli studi di genere sono stati improntati da una forte esigenza di unire teoria e prassi, di mettere a confronto saperi che per lungo tempo sono stati tra loro separati, oltrepassando le maglie troppe strette dei confini disciplinari.<sup>1</sup> Essi mettono in evidenza come il punto di vista di genere sia una categoria ineludibile e fondamentale della conoscenza. Tale concetto viene sottolineato dalla poetessa e teorica del femminismo Adrienne Rich: "La re-visione- l'atto di riandare al passato, di vedere con occhi nuovi, di guardare un testo vecchio da una nuova prospettiva critica per le donne è più di un capitolo nella storia culturale: è un atto di sopravvivenza. Fino a che non capiremo i presupposti in cui siamo immerse, non potremo capire noi stesse".<sup>2</sup>

### 2. Il concetto di Genere/ Gender

A partire dal 1989 viene introdotto nei dizionari inglesi per il termine *gender* un ulteriore significato accanto a quelli tradizionali di "tipo, classe e specie", di "sesso" e di "genere grammaticale". Il genere viene definito come la sfera degli aspetti sociali e culturali legati alla differenza sessuale.<sup>3</sup> Questa nuova accezione e denominazione di "genere" è frutto degli studi di scienze sociali statunitensi e inglesi.<sup>4</sup> Il termine *genere* nella prospettiva degli studi delle donne vuole mettere in evidenza l'aspetto sociale e culturale, *relazionale* tra due gruppi di attori sociali. In questa accezione la parola *genere* vuole indicare i rapporti materiali e simbolici tra uomini e donne in uno specifico momento storico di una determinata società. È evidente che il *genere* come costruito simbolico e materiale rispecchia i rapporti tra i sessi. Il concetto di *genere* esprime anche il carattere sistematico, sociale e variabile delle relazioni tra i sessi, ma anche quello del loro incardinamento nelle strutture simboliche e ideologiche della società. Appare evidente come *mascolinità* e

---

<sup>1</sup> Per ulteriori informazioni sulle caratteristiche dei Gender Studies vedi *Critiche femministe e teorie letterarie*, a cura di V. Fortunati, R. Monticelli, R. Baccolini, M.G. Fabi, Bologna, Clueb, 1997 e anche V. Fortunati, "Gli studi di genere e il comparatismo: un confronto critico tra discipline" in *Le prospettive di Genere Discipline Soglie Confini* a cura di R. Baccolini, Bologna, Bononia University Press, 2005, pp. 339-352.

<sup>2</sup> A. Rich "When We Dead Awaken: Writing as Re-Vision" in *On Lives, Secrets, and Silence*, New York, Norton, 1979 pp.33-49.

<sup>3</sup> D. Glover, C. Kaplan ed., *Genders*, London, Routledge, 2000

<sup>4</sup> A. Oakley, *Sex, Gender and Society*, London, 1972.

femminilità siano categorie socialmente costruite, in opposizione a sesso che si riferisce invece alle distinzioni biologiche tra maschi e femmina<sup>5</sup>. Il genere è un costrutto sociale in cui interagiscono diversi fattori tra cui la **classe sociale**, l'**etnia** e le **preferenze sessuali**. Per questo motivo gli studi di genere si configurano come un discorso complesso, in cui devono interagire in maniera comparata diversi saperi. L'introduzione del punto di vista di genere nella conoscenza ha permesso a livello analitico di riunire in un solo concetto tutto quello che vi è di sociale, costruito e arbitrario nella ripartizione delle differenze tra sessi, mettendo in luce sia la variabilità tra una società e l'altra, sia la possibilità di mutamento di quella attribuzione. In sintesi, genere indica le **divisioni** (le differenze di ogni tipo), le **diseguaglianze** (le relazioni asimmetriche e gerarchiche) che esistono tra i due gruppi di attori sociali degli uomini e delle donne, mostrandone il carattere artificiale, costruito e arbitrario, ma anche sistematico. Appare quindi evidente che in una prospettiva di genere quando parliamo di sesso ci riferiamo alla biologia, così come quando parliamo di *differenze sessuali*, ci riferiamo a differenze genetiche o a determinati organi riproduttivi interni e esterni. Quando invece parliamo di *genere* ci riferiamo alla cultura e alla socializzazione. Gli studi più recenti hanno cercato di mettere in rapporto il sesso con il genere, non tenendo separate la sfera biologica da quella socio-culturale.<sup>6</sup>

