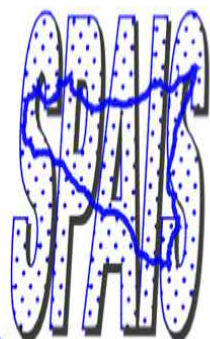


SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO
DEGLI INSEGNANTI DI SCIENZE



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



V EDIZIONE \approx MATERIA & LUCE

CATANIA 4 · 8 NOVEMBRE 2011

A cura di

Michele A. Floriano
Anna Caronia



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

Quali conoscenze di base per comprendere l'innovazione?

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

V edizione: "MATERIA & LUCE"

CATANIA, 4 – 8 NOVEMBRE 2011

Editors:

Michele Antonio Floriano

Anna Caronia

Quaderni di Ricerca in Didattica (Science), Numero speciale 3

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

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

ISBN 978-88-907460-1-7

First edition, January 2013

SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO DEGLI INSEGNANTI DI SCIENZE



MATERIA & LUCE

Catania
4 - 8 novembre 2011

A cura di:

**Michele Antonio Floriano
Anna Caronia**

*Atti della Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze
"Materia & Luce", Catania, 4-8 novembre 2011
Quaderni di Ricerca in Didattica (Science)", n. speciale 3, 2013*

Indice

Programma della Scuola

7

Prefazione

di Michele A. Floriano e Anna Caronia

Materia e luce

8

1 Giuseppe Gembillo

Materia e luce. Louis de Broglie tra "orgoglio e pregiudizio"

9

2 Menico Rizzi

Dai geni ai cristalli: l'uso della biocristallografia nella ricerca biomedica e biotecnologica

14

3 Mariano Venanzi

Luce e molecole. Tre pezzi facili

19

4 Paola Quatrini

Procarioti dalle mille risorse: nuove scoperte sui metabolismi batterici che utilizzano la luce

26

5 Fabio Caradonna

Luci ed ombre sul DNA: non è solo un modo di dire!

34

6 Giovanni Magliarditi

Radioattività ambientale

38

7 Giovanni Villani

Materiale e immateriale in interazione

48

8 Margherita Venturi

Vivere e convivere con le radiazioni

53

9 Elena Ghibaudi

La proteina verde fluorescente ovvero come una medusa rivoluzionò la biochimica

59

10 Mauro Cavallaro

La bioluminescenza nei pesci batifili dello Stretto di Messina
64

11 Elisabetta Oddo

Nuove frontiere della fotosintesi clorofilliana: la foglia artificiale
75

12 Delia Chillura Martino

Metodi non distruttivi per la diagnosi di beni culturali
80

13 Autori vari

Lavori di gruppo
87

Atti della Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze
"Materia & Luce", Catania, 4-8 novembre 2011
Quaderni di Ricerca in Didattica (Science)", n. speciale 3, 2013



Scuola Permanente per l'Aggiornamento
degli Insegnanti di Scienze

programma 4 · 8 novembre 2011

▶ venerdì 4

ore 15·00

Registrazione

ore 16·30

Salute e Apertura dei lavori

ore 17·00

Materiale e immateriale in interazione

GIOVANNI VILLANI

CNR · PISA

ore 18·00

Louis de Broglie fra orgoglio e pregiudizio

GIUSEPPE GEMBITO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI MESSINA

▶ sabato 5

ore 9·00

Dai geni ai cristalli: l'uso della biocristallografia
nella ricerca biomedica e biotecnologica. I Parte

MENICO RIZZI

DISCAFF · UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL PIEMONTE ORIENTALE · NOVARA

ore 10·00

Luce e molecole

MARIANO VENANZI

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI ROMA 'TOR VERGATA'

ore 11·00 ~ intervallo

ore 11·30

Dai geni ai cristalli: l'uso della biocristallografia
nella ricerca biomedica e biotecnologica. II Parte

MENICO RIZZI

DISCAFF · UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL PIEMONTE ORIENTALE · NOVARA

ore 12·30 ~ dibattito

ore 15·30 ~ esercitazioni

▶ domenica 6

ore 9·00

Vivere e convivere con le radiazioni

MARGHERITA VENTURI

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

ore 10·00

La Proteina verde fluorescente ovvero
come una medusa rivoluziona la biochimica

ELENA CHIBAUDI

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI TORINO

ore 11·00 ~ intervallo

ore 11·30

La bioluminescenza nei pesci batifili
dello Stretto di Messina

MAURO CAVALLARO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MESSINA

ore 12·30 ~ dibattito

ore 15·30 ~ programma sociale

▶ lunedì 7

ore 9·00

Nuove frontiere della fotosintesi clorofilliana:
la foglia artificiale

ELISABETTA ODDO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI PALERMO

ore 10·00

La luce laser: dalla scoperta
alle applicazioni di laboratorio

SIMONPIETRO AGNELLO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI PALERMO

ore 11·00 ~ intervallo

ore 11·30

Procarioti dalle mille risorse: nuove scoperte
sui metabolismi batterici che utilizzano la luce

PAOLA QUATRINI

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI PALERMO

ore 12·30 ~ dibattito

ore 15·30 ~ lavori di gruppo

▶ martedì 8

ore 9·00

Metodi non distruttivi per la diagnosi di denti culturali

DELIA CHILLURA MARTINO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI PALERMO

ore 10·00

Luci ed ombre sul DNA: non è solo un modo di dire!

FABIO CARADONNA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI PALERMO

ore 11·00 ~ intervallo

ore 11·30 ~ relazione dei gruppi

ore 12·30 ~ chiusura

▶ esercitazioni

Ex cathedra

MARIANO VENANZI

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI ROMA 'TOR VERGATA'

Verranno illustrati alcuni semplici esperimenti legati all'incrocio
tra luce e materia, che possono essere effettuati direttamente in classe.

Radioattività ambientale

GIOVANNI MAGLIARDITI

LICEO SCIENTIFICO 'ARCHIMEDE' · MESSINA

▶ lavori di gruppo e discussioni

Coordinamento

ANNA CARONIA

MARIA CONCETTA CONSENTINO

▶ direttore

MICHELE A. FLORIANO

▶ comitato scientifico e organizzatore

ANNA CARONIA · DELIA CHILLURA MARTINO

MARIA CONCETTA CONSENTINO · CLAUDIO FAZIO

MARIO GOTTUSO · GIOVANNI MAGLIARDITI · ANGELA TOSTO

Prefazione

Materia e luce

Michele A. Floriano^{1,2} e Anna Caronia³

¹Divisione Didattica della Società Chimica Italiana

²Dipartimento di Chimica Fisica "F. Accascina", Università di Palermo

³I.T.S.G. "Filippo Parlatore", Palermo

e-mail: michele.floriano@unipa.it; anna.caronia@tin.it

Sito web: www.unipa.it/flor/spais.htm

La radiazione elettromagnetica, di cui la luce visibile è solo una piccola porzione, è presente ovunque nell'Universo. L'interazione fra la radiazione e la materia (che, in un certo senso, rappresentano due facce della stessa medaglia) è alla base di fondamentali processi fisici, chimici e biologici che condizionano, spesso in maniera determinante, l'esistenza di tutti gli organismi. Inoltre, il contenuto energetico della radiazione ha importanti implicazioni nello sviluppo di tecnologie sostenibili.