### 3. Il corpo della Donna tra natura e cultura

Recentemente gli studi di genere hanno affrontato il tema del corpo con una prospettiva comparata e transdisciplinare, mettendo in risalto come il corpo sia **un sistema complesso** che è all'interfaccia di più saperi e sul quale per indagarlo si devono gettare diverse maglie concettuali. Occorre mettere in atto una ginnastica insolita e non facile tra una visione "professionale" legata alla propria specificità di ricerca e di studio ed un approccio transdisciplinare. Nella rappresentazione del corpo femminile la dicotomia tra corpo e mente è servita per accentuare la differenza sessuale: da una parte l'uomo che si definisce in rapporto alla mente, al "logos", dall'altra la donna definita in rapporto al proprio corpo, dove la funzione procreativa diventa predominante. Il pensiero patriarcale ha associato la donna alla natura, al corpo, al fisico come materia da domare e addomesticare<sup>7</sup>. Contrapponendosi alla tradizione filosofica occidentale di matrice androcentrica ed eurocentrica, gli studi femministi hanno sottolineato come il corpo sia un costrutto simbolico, situato in uno **specifico contesto storico-culturale**. Il corpo è visto come punto di interazione ("inter-face") soglia, come campo di intersezioni di forze materiali e simboliche; è una superficie dove sono iscritti molteplici codici di potere e di sapere: è una costruzione che trasforma e che capitalizza le energie di natura eterogenea e discontinua. Il corpo come artefatto culturale, non un corpo naturale, determinato biologicamente, un corpo che ha iscritto su di sé un'intera storia, una memoria di codificazioni e di condizionamenti<sup>8</sup>. In molti studi condotti da antropologhe, da studiose femministe che hanno indagato la delicata fase della menopausa viene sottolineato come questo evento biologico<sup>9</sup> sia difficile da definire, un evento che deve essere puntualmente contestualizzato e storicizzato, perché non è un concetto universale, ma è profondamente legato alla storia e alla cultura di un popolo e al soggetto donna che lo sta vivendo. Secondo queste studiose è quindi essenziale un concetto di biologia che mette in primo piano la sua plasticità e la sua stretta interdipendenza con la cultura. Per questo Lock, nel suo libro, sottolinea il concetto della "local biology", una biologia, che deve tenere conto della cultura di ogni paese.

<sup>5</sup> P. Di Cori, Introduzione a *Altre Storie. La critica femminista alla Storia*, Bologna Clueb, 1996

<sup>6</sup> R. Baccolini, Introduzione a *Le prospettive di Genere Discipline Soglie Confini* a cura di Raffaella Baccolini, op.cit., pp. 11-23.

<sup>7</sup> *The Controversial Women's Body: Images and Representations in Literature and Art*, eds Vita Fortunati, Anna Maria Lamarra e Eleonora Federici, Bologna, Bononia University Press, 2003, pp. 157-160.

<sup>8</sup> M. Lock, *Menopause in Japan and North America*, 1995; R. Braidotti, *Nomadic Subjects*, New York. Columbia, 1994 e Donna Haraway, "Situated Knowledge: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective" in *Feminist Studies* 14, 1988, pp. 575-99.

<sup>9</sup> G. German Greer, *The Change Women, Aging and the Menopause*, New York, Ballantine, 1993. Betty Friedan, *The Fountain of Age*, New York, Simon and Schuster, 1993, Le Guin, Ursula, "The Space Crone" in Pearsall, M., ed., *The Other Within Us: Feminist Exploration of Women and Ageing* (Oxford: Westview Press, 1997).

Non solo la menopausa è stata oggetto di studio da parte delle donne-scienziate e dalla medicina di genere, ma anche il corpo della donna anziana è indagato da numerose indagini transdisciplinari<sup>10</sup> volte a decostruire una serie di stereotipi che si sono annidati sulla donna anziana che è stato l'oggetto di una pesante misoginia che si appuntava soprattutto sul corpo della donna anziana e sulla sua sessualità. Si è messo in evidenza che la vecchiaia è un costrutto sociale ed esiste una stretta correlazione tra vecchiaia, genere, classe ed etnia. La donna anziana è stata oggetto rispetto all'uomo di una doppia invisibilità e marginalizzazione<sup>11</sup>.

Gli studi integrati sulla vecchiaia hanno messo bene in evidenza che, da un punto di vista euristico, non è più valida la concezione binaria vecchio/giovane, perché la vecchiaia deve essere studiata longitudinalmente, considerata come un processo. Alla base di questi studi vi è l'idea che l'invecchiamento sia un "rimodellamento", in cui alcune funzioni si riducono rispetto a quelle presenti nel giovane, mentre altre si potenziano per raggiungere equilibri sempre nuovi. Su questa nuova idea della vecchiaia come *reshaping* vi è stata una convergenza tra studi umanistici e studi scientifici. L'identità della persona anziana è infatti multipla, plurima, si gioca su più livelli, perché si è venuta stratificando nel tempo, e continua a plasmarsi e ri-plasmarsi: un'identità potremmo dire "performativa".

#### 4. Donne e Scienza

Le donne scienziate si sono sforzate di decostruire il mito della neutralità della scienza come progressione lineare delle ricerche avulse dal contesto socio-politico ed economico. Nelle riflessioni femministe" ... la scienza è diventata quel luogo abitato da donne e uomini con corpi e mente sessuati, ciascuno con una propria storia radicata in un "habitat" culturale fatto di razza, classe, etnia, religione, sogni ed immaginari, individuali e collettivi che conformano la sua soggettività così come l'oggettività dell'oggetto di studio"<sup>12</sup>.

Le donne scienziate hanno decostruito i pregiudizi di genere insiti nella impresa scientifica evidenziando i meccanismi di esclusione che hanno storicamente tenuto le donne lontano dalla scienza relegandole nell'ambito della sfera privata, fuori dalla sfera pubblica. Tale esclusione si fondava sul pregiudizio della società patriarcale che vedeva nella riproduzione e nella cura della prole il suo ruolo "naturale". In questo senso ha ragione Elisabetta Donini quando afferma che: "le dimensioni della soggettività, della memoria e della storia sono state al centro della rivoluzione femminista in tema di genere e scienza"<sup>13</sup>.