Anche se forse non sempre ce ne rendiamo conto, siamo circondati da radiazioni sia naturali che artificiali e, di conseguenza lo studio dei processi di interazione fra la radiazione e la materia assume notevole rilevanza non solo dal punto di vista della ricerca scientifica, ma anche sul piano didattico.

Se si fa eccezione dei fenomeni di diffusione (che pure durante la Scuola hanno comunque dimostrato la loro utilità nei metodi di determinazione strutturale), la materia assorbe la radiazione e, di conseguenza, varia il proprio contenuto energetico. Il processo di assorbimento è selettivo ed è regolato dalle leggi della meccanica quantistica che quindi, anche a livello elementare ma comunque corretto, vanno necessariamente introdotte nella didattica. Il risultato del processo di assorbimento varia in relazione all'energia della radiazione incidente e comporta cambiamenti nella dinamica delle molecole o nella loro struttura elettronica. Risulta quindi evidente che gli argomenti di base necessari per comprendere gli svariati risultati dell'interazione radiazione materia riguardano per esempio i parametri caratteristici delle onde elettromagnetiche, la struttura atomica e molecolare, la reattività e gli aspetti fondamentali delle macromolecole biologiche.

Tutte le relazioni presentate durante la Scuola hanno dimostrato come sia possibile, a partire da aspetti specifici della ricerca avanzata, ritrovare questi concetti di base rendendoli quindi più attuali e concreti. Seguendo questa filosofia, nei lavori di gruppo, che costituiscono didatticamente uno dei momenti più efficaci di SPAIS, si è provato ad elaborare percorsi formativi ispirati agli interventi dei relatori adattandoli, non come semplici approfondimenti, a strumenti per introdurre gli stessi argomenti di base già presenti nel piano di lavoro normalmente adottato dai docenti nei vari ambiti disciplinari.

La presente edizione di SPAIS ha rafforzato il convincimento sulla validità di un approccio alla didattica delle Scienze Sperimentali che, traendo spunto dai risultati della moderna ricerca scientifica stimoli la curiosità degli studenti anche verso quegli aspetti fondamentali delle discipline che, altrimenti, rischiano di rimanere astratti e, forse, irrilevanti.

Siamo grati all'Ufficio Scolastico Regionale per la Sicilia, che condividendo questi principi, continua ad offrire il prezioso supporto che ha reso possibile anche la corrente edizione di SPAIS ed ai relatori che hanno consentito di rendere permanente il proprio contributo con la realizzazione di questi atti.

Materia e luce. Louis de Broglie tra "orgoglio e pregiudizio"

Giuseppe Gambillo

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

e-mail: gembillo@unime.it

Sommario. 1. Il contesto storico-teoretico e l'orgoglio di Louis de Broglie. 2. Verso il superamento della concezione della materia come oggetto imm modificabile e come meccanismo. 3. La "smaterializzazione" della Natura di Louis de Broglie. 4. Il peso del pregiudizio

1. Il contesto storico-teoretico e l'orgoglio di Louis de Broglie

Il 14 dicembre 1900 Max Planck riapriva una questione che sembrava chiusa. Si tratta com'è noto, della rivoluzionaria interpretazione del calore raggianti come costituito da quantità discrete. Per la verità Planck riteneva talmente provvisoria la propria ipotesi da definirla soltanto "euristica"; provvisoria al punto che non la riteneva degna di menzione in un manuale di fisica da lui composto nel 1906.

Com'è noto, tuttavia, un anno prima, nella primavera del 1905 Einstein aveva esteso la struttura corpuscolare alla luce; anche lui, tuttavia, parlava di interpretazione euristica. Molti altri fisici, però, presero la cosa in maniera più seria, al punto che per il primo congresso Solvay, che si tenne a Bruxelles dal 30 ottobre al 3 novembre 1911 fu scelto, nonostante il parere sfavorevole di Planck, proprio l'argomento La teoria dell'irraggiamento i quanti.

Al convegno partecipò, assieme a un gruppo selezionatissimo di fisici, Paul Langevin, l'inventore del paradosso dei gemelli a supporto della teoria della relatività. Egli si fece accompagnare dal suo assistente Maurice de Broglie, con il quale poi curò gli atti del convegno, che furono pubblicati nel 1912. La nostra storia comincia a questo punto.

Maurice de Broglie, tornato a casa dopo il convegno, ne parlò con grande entusiasmo al fratello minore Louis, il quale ne fu talmente colpito che esprime al fratello l'intenzione di partecipare a quello successivo, previsto per il 1913. Ma il fratello gli fece notare che il convegno era riservato ai fisici più grandi e più autorevoli del momento. Louis rispose: bene, tra qualche anno mi inviteranno come uno dei fisici più autorevoli del Novecento.

Ciò avvenne puntualmente in occasione del più celebre dei congressi Solvay, il quinto, che si svolse nel fatidico 1927. In esso de Broglie rappresentò, assieme a Schödinger, l'alternativa alla meccanica matriciale di Heisenberg.

La ragione di tanto onore fu dovuta al fatto che a partire dal 1923 de Broglie rivoluzionò il concetto di materia, dando l'avvio alla "meccanica ondulatoria".

Ripercorriamo brevemente, allora, le vicende di tale concetto.

2. Verso il superamento della concezione della materia come oggetto imm modificabile e come meccanismo

Diversamente dall'idea di luce, l'idea di Materia che la scienza del Novecento aveva ereditato era sufficientemente stabile e ancora poco controverso; era, essenzialmente, quella di Galilei, di Cartesio e di Laplace: un oggetto visto come perennemente stabile e meccanicisticamente articolato come corpo rigido in movimento, regolato, nella sua interrelazione con gli altri corpi, da un nesso deterministico di causa e di effetto che ne consentiva l'assoluta prevedibilità di spostamenti locali, se non sempre di fatto, perlomeno in linea di principio.

Tutti i controesempi nel frattempo emersi erano stati via via esorcizzati: alle conseguenze del secondo principio della Termodinamica, Boltzmann aveva tentato di rispondere con l'utilizzazione del metodo statistico; la storicizzazione della Natura operata dai filosofi dell'Idealismo era stata bollata come "prescientifica"; la grande storiografia tedesca dell'Ottocento aveva continuato a contrapporre, con Droysen, Storia e Natura, e, con Dilthey, scienze della Natura e scienze dello Spirito; l'intervento del fisico Ernst Mach, il quale, collegando le implicazioni del secondo principio della Termodinamica e dell'evoluzionismo darwiniano, aveva rotto il nesso tra meccanicismo e oggetto naturale, era in qualche modo reso ambiguo, agli occhi degli scienziati, dal suo fenomenismo e, in conseguenza di ciò, svalutato e rifiutato; analoga sorte era toccata al convenzionalismo di Pierre Duhem¹.