Inoltre esse hanno affermato che esistono nel fare e praticare scienza modalità differenti, alternative che si oppongono ai modelli dominanti imposti dall'universo maschile. Si sono sforzate di dare legittimazione alla vasta esperienza delle donne e alle diverse modalità di essere donne nella scienza.

Un bell'esempio di una scienziata che impose al mondo una nuova modalità di fare scienza è quello di Barbara McClintock come traspare dalla affascinante autobiografia di Evelyn Fox Keller, *In sintonia con l'organismo, la vita e l'opera di Barbara McClintock* (1987)<sup>14</sup>. Fox Keller evidenzia come gli esperimenti e le sue idee fossero in controtendenza con il paradigma dominante. Nonostante fosse osteggiata e tenuta in disparte dalla comunità dei genetisti, Barbara McClintock fu autrice di una delle scoperte più importanti nella genetica della seconda metà del Novecento, la trasposizione genica. Un personaggio chiave per la nascita della biologia molecolare attorno a cui girano i padri fondatori della biologia molecolare, da Watson e Crick, Luria e Delbrück. L'instancabile dedizione verso la cura del ciclo riproduttivo del mais, la scrupolosa registrazione dei dati sperimentali e soprattutto l'eccezionale capacità di osservazione al microscopio, la portarono alla scoperta dei geni mobili, elementi genetici presenti nei cromosomi capaci di spostarsi da una

<sup>10</sup> V.Fortunati, *The Controversial Female Body: New Feminist Perspectives on Aging*, in *Cadernos de Literatura Comparada 2. Identidades no feminino*, eds Maria de Fátima Outerinho and Rosa Maria Martelo, Porto, Granito, 2001, pp. 85-102.

<sup>11</sup> S.Sontag, "The Double Standard of Aging", in M.Pearsall(ed). *The Other Within us. Feminist Explorations of Women and Aging*, Boulder, Westview, pp.19-24.

<sup>12</sup> E. Grosso "Corpo e Genere tra natura e cultura: la riflessione femminista sulla scienza" in *Le prospettive di Genere Discipline Soglie Confini* a cura di R. Baccolini, Bologna, Bononia University Press, 2005, p.252.

<sup>13</sup> E. Donini: "La questione del Genere nella Scienza, Che cosa resta?" in *Studi di Genere e memoria culturale Women and Cultural Memory*, a cura di V.Fortunati, G. Golinelli e R. Monticelli, Bologna, Clueb, 2004, p.255.

<sup>14</sup> E. Fox Keller, *In sintonia con l'organismo, la vita e l'opera di Barbara McClintock*, Milano, la Salamandra, 1987.

posizione all'altra del genoma. Solo dopo cinquant'anni, nel 1983 Barbara ebbe il riconoscimento scientifico che si meritava e fu vincitrice a ottantuno anni del premio Nobel.

Qual è stato il maggiore contributo delle donne scienziate ai *Gender Studies*?

Le donne scienziate hanno mostrato un grande interesse per gli aspetti etici della scienza. Importanti sono i contributi delle donne nell'ecofemminismo che hanno sottolineato il diritto dell'auto determinazione nei temi della maternità e dell'aborto<sup>15</sup>. Sono anche molto significativi i contributi di Vandana Shiva quando critica gli effetti nefasti che la riduzione dell'acqua, della terra, delle foreste a merci ha avuto sulla vita delle donne indiane<sup>16</sup>. Le donne scienziate hanno avuto e hanno la funzione di esprimere una voce critica all'interno della comunità scientifica perché hanno evidenziato i processi di condizionamento a cui è soggetta la scienza in rapporto alla società e al mercato globale.

In questi ultimi trent'anni molte e utili sono state le iniziative promosse dalle donne scienziate all'interno della Comunità europea per favorire una politica di *mainstreaming* di genere nelle linee di sviluppo della ricerca scientifica.

Nella Guida relativa al VI Programma Quadro (FP6) del Dicembre del 2002 si sottolinea che la relazione tra donne e ricerca va vista a tre livelli in modo da 1- incoraggiare la partecipazione delle donne; 2- indirizzare la ricerca verso i bisogni delle donne così come degli uomini; 3-contribuire ad accrescere la comprensione delle questioni di genere. Nella guida una frase riassume, a mio avviso, quanto sia importante decostruire il mito che la scienza sia "neutrale", ricostruire e trasmettere un sapere scientifico al femminile: "Promuovere le donne non significa trattarle allo stesso modo degli uomini; anzi in una realtà in cui gli uomini sono spesso assunti come norma per assicurare l'uguaglianza di genere vanno prese in considerazione le differenze nei percorsi di vita, nei bisogni, negli interessi, sicché il *mainstreaming* di genere include anche un cambiamento della cultura corrente"<sup>17</sup>.

## **5. Qualche proposta per introdurre la dimensione di genere nelle scuole.**

Come ultimo punto del mio intervento vorrei proporre due strategie per introdurre la dimensione di genere nelle scuole.