Nemmeno la teoria della relatività, né la fisica quantistica, inizialmente erano riuscite a mettere veramente in crisi questa immagine. Infatti, come per Galilei, anche per Einstein il libro della Natura è scritto in caratteri geometrici; così come la fisica quantistica, nei suoi primi passi, aveva riproposto lo schema meccanicistico, trasferendolo anche a livello microfisico: i corpi erano diventati in essa gli invisibili quanti, e la particella minima, l'atomo, aveva assunto la configurazione di una struttura planetaria, secondo il modello che Niels Bohr disegnò nel 1913, per il quale al macrocosmo corrisponderebbe un microcosmo perfettamente identico a quello, secondo la classica "invarianza di scala"².

Per queste ragioni i due fondatori delle nuove fisiche del Novecento, Planck e Einstein, si dichiaravano con ostinazione "inveterati deterministi"³ e continuavano a immaginare la Natura come una entità statica, senza storia, fuori dal divenire temporale e quindi non soggetta a mutamenti; dunque, in perfetto accordo con Laplace, la presentavano come potenzialmente prevedibile in tutti i suoi movimenti, passati, presenti e futuri.

La svolta rivoluzionaria, in questa immagine meccanicistica tradizionale è avvenuta a seguito e in conseguenza della rottura epistemologica, teoretica e metafisica operata, a partire dagli anni Venti del Novecento, dai nuovi teorici della meccanica ondulatoria e di quella quantistica, prospettive entrambe perfettamente consonanti su questo punto, e dagli sviluppi delle scienze ai vari livelli.

Louis De Broglie, di queste due vie, ha tracciato quella che ha portato alla meccanica ondulatoria.

3. La "smaterializzazione" della Natura di Louis de Broglie

Per comprendere immediatamente il ruolo di de Broglie basta ricordare che egli ha fatto l'ipotesi inversa rispetto a quella di Planck e Einstein: come essi avevano reso duplice la natura della luce, de Broglie ha reso, a sua volta, duplice la materia. Il ragionamento con il quale la nuova proposta veniva presentata era, grosso modo, questo: se la luce ha "doppia natura", perché non dovrebbe essere così anche per la materia? De Bro-

¹ Della sterminata letteratura sull'argomento mi limito a ricordare: L. Boltzmann, *Modelli matematici, fisica e filosofia*, a cura di C. Cercignani, Bollati Boringhieri, Torino 1999; J. G. Droysen, *Istorica. Lezioni sulla Enciclopedia e Metodologia della Storia*, a cura di L. Emery, Ricciardi, Milano-Napoli 1966; W. Dilthey, *Introduzione alle scienze dello Spirito*, trad. a cura di A. De Paz, La Nuova Italia, Firenze 1974; H. Bergson, *L'evoluzione creatrice*, trad. di F. Polidori, Cortina, Milano 2002; B. Croce, *La storia come pensiero e come azione*, Bibliopolis, Napoli 2002; E. Mach, *La meccanica esposta nel suo sviluppo storico critico*, trad. di A. D'Elia, Boringhieri, Torino 1992; P. Duhem, *La teoria fisica*, trad. di D. Ripa di Meana, Il Mulino, Bologna 1978.

² Su ciò rinvio a: N. Bohr, *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*, trad. di P. Gulmanelli, Boringhieri, Torino 1961; N. Bohr, *I quanti e la vita*, trad. di P. Gulmanelli, Boringhieri, Torino 1997; S. Petruccioli, *Atomi Metafore Paradossi. Niels Bohr e la costruzione di una nuova fisica*, Theoria, Roma-Napoli 1988; A. Pais, *Il danese tranquillo, un fisico e il suo tempo, 1885-1962*, trad. di D. Canarutto, Boringhieri, Torino 1993; G. Gembillo - M. Galzigna, *Scienziati e nuove immagini del mondo*, Marzorati, Milano 1994.

³ Cfr. A. Einstein - M. e H. Born, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, trad. di G. Scattone, Einaudi, Torino 1973; A. Einstein, *Corrispondenza con Michele Besso (1903-1955)*, a cura di G. Gembillo, Guida, Napoli 1995; M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, trad. di E. Persico e A. Gamba, Bollati Boringhieri, Torino 1993; A. Kojève, *L'idée du déterminisme dans la physique classique et dans la physique moderne* (1933), a cura di D. Auffret, Lgf, Paris 1990; E. Cassirer, *Determinismo e indeterminismo nella fisica moderna* (1937), trad. di G. A. de Toni, La Nuova Italia, Firenze 1970; AA. VV., *Sul determinismo*, a cura di K. Pomian, trad. di D. Formentin, Mondadori, Milano 1991.

glie, riferendosi specificamente all'idea di attribuire doppia natura alla materia, ha scritto: "Tale idea consiste in ciò, che in tutti i rami della Fisica, nella teoria della materia come in quella della luce, è necessario introdurre simultaneamente la nozione di corpuscolo e quella d'onda, dovendosi considerare ogni corpuscolo come accompagnato da una certa onda e ogni onda come legata al movimento di uno o più corpuscoli"⁴. Di questo si aveva avuto qualche sentore, a suo parere, anche in fisica classica, ma la logica che caratterizzava quest'ultima aveva impedito di approfondire la questione e aveva indirizzato i teorici verso una soluzione "unitaria", a tutti i livelli. La nuova fisica, tuttavia, rendeva indispensabile l'estensione delle due immagini. Nell'ambito di essa "si intravede così la possibilità di conciliare l'esistenza dei corpuscoli di luce con il modo in cui l'energia luminosa si ripartisce nei fenomeni d'interferenza e di diffrazione. E si è così portati a prevedere che apparenze analoghe alle interferenze della luce si devono poter osservare per le particelle materiali, ad esempio per gli elettroni; tale inattesa previsione si scoperse verificata in modo notevole e quantitativo nel bel fenomeno della diffrazione degli elettroni mediante i cristalli"⁵.

Come si evince chiaramente da queste considerazioni generali, la sperimentata instabilità degli elettroni comporta una prima forma di "depotenziamento" della struttura della materia e la fine della speranza nella possibilità di una descrizione unitaria della Realtà fisica, e dunque conferma la necessità della descrizione duplice di essa. In tale prospettiva, per un verso, "il punto materiale non si concepisce più come una entità statica, che interessi soltanto una regione minima dello spazio, ma come un centro d'un fenomeno periodico, diffuso tutto intorno a esso"⁶; per l'altro, invece, l'onda è "una rappresentazione simbolica e analitica di certe probabilità e non costituisce affatto un fenomeno fisico nel senso antico della parola"⁷. Allora, l'immagine del mondo che comincia a delinearsi corrisponde non a un modello esterno fisso, ma a qualcosa di articolato e complesso. Da un lato, "ciò conduce naturalmente a pensare che anche per la materia dobbiamo considerare delle onde la cui propagazione regola, almeno statisticamente, il movimento dei corpuscoli"⁸; dall'altro, "la meccanica ondulatoria, associando al movimento di un proiettile qualsiasi la considerazione di un'onda, senza realtà fisica, ma che permette di prevedere, per quanto è possibile, gli spostamenti del mobile, è giunta a mostrare che era vano opporre l'aspetto ondulatorio all'aspetto corpuscolare e che per ogni fenomeno era necessario tenere più o meno conto d'entrambi i punti di vista"⁹.

Questo riconoscimento della struttura non definibile in maniera lineare della realtà microfisica ha comportato la definitiva messa in crisi del "realismo", riconosciuto ora, e qualificato espressamente, come ingenuo. In proposito, infatti, Louis de Broglie avverte del fatto che chi si accosterà alla fisica nuova "imparerà quanto i metodi e le idee dei fisici si siano evolute ed affinate in questi ultimi anni, quanto noi siamo lontani oggi dal realismo alquanto ingenuo, dal meccanicismo alquanto semplicista degli scienziati di epoche precedenti"¹⁰. Ci si rende conto di ciò e si comprende meglio il ragionamento approfondendo proprio l'essenza della microfisica. Infatti, "più noi scendiamo nelle strutture infime della materia, più ci accorgiamo che i concetti creati dal nostro spirito nel corso dell'esperienza quotidiana, in particolare quelli di spazio e di tempo, ci ostacolano la descrizione dei nuovi mondi nei quali penetriamo. Si potrebbe dire che il contorno dei nostri concetti debba, se così si può dire, sfumarsi progressivamente per consentire loro di applicarsi ancora un poco alla realtà delle scale subatomiche"¹¹. Realtà anch'essa meno definita di quanto si possa pensare, perché a un determinato livello "le entità elementari fluttuano nello spazio e nel tempo come in un vestito

⁴ L. de Broglie, *Materia e luce*, trad. di V. Porta, Bompiani, Milano 1940, p. 211.

⁵ Ivi, p. 212. De Broglie ha ricostruito tutta la vicenda, inserendola perfettamente in tutto il suo contesto storico e teorico in *I quanti e la fisica moderna*, trad. di U. Richard, Einaudi, Torino 1938; e in *Fisica e microfisica*, trad. di G. Crescenzi, Einaudi, Torino 1950, pp. 157-180.

⁶ L. de Broglie, *Electrons et photons*, Paris 1928, p. 105, trad. ns.

⁷ L. de Broglie, *Materia e luce*, cit., p. 172. Per i successivi sviluppi cfr. E. Schroedinger, *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, trad. fr. di A. Proca, Gabay, Paris 1988; E. Schroedinger, *L'immagine del mondo*, trad. di A. Verson, Boringhieri, Torino, 1987; E. Schroedinger, *La mia visione del mondo*, a cura di Bertotti, Garzanti, Milano 1987.

⁸ Ivi, p. 55.

⁹ Ivi, p. 60. Cfr. anche L. de Broglie, *Mécanique ondulatoire du photon et théorie quantique des champs*, Gauthier-Villars, Paris 1949.

¹⁰ Ivi, p. 12.

¹¹ *Ibidem*.

che non sia tagliato per loro; l'individualità s'afferma nei misteriosi processi dell'interazione; perfino il determinismo, così caro ai fisici dei tempi passati, è obbligato a cedere"¹².

Dopo avere "sfumato" in questo modo la realtà microfisica, de Broglie, collegando espressamente la propria argomentazione alle conclusioni a cui erano giunti Heisenberg e Bohr sul problema del ruolo dello scienziato nella elaborazione delle teorie e nella configurazione dell'immagine del mondo, concludeva precisando che "il mondo reale non si può interpretare solo per mezzo della continuità: bisogna in essa distinguere delle individualità. Ma queste a loro volta non sono conformi all'immagine che ce ne darebbe la pura discontinuità: sono estese, reagiscono costantemente fra di loro e, fatto più sorprendente, non sembra possibile localizzarle e definirle dal punto di vista dinamico con perfetta esattezza in ogni momento"¹³.

Insomma bisogna riconoscere che "tale concezione d'individui dai contorni alquanto fluttuanti che emergono da un fondo di continuità, è assai nuova per i fisici e sembra fors'anche sconcertante a molti di loro"¹⁴. Dunque non è più plausibile una descrizione della Natura in termini di oggetti sostanziali e indipendentemente dal modo di osservarla, dal luogo di osservazione e dal tempo in cui si attua l'esperimento. Non è possibile mantenere la prospettiva precedente, perché Heisenberg e Bohr ci hanno reso consapevoli della necessità di impostare tutta la questione da un punto di vista totalmente nuovo. De Broglie, riferendosi espressamente a ciò su cui essi "hanno insistito a più riprese"¹⁵, ha compendiato e assimilato i loro ragionamenti in questi termini: "La fisica classica suppone come dato essenziale che esista una realtà obbiettiva suscettibile d'essere descritta indipendentemente dai 'soggetti' che l'osservano. Era per questo appunto che, come Bohr notò con finezza, la fisica classica poteva pretendere il titolo di scienza esatta. Ma ecco che nella fisica contemporanea non si può separare nettamente il fenomeno osservato o misurato dal metodo d'osservazione e di misura. Il microcosmo non è una realtà obbiettiva che possa essere concepita o descritta dall'uomo indipendentemente dai processi che gli permettono di conoscerla"¹⁶.

A partire da queste considerazioni e nel tentativo di conferire ad esse un senso che non sia in eccessivo contrasto con la concezione tradizionale, de Broglie precisa che, per superare il dualismo cartesiano, ormai improponibile, evitando contemporaneamente di cadere in una interpretazione troppo soggettivistica della nuova situazione sperimentale, bisogna ammettere che "mentre la fisica classica fa artificialmente un taglio netto fra una parte del mondo oggettivo qualificata 'realtà esteriore' affatto indipendente dal 'soggetto' che osserva, e un'altra parte del mondo oggettivo rappresentata dagli strumenti di misura o organi sensori, che servirebbe ai nominati soggetti per conoscere e studiare quantitativamente senza modificarla la realtà esteriore, la Fisica quantica mostra il carattere artificiale di simile taglio e prova come sia impossibile rigorosamente una descrizione della realtà fisica indipendente dai mezzi usati per osservarla"¹⁷. Dunque il concetto di Realtà "dipende", di volta in volta dal modo in cui si indaga e quindi perde, entro certi limiti, la sua consistenza e stabilità; perde, appunto, la sua autonoma consistenza sostanziale, "oggettiva". Inoltre de Broglie ritiene che queste considerazioni siano sufficienti "a far comprendere come la concezione meccanicista della Fisica si sia trovata, nel mondo microscopico, in urto con l'impossibilità di avere un'immagine del funzionamento dell'universo fisico che sia indipendente dalle perturbazioni introdotte con l'osservazione e la misura"¹⁸. Tutto questo ha portato a una conseguenza prima inconcepibile: il mondo microscopico non può essere descritto come quello macroscopico, dunque cade la possibilità di una descrizione omogenea della Natura a tutti i livelli. In questo modo al depotenziamento dell'idea di Natura materiale stabile si aggiunge la diversità di descrizione ai diversi livelli.

De Broglie illustra questa situazione osservando innanzitutto che "nella scala microscopica la realtà fisica appare formata d'unità che presentano successivi stadi con trapassi bruschi; e la descrizione di questi stadi

¹² Ibidem.

¹³ Ivi, 219. Su ciò cfr. C. F. von Weizsaecker, *L'immagine fisica del mondo*, a cura di D. Campanale, Fabbri, Milano 1967; P. Jordan, *L'immagine della fisica moderna*, trad. di F. Dossi e G. M. prosperi, Feltrinelli, Milano 1964.