La prima è quella di usare la biografia quale strumento privilegiato per comprendere il lavoro delle donne nella scienza. Lo studio della vita delle scienziate del passato e delle loro scoperte può avere non solo la funzione di proporre alle giovani generazioni dei modelli a cui rifarsi, ma anche può servire ad accostarle in maniera semplice all'universo della scienza. La biografia si presenta come un utile strumento per comunicare al pubblico anche dei non esperti gli aspetti più controversi del lavoro in campo scientifico.

Recentemente ho studiato la biografia di Marie Curie, che come ebbe a dire Mitterand, è stata ed è per le donne una icona e sarà anche per i secoli a venire fonte di ispirazione per le donne. Nel discorso tenuto in occasione della cerimonia di sepoltura al Pantheon il 20 Aprile del 1995 Mitterand disse a questo proposito: "La cerimonia odierna è un peccato rivolgersi da parte nostra dal Panthéon alla prima donna della nostra onorata storia. E' un altro simbolo che cattura l'attenzione della nostra nazione, la lotta esemplare di una donna che decise di imporre le sue capacità in una società in cui abilità, indagine intellettuale e responsabilità pubblica erano riservate agli uomini"<sup>18</sup>.

Mi sono servita per analizzare la vita di questa scienziate polacca non solo di alcune biografie recenti su Marie Curie<sup>19</sup>, ma anche della sua autobiografia e delle sue lettere. Studiando questo materiale ho rilevato gli aspetti contraddittori e complessi della personalità di Marie Curie: aspetti che si celano dietro l'immagine pubblica della scienziate che la stessa Curie seppe costruire con abilità per ottenere finanziamenti per la sua

<sup>15</sup> C. Merchant, *La morte della natura. Donne, Ecologia e rivoluzione scientifica*, Milano, Garzanti 1988.

<sup>16</sup> V. Shiva, *Monocultura delle menti. Biodiversità, biotecnologia e "agricoltura" scientifica*, Torino, Bollati, 1995.

<sup>17</sup> I documenti relativi al VI Programma Quadro sono reperibili nel sito [http://fp6.cordis.lu/fp6/call\\_details](http://fp6.cordis.lu/fp6/call_details)

<sup>18</sup> Discorso di François Mitterand citato in Introduzione a B. Goldsmith, *Genio ossessivo, Il mondo interiore di Marie Curie*, Torino, Codice edizioni, 2006, xvi.

<sup>19</sup> S. Quinn, *Marie Curie, a Life*, 1995, B Goldsmith, *Obsessive Genius. The Inner World of Marie Curie*, 2005.

ricerca. Dietro al volto impassibile di scienziata dedita al lavoro di ricerca che Marie Curie mostrava al mondo, si nascondeva una donna complicata, appassionata, soggetta a profonde depressioni. Lo studio del materiale autobiografico e biografico permette di vedere come Marie Curie vivesse in maniera schizofrenica, drammatica la sua doppia condizione di donna e di scienziata, i suoi due ruoli di madre, moglie e di donna dedita alla ricerca. Due ruoli che nella Parigi del primo Novecento non potevano convivere in maniera armonica perché, pur essendo alle soglie della modernità, la società parigina era ancora legata ad una morale ottocentesca che voleva la donna moglie fedele dedita al marito.

Inoltre attraverso le fonti biografiche ho analizzato i contatti che Pierre e Marie Curie ebbero con la parapsicologia e soprattutto la loro partecipazione alle sedute spiritiche di Eusapia Paladino. Questo aspetto, poco studiato dalle biografie sulla scienziata, viene anche messo in risalto dal romanzo-biografia di Per Olov Enquist<sup>20</sup>. Lo scrittore infatti immagina un rapporto di amicizia tra Marie Curie e una delle pazienti più famose di Charcot Blanche Whitman per sottolineare come il Novecento si apra con questa interessante commistione di razionalità illuminista e irrazionalismo.

Inoltre attraverso le biografie delle donne scienziate si può rileggere la storia della scienza da una prospettiva femminile e ricostruire così una genealogia della scienza "al femminile". Una storia che mette in luce come l'universo della scienza non sia solo popolato da uomini, ma anche da donne che hanno fatto importanti scoperte anche se spesso sono state circondate da un ambiente ostile. Inoltre studiare le biografie permette di esaminare da vicino le varie fasi della scoperta scientifica e di scoprire come vi sia un'alta dose di creatività, una creatività che accomuna l'attività scientifica a quella artistica. Infatti lo scienziato, il poeta o lo scrittore possiedono la capacità di "de-familiarizzare" la realtà, di guardarla con occhi estranei e quindi di scoprire nessi inediti e reconditi nella realtà che ci circonda.