¹⁴ Ibidem.

¹⁵ Ivi, p. 242.

¹⁶ Ivi, pp. 242-3. Su ciò cfr. W. Heisenberg, *Lo sfondo filosofico della fisica moderna*, a cura di G. Gembillo e E. A. Giannetto, Sellerio, Palermo 1999; idem, *La tradizione nella scienza*, trad. di R. Pizzi, Garzanti, Milano 1982.

¹⁷ Ivi, pp. 243-4.

¹⁸ Ivi, p. 245. Le Memorie scientifiche più importanti in relazione a ciò sono raccolte in AA. VV., *Quantum Theory and Measurement*, eds. J. A. Wheeler - W. H. Zurek, Pup, Princeton 1983.

non si può fare con l'aiuto dell'analisi infinitesimale entro l'inquadratura della continuità e del determinismo. Ma l'aspetto statistico di tali trasformazioni caleidoscopiche si lascia invece descrivere al modo classico con l'artificio delle onde associate"¹⁹. Si tratta dunque di un artificio, necessario a questi livelli e trascurabile ad altri. Infatti, come finora nella tradizionale descrizione classica è avvenuto di fatto, senza nostra consapevolezza teorica, "quando ci si eleva al mondo macroscopico dove la costante di Planck cessa d'avere un'influenza sensibile, il carattere discontinuo dei fenomeni individuali sparisce, sommerso, per così dire, nella statistica; e le descrizioni complementari e in certo senso inconciliabili, per corpuscolo e per onda, per localizzazione spazio-temporale e per stato dinamico, vengono a riunirsi e a fondersi nel modello armonioso e rigido della fisica classica"²⁰. Il quale è dunque, appunto, un "modello", non un "riflesso" fedele di una struttura ontologica di fondo della Realtà stessa.

Questa considerazione ha indotto de Broglie a una conclusione estremamente importante, per la quale egli ritiene "interessante osservare che l'esistenza e il valore finito della costante di Planck introduce una differenza essenziale fra il microcosmo e il macrocosmo. L'idea che il mondo fisico sia sempre simile a se stesso in tutte le scale, che l'infinitamente piccolo sia una riduzione quasi omotetica dell'infinitamente grande, si ritrova come un tema obbligato negli scritti dei pensatori e nelle teorie degli scienziati"²¹. Il problema è però, appunto, che "oggi questa concezione, alla luce delle recenti teorie, ci appare inesatta nel principio"²².

De Broglie argomenta ulteriormente questa considerazione spiegando che "le immagini che sono sufficienti per la descrizione del macrocosmo sono inadeguate per quella del microcosmo. Quando, discendendo la scala delle grandezze, il fisico affronta il mondo atomico, il mondo dei corpuscoli, vi incontra un elemento interamente nuovo e irriducibile, il quantum d'azione, il cui intervento trascina seco le importanti conseguenze che abbiamo cercato di analizzare"²³.

In conclusione dunque e in netta controtendenza con l'immagine della Natura della scienza classica, bisogna ribadire con forza che "il valore finito della costante di Planck, permettendo di definire e di opporre la scala microscopica a quella macroscopica, ha per effetto che, nel mondo fisico, l'infinitamente piccolo non è affatto una riduzione omotetica dell'infinitamente grande"²⁴. In questo modo il concetto di Natura, però, viene non solo smaterializzato, ma, appunto, anche frantumato in diversi "livelli di Realtà". Quella che ancora Planck definiva "l'unità dell'immagine fisica del mondo"²⁵ comincia a moltiplicarsi. Ci si avvia verso una direzione che porterà a una diversificazione sempre più puntuale e convincente della configurazione monistica e "universa".

4. Il peso del pregiudizio

De Broglie fu convinto di quanto fin qui espresso fino a quando il suo allievo Vigier e poi David Bohm non hanno parlato di variabili nascoste e di ologrammi. Seguendo la loro indicazione, volta a sostenere l'esistenza oggettiva di leggi invariante ma per principio nascoste alla nostra indagine, de Broglie si è allineato alle posizioni di Einstein lasciandosi condizionare dal pregiudizio del realismo.

A quel punto de Broglie è tornato, anche lui acriticamente e dunque per evidente pregiudizio, al realismo oggettivo, ancorché nascosto.

¹⁹ Ivi, p. 252.

²⁰ Ibidem. Cfr. anche L. de Broglie, *Continu et discontinu en physique moderne*, Albin Michel, Paris 1941, soprattutto le pp. 111-179. Su cui AA. VV., *Louis de Broglie que nous avons connu*, Louis de Broglie Fondation, Paris 1988. Cfr., ancora, W. Heisenberg, *I principi fisici della teoria dei quanti*, trad. di M. Ageno, Boringhieri, Torino 1979, pp. 7-8.

²¹ Ivi, pp. 252-3.

²² Ivi, p. 253. Su ciò cfr. M. Born, *La fisica e il nostro tempo*, trad. di C. Carlà, Sansoni, Firenze 1961; M. Born, *Il potere della fisica*, trad. di M. Ferretti, Boringhieri, Torino 1962.

²³ Ibidem.

²⁴ Ibidem.

²⁵ Cfr. M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, cit., pp. 33-65; cfr. anche le pp. 205-259.

Dai geni ai cristalli: l'uso della biocristallografia nella ricerca biomedica e biotecnologica

Menico Rizzi

DiSCAFF, Università del Piemonte Orientale, Via Bovio 6, 28100, Novara

E-mail: menico.rizzi@pharm.unipmn.it

Sommario. Con il termine biologia strutturale si indica lo studio della struttura (della forma) delle componenti dei sistemi viventi: dalle molecole sino all'intero organismo, passando attraverso le strutture cellulari. L'importanza della descrizione dell'organizzazione strutturale dei sistemi viventi, quale preludio alla comprensione di fenomeni vitali, è antichissima ed ha raggiunto oggi, grazie alla disponibilità di tecniche molto sofisticate, l'età dell'oro. Svelare l'intima relazione fra la struttura di un oggetto e la sua funzione, consente di modificare quest'ultima agendo sulla struttura dell'oggetto in modo razionale. Conoscere l'architettura della materia vivente aiuta a comprenderla ed apre la possibilità di manipolare specifici processi biologici alla base di numerose patologie. In questo contesto, la cristallografia a raggi-X è una tecnica d'elezione e può essere definita come microscopia a risoluzione atomica, in grado di "vedere" la struttura delle macromolecole ed in particolare delle proteine: i *factotum* delle cellule. Quando è applicata alle macromolecole biologiche questa tecnica viene indicata come biocristallografia. La biocristallografia gioca oggi un ruolo chiave nelle biotecnologie sia in relazione ad aspetti industriali e ambientali ma anche e soprattutto nella scoperta di nuovi farmaci e vaccini, attraverso la progettazione razionale di molecole innovative guidata dalle informazioni strutturali del bersaglio d'interesse. Numerosi sono gli esempi disponibili fra i quali si possono citare vaccini acellulari, farmaci per il trattamento di malattie d'origine batterica o virale (e.g. AIDS, epatite C ed influenza), sino al trattamento di tumori e di patologie neurologiche.

1. Introduzione

A più di un secolo dalla scoperta dei raggi X da parte di Wilhelm Conrad Roentgen, il 5 novembre 1895 presso l'Università di Wirtzburg, le applicazioni della radiazione che cade in questa banda dello spettro elettromagnetico registrano una crescita costante. In particolare, per quanta riguarda lo studio dell'organizzazione strutturale della materia biologica stiamo assistendo ad una sorta di età dell'oro, in cui la vastità delle tematiche da affrontare, da un lato, e l'incisività dei metodi di indagine disponibili, dall'altro, offrono alla ricerca biomolecolare potenzialità rilevanti, sia per gli studi di base che per le loro applicazioni. I raggi X utilizzati di routine in biocristallografia hanno lunghezze d'onda di circa 1 \AA , paragonabile quindi alle dimensioni dei dettagli molecolari (distanze dei legami covalenti C-C, ad esempio) che desideriamo analizzare dal punto di vista strutturale (come noto dalla teoria dell'osservazione microscopica, la minima distanza risolvibile tramite l'uso di una radiazione a lunghezza d'onda λ è di circa $0,7 \times \lambda$). Proprio per questo motivo, fin dagli inizi del secolo, i raggi X sono stati impiegati per studiare la struttura tridimensionale di sostanze cristalline, partendo storicamente dai solidi inorganici fino ad arrivare, in tempi recenti, allo studio delle strutture di proteine, acidi nucleici ed altri complessi macromolecolari biologici [1,2]. A causa dell'elevato potere penetrante dei raggi X, tuttavia, è tecnicamente molto complesso costruire sistemi ottici in grado di focalizzare la radiazione con l'efficienza ottenibile in altre zone dello spettro elettromagnetico (si pensi alla semplicità costruttiva ed all'efficacia delle lenti di un normale microscopio ottico, o ai sistemi focalizzanti elettromagnetici usati in un microscopio elettronico). Per questo motivo non disponiamo di un "microscopio X" e

non è quindi possibile osservare direttamente i dettagli strutturali di una molecola (a risoluzione atomica), come invece è possibile, ad esempio, per i dettagli costitutivi della cellula, usando la radiazione del visibile. Parallelamente alle potenzialità della biocristallografia, la biologia molecolare e la biochimica hanno fornito, nel corso degli ultimi trent'anni, metodi di indagine e spunti di ricerca di elevato valore innovativo. Consideriamo, ad esempio, la diffusione dei metodi di espressione e purificazione di proteine ricombinanti su larga scala, la potenza dei metodi di sequenziamento sia a livello nucleotidico che proteico, per non trascurare il parallelo sviluppo di metodi biofisici ad orientamento strutturale, quali le diverse spettroscopie, microscopie e la risonanza magnetica nucleare [2]. Nel seguito di questa rassegna vengono discussi alcuni dei principi fondamentali del metodo di analisi biocristallografico e considerate le sue principali applicazioni nel campo delle tecnologie di progettazione e modifica (engineering) di bio-(macro)molecole [3,4].

2. La tecnica biocristallografica

Le molecole biologiche possono, sotto condizioni opportune, formare monocristalli di dimensioni apprezzabili (0.1-1 mm, in dimensioni lineari), adatti all'analisi per diffrazione di raggi X. I cristalli rappresentano la forma di aggregazione periodica-ordinata delle molecole (quindi anche macromolecole biologiche quali le proteine, ad esempio), che sono associate, anche allo stato cristallino, a notevoli quantità di solvente (in media circa il 50 % del volume del cristallo). La cristallizzazione probabilmente è a tutt'oggi lo stadio più incerto di tutto il processo di analisi strutturale. Sicuramente la disponibilità di grosse quantità di proteine ricombinanti ed altamente purificate rende la sperimentazione in questo campo più razionale di quanta non lo fosse in passato. Infatti, un approccio sistematico alla cristallizzazione di una proteina ben caratterizzata ed omogenea dal punto di vista chimico-fisico, generalmente fornisce risultati soddisfacenti in tempi (1-3 mesi) non limitanti la successiva analisi diffrattometrica. Una teoria adeguata per lo studio della cristallizzazione delle proteine, tuttavia, non è ancora disponibile e l'approccio ad ogni nuovo progetto di ricerca è sempre empirico e dipendente dall'esperienza del ricercatore. Recentemente sono entrati in uso comune dei sistemi robotizzati per la cristallizzazione che consentono di ridurre sensibilmente la quantità di proteina utilizzata in ogni esperimento con conseguente possibilità di effettuare decine di migliaia di esperimenti con un elevatissimo grado di riproducibilità. Anche al giorno d'oggi, comunque, l'approfondita conoscenza delle proprietà e delle caratteristiche chimico-fisiche della proteina che si vuole cristallizzare e l'esperienza del ricercatore, continuano ad essere degli elementi fondamentali, soprattutto quando si affrontino problemi particolarmente complessi. Come in qualsiasi esperimento cristallografico, i cristalli proteici vengono esposti ai raggi X per l'acquisizione del diagramma di diffrazione attraverso rivelatori bidimensionali basati su sistemi di rivelazione elettronica. Questo stadio sperimentale dell'analisi è quello in cui si sono avuti negli anni recenti i maggiori sviluppi. Oltre alla disponibilità di nuovi sistemi per la rivelazione dei raggi X, la diffusione delle grosse installazioni per luce di sincrotrone ha fornito sorgenti di raggi X di elevata intensità e modulabili in lunghezza d'onda [5,6]. Queste proprietà uniche delle sorgenti di sincrotrone hanno aperto la porta a sperimentazioni su cristalli di dimensioni esigue (10 μm), allo sfruttamento di tecniche risolutive non possibili con generatori di raggi X di laboratorio ed alle analisi cristallografiche risolte nel tempo che "fotografano" in tre dimensioni la successione di stati conformazionali assunti da una proteina durante uno specifico processo biochimico, ad esempio durante la catalisi enzimatica. Dalla valutazione del diagramma di diffrazione lo sperimentatore ricava le ampiezze delle onde diffratte dal cristallo e in stadi successivi, che spesso coinvolgono la sperimentazione con marcatori ad elevato peso atomico (in gergo "atomi pesanti") si derivano le fasi delle onde diffratte necessarie alla ricostruzione del modello della macromolecola presente nel cristallo. Ciò si può raggiungere o attraverso la localizzazione delle posizioni atomiche degli atomi pesanti con una tecnica chiamata sostituzione isomorfa, oppure attraverso la tecnica della sostituzione molecolare qualora sia nota la struttura di una proteina altamente omologa alla struttura da determinare. Il livello di omologia strutturale è deducibile in prima approssimazione dal livello di omologia che si osserva confrontando le rispettive sequenze amino-acidiche, sul presupposto che la sequenza amino-acidica è l'elemento che determina una certa organizzazione strutturale. Avendo a disposizione le ampiezze e le fasi delle onde diffratte del cristallo, è possibile calcolare rapidamente le mappe di Fourier della densità elettronica la cui interpretazione fornirà il modello della macromolecola biologica. L'agilità di questo stadio interpretativo, che può essere condotto quando è nota la sequenza amino-acidica della proteina esaminata, dipende dalla risoluzione a cui sono stati