Un'altra strategia interessante è quella di usare il teatro come mezzo per rappresentare la storia delle donne scienziate. Vorrei fare un esempio: recentemente a Bologna all'interno di un progetto europeo *Acume 2 Interfacing Sciences and Humanities* abbiamo messo in scena l'opera teatrale di Jane Cox *Il desiderio di conoscere* incentrata sulla vita di Barbara McClintock, che dedicò tutta la sua vita ad indagare la pianta meravigliosa del mais che si fertilizza da sola, una pianta differente dalle altre, autonoma per natura. Anche Barbara era una scienziata intrepida ostinata, riservata e originale, ma soprattutto pioniera sia nella scienza che nella vita. Questa pièce che è stata rappresentata per la prima volta in Italia ha avuto un grande successo: la storia della vita di questa scienziata e di come sia arrivata alla scoperta dei geni saltanti nel mais ha avuto una grande forza di attrazione sulla platea e ha tenuto avvinta l'attenzione dei giovani. Il dare un volto alle grandi scoperte scientifiche e penetrare nella personalità e nell'ambiente in cui vissero le grandi scienziate è, a mio avviso, un modo efficace per avvicinare i giovani alla scienza.

---

<sup>20</sup> Per Olov Enquist, *Boken om Blanche och Marie* (2004) traduzione italiana di K.De Marco, *Il libro di Blanche e Maria*, Iperborea, 2006.

## Dal tempo biblico al tempo geologico

**Valerio Agnesi**

Dipartimento di Geologia e Geodesia, Università degli Studi di Palermo

e-mail: valerio.agnesi@unipa.it

*"Dio creò l'Universo il 23 ottobre 4004 a.C., a mezzogiorno in punto"*. Nel 1650, con questa perentoria affermazione, James Ussher (1581-1656), arcivescovo anglicano di Armagh, in Irlanda, sembrava togliere qualsiasi dubbio sull'età della Terra. Infatti nei *Annales Veteri Testamenti*, basandosi su complicati calcoli biblici, ricostruiva la cronologia degli eventi giungendo fino all'istante preciso della creazione.

In realtà Ussher, a parte la pignolesca precisione dell'orario, non aggiungeva nulla di nuovo alle credenze che fino a quel momento avevano riguardo all'età della Terra.

Credenze che erano profondamente radicate nella cultura dell'epoca e si corroboravano della lettura puntuale del testo biblico, in piena sintonia con quanto narrato nel Genesi<sup>1</sup> e dalla profezia di Elia.

Quest'ultimo, infatti, aveva profetizzato che *"il mondo sarebbe esistito per 6000 anni, di questi 2000 sarebbero stati di vuoto, 2000 avrebbero costituito il periodo della Torah e 2000 l'epoca del Messia"* dopo di che si sarebbe verificata l'Apocalisse, con la fine del mondo e l'affermazione del Regno dei Cieli.

I seimila anni, tra l'altro, erano un multiplo dei sei giorni della creazione, riconducendo tutto ad un unico grande disegno del Creato, ove i numeri assumevano un significato profondamente simbolico.

Così, nel corso dei secoli, pensatori e uomini di cultura e di scienza non avevano ritenuto di doversi affannare su un problema che, in fondo, non era particolarmente interessante, lasciando ai Cronologisti il compito di raccapazzarsi tra le complicate genealogie bibliche; tutti i testi, dalla cosiddetta Bibbia dei Settanta (scritta intorno al 280 a.C. circa), agli scritti di Flavio Giuseppe (37-100 d.C.), di Sesto Giulio Africano (160-240 d.C.) o di Eusebio di Cesarea (265-340) concordavano nell'attribuire alla Terra un'età di circa 6000 anni.

Del resto una maggiore durata dei tempi, oltre ad essere in contrasto con la Bibbia, non serviva praticamente a nulla.

La lettura della Bibbia forniva, infatti, una comoda spiegazione sull'origine della vita sulla Terra<sup>2</sup>.

L'origine della vita, abbandonata qualche timida ipotesi di tipo evoluzionistico che era stata avanzata dai pensatori greci, veniva ricondotta alla creazione e rientrava perfettamente entro gli schemi cronologici universalmente accettati; questo fatto, che comportava ovviamente l'immutabilità delle specie, costringeva i filosofi della natura ad avanzare strane ipotesi o congetture per spiegare i frequenti ritrovamenti di fossili nelle rocce sedimentarie.

*"Per molti secoli i fossili avevano eccitato la curiosità e stimolato l'immaginazione, tanto che erano state avanzate innumerevoli e fantasiose spiegazioni; erano considerati opera di spiriti, buoni o cattivi, o il risultato di radiazioni del sole o delle stelle, o semplicemente scherzi di dubbio gusto del regno minerale, che aveva imitato forme tipiche delle piante e degli animali"*<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> In principio Dio creò il cielo e la terra. Ora la terra era informe e deserta e le tenebre ricoprivano l'abisso e lo spirito di Dio aleggiava sulle acque. Dio disse: *"Sia la luce!"*. E la luce fu. Genesi, 1, 1-3

<sup>2</sup> Dio creò i grandi mostri marini e tutti gli esseri viventi che guizzano e brulicano nelle acque, secondo la loro specie, e tutti gli uccelli alati secondo la loro specie. Dio fece le bestie selvatiche secondo la loro specie e il bestiame secondo la propria specie e tutti i rettili del suolo secondo la loro specie. E Dio vide che era cosa buona. Genesi, 1, 21-25

<sup>3</sup> H. Read, *Geologia: introduzione alla storia della Terra*.

Secondo la teoria del *seme pietrificante* le pietre, i minerali, i cristalli e i fossili contenevano in sé un'anima vegetativa, attraverso la quale nascevano, crescevano, si alteravano e poi si decomponavano; i fossili quindi si sarebbero generati dall'unione di un elemento femminile (prodotto sulla superficie terrestre dalla "fermentazione" di vapore che si generava per il contatto dell'acqua piovana con il calore del centro della terra), con il vapore stesso.

Un'altra teoria, quella del *succus lapidescens* o dello *spirito pietrificante*, si rifaceva alla concezione secondo cui sulla superficie terrestre circolava un fluido, presente nelle acque e nell'aria, che, passando attraverso le fessure della terra, riusciva a trasformare alcune sostanze in pietra.

Una scuola di pensiero arrivava ad attribuire la presenza dei fossili a dei veri e propri "scherzi della natura" (*lusus naturae*); secondo questa idea la natura si sarebbe divertita a formare sulle pietre disegni che imitavano il mondo degli esseri viventi durante le pause della creazione.

Lo stesso termine *fossilia* (dal latino *foedere*: scavare) si utilizzava per denominare un'ampia categoria di corpi che comprendeva i cristalli, le rocce, i minerali ed i fossili, dalla forma organica ma di sostanza pietrosa.

Alla fine del XIII secolo, Ristoro D'Arezzo (1239-1282) ne *La Composizione del Mondo* (1282) individua nei fossili i resti di organismi trasportati, insieme ai sedimenti a formare i rilievi, ad opera degli sconvolgimenti causati dal biblico Diluvio Universale.

La teoria del Diluvio ebbe numerosi seguaci nel mondo scientifico di allora, soprattutto a partire dal quindicesimo secolo: i fossili venivano quindi a costituire una prova degli effetti del Diluvio. Il vero problema era di ordine cronologico: non stava nel verificare se fosse avvenuto il Diluvio o meno, quanto nello stabilire il *quando* di questo evento. Si era ancora indissolubilmente legati ad un concetto di tempo umano e non geologico.

In questo dibattito spicca il genio di Leonardo da Vinci (1452-1519) che nei suoi schizzi e negli appunti, individua l'origine dei fossili in resti pietrificati di organismi che vivevano in un mare ancestrale, che molto tempo prima avrebbe sommerso proprio quei luoghi in cui si trovavano<sup>4</sup>.

Si avvia quindi un percorso non semplice, anche tenendo conto che la creazione del mondo, così come descritta dalla Bibbia e le cosmogonia e cronologia conseguenti, erano divenuti un assioma della dottrina cristiana. E professare idee contrarie era estremamente rischioso<sup>5</sup>.

È comunque a partire dalla seconda metà del sedicesimo secolo che si comincia a riconoscere "ufficialmente" la natura organica dei fossili, grazie soprattutto all'opera di artisti e studiosi come lo svizzero Corrado Gessner (1516-1565), Ulisse Aldrovandi (1522-1605), Fabio Colonna (1567-1640), Niels Stensen (1638-1686), meglio conosciuto come Nicola Stenone, e il pittore e naturalista siciliano Agostino Scilla (1629-1700).

A corrette interpretazioni di resti fossili (ad esempio le *glossopetre*, prima ritenute lingue pietrificate di serpenti e poi correttamente riconosciute come resti fossili di denti di pesci) si affiancano inverosimili ricostruzioni di esseri fantastici, anche da parte di studiosi seri ed attenti<sup>6</sup>.

D'altronde ancora nella prima metà del Settecento il grande naturalista svedese Carl Nilsson Linnaeus, (Linneo, 1707-1778), a cui va riconosciuto l'enorme merito di aver regalato alla scienza la moderna classificazione degli esseri viventi, si professava un convinto assertore della tesi della immutabilità delle specie, dichiarando che "*tot sunt species quot ab initiis Deus creavit*".

Uno dei primi a porsi il problema dell'età della Terra, scardinando i limiti imposti dalla Bibbia, è Benoît de Maillet (1675-1738), diplomatico e viaggiatore francese che nella sua opera principale il *Telliamed*, pubblicato postumo nel 1748 ad Amsterdam, formula interessanti ed innovative ipotesi sull'origine degli esseri

<sup>4</sup> "E sopra le pianure d'Italia, dove oggi volan li uccelli a torme, solean discorrere i pesci a grandi squadre; a noi basta la testimonianza delle cose nate nelle acque salse ritrovarsi nelli alti monti, lontani dalli mari." Codice Leicester.

<sup>5</sup> Basti ricordare il processo cui fu sottoposto Galileo, ad opera del Sant'Uffizio, per le sue teorie cosmogoniche, in contrasto con quelle ufficiali, che portarono alla sua famosa abiura: "Io Galileo Galilei ho abiurato, giurato, promesso e mi sono obbligato come sopra; et in fede del vero, di mia propria mano ho sottoscritta la presente cedola di mia abiurazione et recitata di parola in parola, in Roma, nel convento della Minerva, questo dì 22 Giugno 1633."