raccolti i dati di diffrazione e dalla accuratezza delle fasi ad essi associate. A questo scopo sono disponibili programmi di grafica molecolare interattiva in cui sono state codificate tutte le conoscenze relative alle strutture proteiche al fine di rendere il più possibile automatizzato, e privo di errori interpretativi, il processo di costruzione del modello. Il modello molecolare ottenuto viene infine raffinato, minimizzando il fattore cristallografico R che misura la discrepanza tra le ampiezze dei raggi X diffratti dal cristallo misurati sperimentalmente, e le ampiezze delle onde calcolate a partire dal modello molecolare in studio. Il successo e l'attendibilità del processo di affinamento cristallografico dipendono da diversi fattori, tra cui primi spiccano la risoluzione e la qualità dei dati acquisiti nell'esperimento di diffrazione. Un modello molecolare ben raffinato ad una risoluzione di 2.0 Å fornirà un fattore R minore di 0.20, con valori ideali per i principali fattori stereochimici della proteina (distanze e angoli di legame, contatti di Van der Waals, etc.). In queste condizioni l'analisi cristallografica fornisce le coordinate spaziali degli atomi non-idrogeno componenti la proteina con una precisione media di circa 0.1 Å. Nonostante la flessibilità di porzioni della macromolecola, eventuali fenomeni di disordine e l'alto grado d'idratazione dei cristalli proteici, i dati di diffrazione acquisibili sono generalmente più che sufficienti a caratterizzare la macromolecola sia dal punto di vista strutturale che delle relazioni struttura/funzione. E' infatti possibile esaminare la struttura di un enzima in presenza di una lunga serie di molecole (inibitorie e non) che "mappano" il sito attivo e forniscono utili informazioni sui processi di riconoscimento intermolecolare. Il modello molecolare così ottenuto viene depositato in una banca chiamata "protein data bank" che è accessibile liberamente al pubblico [7].

3. Applicazioni

Anche se la biocristallografia come scienza nasce all'inizio degli anni '60 con la risoluzione delle strutture dell'emoglobina e della mioglobina da parte di Max F. Perutz e John C. Kendrew, i campi di indagine esplorati negli anni successivi sono stati diversi e molteplici. Sono note oggi decine di migliaia di strutture tridimensionali di macromolecole biologiche (prevalentemente proteine) la cui conoscenza ha permesso di raggiungere notevoli livelli di comprensione, non solo dei principi che regolano la struttura e la stabilità delle proteine, ma anche degli aspetti biochimici-meccanicistici di processi di fondamentale importanza in diversi contesti fisiopatologici [3]. Muovendoci verso i campi applicativi si possono distinguere diversi filoni di indagine in cui l'analisi biocristallografica fornisce un contributo fondamentale alla risoluzione di quesiti specifici. E' questo certamente il caso che si presenta nell'ambito della progettazione razionale di molecole ad attività farmacologica, qualora il recettore della sostanza da sintetizzare sia una proteina a struttura tridimensionale nota. Sotto queste condizioni, la progettazione di una molecola in grado di legarsi ad uno specifico recettore ed alterarne la funzione, avviene sulla base della struttura tridimensionale del sito attivo, con i metodi di simulazione computerizzata propri del drug-design razionale, ed i risultati valutati tramite l'analisi della struttura tridimensionale del complesso farmaco-recettore mediante diffrazione di raggi X. In questo contesto uno dei casi più eclatanti è dato dalla scoperta dei moderni farmaci per il trattamento della leucemia mieloide cronica; infatti l'approfondita conoscenza della struttura tridimensionale della proteina cinasi in questa patologia risulta alterata in modo tale da essere costantemente nello stato cataliticamente attivo (a seguito di un traslocazione genica, nota come cromosoma "Philadelphia"), ha consentito di comprendere la ragione per la quale un farmaco di prima generazione, Imatinib/Gleevec, fosse particolarmente efficace, ed ha successivamente messo i ricercatori nelle condizioni di progettare varianti del farmaco originale che sono in grado di superare il problema della insorgenza di farmaco resistenza da parte delle cellule tumorali [8]. Un altro ed egualmente importante contributo fornito dalla biocristallografia è relativo ad un diverso campo d'interesse della biotecnologia molecolare, è quello della cosiddetta ingegneria di proteine, nelle diverse interpretazioni che si possono dare a questo termine generico [4]. Filoni di particolare interesse riguardano la modifica di enzimi naturali cui conferire maggior stabilità ad agenti fisici, quali la temperatura, o ad agenti chimici, quali il pH, condizioni redox fortemente alterate, solventi organici a bassa polarità. L'interesse applicativo riguarda la possibilità di utilizzare gli enzimi ingegnerizzati in bio-reattori particolarmente efficienti per la sintesi di composti organici di interesse farmaceutico o tecnologico. Sempre nell'ambito della ingegneria degli enzimi, riveste un grande interesse la possibilità di modificare la specificità enzimatica, per applicare enzimi sia in processi di sintesi industriale con minori costi produttivi, oppure nel contesto di processi di disinquinamento di aree industriali, nelle quali enzimi opportunamente ingegnerizzati si sono dimostrati in

grado di degradare sostanze altamente inquinanti in molecole biodegradabili non tossiche. In tutti questi casi gli approcci di ingegneria delle proteine si basano sulla conoscenza della struttura delle stesse; infatti la conoscenza della struttura consente di capire sia quali sono le basi molecolari della stabilità termodinamica della proteina che quelle che sostengono la sua funzione biologica (ad esempio enzimatica) e quindi di poter progettare in modo razionale le modifiche da apportare per variare o modulare la funzione stessa.