<sup>6</sup> Vedasi la ricostruzione fantastica di un unicorno fornita da Otto Von Guericke (1663) e pubblicata da Leibniz (1646-1716) nel 1749 nel Protogea.

viventi ed ipotizza per la Terra un'età di circa **2 milioni di anni**, tempo che egli riteneva necessario affinché le acque che all'inizio sommergevano in maniera uniforme tutto il globo, si ritirassero fino alla situazione attuale. La teoria era, per quei tempi audace, tuttavia le bizzarrie dell'autore, a cominciare dal titolo del libro (il suo cognome letto al contrario) e dal fatto che esso era infarcito di dottrine orientali, fecero sì che le sue affermazioni non venissero prese in considerazione.

Successivamente è la volta di Georges-Louis Leclerc, conte di Buffon (1707-1788) che, nella sua *Histoire naturelle*, pubblicata in 36 volumi dal 1749 al 1789, afferma che la Terra si sarebbe generata dalla collisione tra il Sole ed alcune comete e che pertanto essa sarebbe stata caratterizzata all'inizio da una temperatura molto elevata. Buffon avanza, inoltre, l'ipotesi dell'esistenza di un oceano globale primordiale, che avrebbe ricoperto uniformemente tutta la superficie della Terra, le cui acque si sarebbero progressivamente ritirate, causando l'emersione degli attuali continenti. Tutto ciò rendeva necessario ammettere una età molto antica della Terra. La teoria fece molto scalpore, anche per il peso scientifico dell'autore e, ritenuta in contrasto con la scienza ufficiale, venne rifiutata dalla accademia. Fatto questo che costrinse Buffon ad una ritrattazione che, in pieno Secolo dei Lumi, ricorda molto l'abiura galileiana<sup>7</sup>.

Tuttavia lo stesso Buffon, circa trent'anni dopo, quando i tempi erano evidentemente diventati più favorevoli, ritorna sulla sua ipotesi relativa all'età della Terra. Infatti ne *Les époques de la nature*, pubblicato nel 1778, Buffon, riprendendo la sua ipotesi di una originaria sfera di fuoco e ferro e conducendo esperimenti sui tempi di raffreddamento di questo elemento, afferma che la Terra avrebbe impiegato circa 75.000 anni per raffreddarsi fissandone in tal modo l'età. Intanto sul campo i geologi constatavano che le stratificazioni delle rocce, se correttamente interpretate, potevano rivelare una gran quantità di informazioni e consentivano ricostruzioni cronologiche alle quali i limiti temporali imposti dalla scienza ufficiale risultavano sempre più stretti.

Per far quadrare le cose bisognava pensare ad un periodo di tempo molto più lungo. Ma le resistenze erano notevoli. Così se il geologo tedesco Abraham Gottlob Werner (1749-1817), per aver attribuito alla Terra l'età di un milione di anni, venne tacciato di ateismo, Gorge Cuvier (1769-1832) non si spinse al di là di qualche migliaio di anni per la sua geocronologia.

La svolta tuttavia avviene alla fine del Settecento, quando gli studi del naturalista scozzese James Hutton (1726-1797), iniziarono a svelare il mistero della durata dei tempi geologici, allungandoli a dismisura.

I fondamenti del pensiero geologico di Hutton, che si era andato formando grazie a numerose escursioni in diversi luoghi della Scozia ed attente analisi delle successioni rocciose affioranti, sono il senso del perenne movimento/mutamento delle forme della superficie terrestre, la nozione di tempo infinitamente dilatata, la persistenza dei processi di cambiamento, l'impostazione anti catastrofista.

Riguardo alla età della Terra, Hutton sostiene come sia impossibile stabilire un determinato ordine di grandezza, un periodo certo, e che risulti, invece, più opportuno ipotizzare tempi di durata notevole, certamente enormemente superiore a quanto si credeva fino a quel momento, per aver prodotto la attuale configurazione della Terra.

Nella conferenza che terrà alla Royal Society di Edimburgo il 7 marzo 1785, dove presenta la sua nuova teoria geologica, Hutton afferma, tra l'altro: “*Quale è stato l'arco temporale necessario perché tutto questo grande processo sia potuto avvenire?... per quel che concerne l'osservazione umana, questo mondo non ha ne inizio ne fine.*”

Saranno questi concetti che, opportunamente rielaborati, consentiranno al grande geologo inglese Charles Lyell (1797-1885), qualche decennio più tardi, di tracciare le linee guida entro cui si sarebbe sviluppata la nuova scienza geologica.

Lyell studia geologia ad Oxford, allievo di William Buckland (1774-1856), laureandosi nel 1819. Nel 1821 visita l'Inghilterra meridionale. Nel 1823 viaggia in Francia, dove conosce Cuvier e il geologo Costant

---

<sup>7</sup> “Dichiaro che non ho intenzione alcuna di contraddire la Scrittura; che credo sommamente in tutto ciò che attiene la Creazione, sia per quanto concerne la successione temporale sia in questioni di fatto; e rinnego ogni affermazione del mio libro relativa alla formazione della Terra, e più in generale tutto ciò che possa essere contrario al racconto di Mosè”. Lettera di Buffon all'Università della Sorbona, 1751

Prévost. Nel 1824 visita la Scozia, soffermandosi sui luoghi huttoniani, tra cui il celebre *Siccard Point*. Infine nel 1828 visita l'Alvernia e i vulcani dell'Italia meridionale (Ischia, Vesuvio, Etna). Le osservazioni e i dati acquisiti gli consentiranno di mettere a fuoco la sua teoria geologica che illustrerà nei "Principi di Geologia", la cui prima edizione viene pubblicata nel 1830.

Si tratta di un'opera, per quei tempi, rivoluzionaria, dove, con il supporto di inoppugnabili prove sul terreno, elenca i paradigmi della moderna geologia: il presente è la chiave del passato; le leggi naturali sono costanti nel tempo e nello spazio; la natura opera sulla Terra con modalità uniformi ("attualismo"); la Terra è sede di processi lenti, graduali e regolari con innumerevoli trasformazioni in sovrapposizione su tempi lunghissimi ("gradualismo"); la Terra conserva il suo aspetto e la sua uniformità strutturale d'insieme ("uniformità dello stato fisico"); la Terra è incommensurabilmente antica ("*Non c'erano prove di un inizio, né indizi di una fine*" scriverà al riguardo). I risultati saranno clamorosi e consentiranno lo sviluppo di scenari inimmaginabili solamente pochi anni prima.

Proprio lo sviluppo della geologia e la percezione della enorme durata dei tempi geologici (e quindi dell'età della Terra) apriranno la strada alle teorie evoluzionistiche di J.B. Lamarck (1744-1829) e, soprattutto, di Charles Darwin (1809-1882). Infatti, nelle lunghe ore di ozio durate la navigazione del *Beagle*, leggendo il trattato di Lyell ancora fresco di stampa (uno dei pochi libri che aveva potuto portare a bordo), Darwin troverà la chiave che gli consentirà di elaborare la sua teoria.

Allungando, infatti, i tempi della geologia, ben oltre i ristretti limiti della interpretazione biblica, avrà a disposizione i tempi giusti per collocarvi l'evoluzione degli esseri viventi.

*"Mentre ero, in qualità di naturalista, a bordo del vascello di S.M. Britannica Beagle, rimasi profondamente colpito da certi fatti relativi [...] ai rapporti geologici tra gli abitanti attuali e quelli antichi di detto continente [l'America Meridionale]. Mi sembrò che questi fatti contenessero qualche elemento riguardante l'origine delle specie, questo mistero dei misteri, secondo l'espressione di uno dei nostri maggiori filosofi."*<sup>8</sup>

*"Stavo diventando zelante discepolo della teoria del Signor Lyell"*, scriverà Darwin, nel 1832, ad un amico. A partire da Lyell, quindi, gli scienziati, oramai liberi da condizionamenti di qualsiasi tipo, faranno a gara per stabilire l'età della Terra.

Nel 1862, William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907), pubblica il saggio "*On the Secular Cooling of the Earth*", nel quale, basandosi sul raffreddamento della Terra, calcola un'età compresa tra 20 e 400 milioni di anni: questa sarà poi successivamente, dallo stesso Lord Kelvin, fissata in **20 milioni di anni**.

Nel 1907 Bertram B. Boltwood (1870-1927), avvalendosi del tempo di decadimento del radio e della trasformazione, per decadimento, dell'uranio in piombo, propone un'età della Terra compresa tra **400 e 2200 milioni di anni**.

Quindi è la volta di Arthur Holmes (1890-1965) che nel 1913 pubblica "*The Age of the Earth*" nel quale stimava l'età della Terra in **1600 Ma** (milioni di anni), successivamente aumentata a (**4500 ± 100 Ma**) sulla base del calcolo dei rapporti isotopici dell'uranio.

Negli anni Trenta e Quaranta del XX secolo, gli studi dei cosiddetti "*geologi dell'isotopo*" (ancora A. Holmes, e poi Alfred Nier, E. Gerling, Fritz Houtermans) allungano questi tempi a circa **3 miliardi e 300 milioni di anni**.

Infine Clair Cameron Patterson (1922-1995) nel 1953, utilizzando un sistema di datazione basato sulla quantità di isotopi di piombo ed uranio presenti nei meteoriti determina con esattezza l'età della Terra in **4,55 miliardi di anni**, valore oggi universalmente accettato dalla comunità scientifica.

## **Bibliografia**

- Agnesi V., Di Patti C., Truden B. *L'elefante nano. Storie di giganti e mostri in Sicilia*. Kalos, Palermo. 2007.  
Darwin C. *L'origine delle specie per selezione naturale*. Londra. 1859. (Traduz. italiana di C. Balducci).  
Newton Comptom Editori, Roma. 2009.  
Read H. *Geologia: introduzione alla storia della Terra*. Laterza, Bari. 1971.  
Repcheck J. *L'uomo che scoprì il tempo*. Raffaello Cortina Editore, Milano. 2004.

---

<sup>8</sup> C. Darwin. L'origine delle specie.

*Atti della Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze  
"Il tempo nella Scienza, la Scienza nel tempo", Agrigento, 27-31 luglio 2009  
Quaderni di Ricerca in Didattica (Science)", n. speciale 1, 2011*

**Quaderni di Ricerca in Didattica (Science), Numero speciale 1**

Editor in Chief: Claudio Fazio – University of Palermo, Italy

Deputy Editor in Chief & Editorial Director: Benedetto di Paola - University of Palermo, Italy

ISSN on-line 1592-4424

First edition, May 2011