4. Conclusioni

Fin dalle pionieristiche esperienze promosse da Max Von Laue, il quale nel 1912 ipotizzò che un cristallo ir-radiato con raggi X avrebbe dato luogo a fenomeni di diffrazione – cosa che puntualmente si verificò con un cristallo di solfato di rame – è apparso evidente che l'organizzazione strutturale della materia allo stato solido può essere rivelata tramite tecniche diffrattive basate sull'applicazione dei raggi X. La cristallografia strutturale può essere definita come microscopia ad altissima risoluzione, o microscopia a risoluzione atomica. Se la tecnica viene applicata alle macromolecole biologiche, prende il nome di biocristallografia e costituisce la componente prominente della biologia strutturale moderna. La tecnica diede i primi risultati negli anni '50 in cui vennero risolte le prime strutture proteiche, quella della mioglobina e di una forma di emoglobina, da parte di Max F. Perutz e John C. Kendrew che ottennero per questo il premio Nobel per la chimica nel 1962, e in cui venne svelata anche l'organizzazione strutturale del DNA da parte di Francis Crick, James Watson e Maurice Wilkins, che sempre nel 1962 ottennero il premio Nobel per la Medicina e Fisiologia, segnando con il loro lavoro l'alba della moderna biologia molecolare. Da quel momento, il numero di strutture cristallografiche proteiche è andato aumentando e oggi le coordinate atomiche di migliaia di strutture sono disponibili presso il Protein Data Bank [5] e facilmente rappresentabili a scopi didattici, sia attraverso programmi di grafica computerizzata o in forma di oggetti in scala [9]. Questo straordinario progresso è stato possibile grazie al costante sviluppo della tecnologia del DNA ricombinante ed alla disponibilità di sincrotroni in grado di generare raggi X ad altissima brillantezza e con un ampio raggio di lunghezze d'onda. Inoltre, sono stati sviluppati rivelatori di raggi X sempre più sensibili e sono stati compiuti significativi avanzamenti nel calcolo cristallografico, sia in relazione alla potenza di calcolo e alla computer grafica, che allo sviluppo di nuovi approcci matematici per la risoluzione del problema della fase. La complessità degli "oggetti" biologici che oggi si possono studiare è ampia e copre qualsiasi classe di proteine (ad esempio sono state determinate le strutture del capsido di svariati virus) anche in relazione a dimensioni molecolari ragguardevoli. Solo per citare alcuni esempi, Johann Deisenhofer, Robert Huber e Hartmut Michel ricevettero il premio Nobel per la chimica nel 1988 per la definizione della struttura cristallina di un centro fotosintetico di reazione, John E. Walker nel 1997 anche per i suoi studi strutturali sulla FoF1 ATP sintasi, il cuore energetico della cellula, Roderick MacKinnon nel 2003 per i suoi studi strutturali dei canali ionici che sono alla base del meccanismo dell'impulso nervoso, Roger D. Kornberg nel 2006 per studi strutturali che hanno definito le basi molecolari della trascrizione genica negli eucarioti, mentre Venkatraman Ramakrishnan, Thomas A. Steitz e Ada E. Yonath nel 2009 per gli studi strutturali sul ribosoma, la ribonucleoproteina responsabile della sintesi proteica e caratterizzata da un peso molecolare di milioni di Dalton [10]. Accanto a questi esempi eclatanti, svariati programmi di genomica strutturale in cui ci si prefigge di determinare la struttura tridimensionale di interi genomi, sono in corso e le maggiori industrie farmaceutiche usano la cristallografia a raggi X per la scoperta di nuovi farmaci, attraverso il processo di disegno razionale di farmaci guidato dalle informazioni strutturali del bersaglio molecolare di interesse. In quest'ultimo contesto, numerosi sono gli esempi disponibili fra i quali si possono citare gli inibitori della proteasi di HIV in commercio per il trattamento dell'infezione, inibitori di cinasi umane coinvolte in processi neoplastici e antibiotici di nuova generazione in grado di superare il problema della resistenza. Ancora, per diverse patologie ed in particolare per le malattie genetiche, le informazioni fornite dalla biologia strutturale costituiscono una componente sempre più importante per comprendere le basi molecolari della malattia.

Bibliografia

- [1] www-structmed.cimr.cam.ac.uk/course.html (un sito dell'Università di Cambridge, UK, per un corso online introduttivo e gratuito alla biocristallografia)
- [2] Gregory A. Petsko, Dagmar Ringe, *Struttura e Funzione delle Proteine*, Zanichelli Editore, 2006.

- [3] "Le proteine", Le Scienze quaderni, n. 116, ottobre 2000
- [4] "Biotecnologie", Le Scienze quaderni, n. 106, febbraio 1999.
- [5] www.esrf.eu (il sito del sincrotrone ESRF, Grenoble Francia, con Tour virtuali e spiegazioni sul funzionamento e uso della luce d sincrotrone)
- [6] www.elettra.eu (il sito del sincrotrone ELETTRA, Trieste, con Tour virtuali e spiegazioni sul funzionamento e uso della luce d sincrotrone)
- [7] www.rcsb.org (il sito del Protein Data Bank, dal quale si possono scaricare le coordinate atomiche delle strutture di macromolecole biologiche, dei software gratuiti per la visualizzazione ed analisi di macromolecole biologiche ed in generale un elevata quantità di informazioni strutturali e di ulteriori siti anche per corsi di biologia strutturale, etc)
- [8] "Un nuovo farmaco contro la leucemia", Le Scienze n. 438, febbraio 2005
- [9] www.crystalprotein.com (un sito al quale si possono ordinare dei modelli di strutture di proteine/macromole biologiche incise con tecnica laser su supporti di vetro/plastica ottenendo effetto di visione tridimensionale)
- [10] www.nobelprize.org (il sito della Fondazione Nobel, da cui si possono scaricare le presentazioni in formato .PDF o .PPT di seminari ed altro materiale relativo alle scoperte che sono state riconosciute con il premio Nobel)

Luce e molecole. Tre pezzi facili.

Mariano Venanzi

Università di Roma Tor Vergata

Centro di Nanoscienze, Nanotecnologie e Strumentazione Avanzata

E-mail: venanzi@uniroma2.it

Abstract. The rotational and vibrational properties of three simple molecules (carbon monoxide, ammonia, chloroform) are discussed as an example of the possibility to introduce fundamental concepts of quantum mechanics on a pure experimental basis. The interplay of theoretical models, often based on classical physics concepts, and experimental observables is well represented by the examples here introduced, focusing on the interaction between the electromagnetic field and a molecular system.

Sommario. Le rotazioni e le vibrazioni di tre molecole semplici (monossido di carbonio, ammoniaca, cloroformio) sono discusse in questo contributo come esempi della possibilità di introdurre concetti fondamentali di meccanica quantistica a partire da evidenze sperimentali. L'intreccio tra modelli interpretativi e dato sperimentale è particolarmente evidente negli esempi riportati, incentrati sull'interazione tra radiazione elettromagnetica e sistemi molecolari.

5. Introduzione

Nelle ultime edizioni della Scuola per Aggiornamento Insegnanti (vedi l'appassionato intervento di Carlo Bernardini, SPAIS 2009 [1]) si è discusso a lungo della possibilità/necessità di introdurre concetti di meccanica quantistica (QM) anche nei curricula della scuola secondaria di secondo grado. A mio avviso, la comprensione di questi concetti, che specialmente per quanto riguarda la chimica sono introdotti in maniera del tutto astratta soprattutto quando si descrive la struttura atomica e molecolare, non può che fondarsi su una base puramente sperimentale. La inevitabile mancanza di strumenti matematici adeguati da parte degli studenti rende infatti impossibile la derivazione dei risultati anche più semplici della QM da principi primi.

In questo contributo, porterò alcuni esempi di come, a partire da evidenze sperimentali di tipo spettroscopico, sia possibile introdurre alcuni concetti basilari di QM con particolare riferimento ai moti molecolari (rotazioni e vibrazioni) di molecole semplici.

Di tutto il campo della radiazione elettromagnetica tratterò solo la regione della radiazione infrarossa compresa tra 4000 e 400 cm^{-1} , accessibile con uno spettrofotometro IR di natura didattica (risoluzione massima: 2 cm^{-1}). Gli spettri riportati sono stati eseguiti da studenti di alcuni licei romani che hanno partecipato al Piano Lauree Scientifiche 2010-2011 [2].

Nella discussione ricorrerò spesso a immagini e concetti della fisica classica. Darò quindi per scontato che gli studenti della secondaria esposti a questa attività abbiano già acquisito i concetti fondamentali della fisica classica che riguardano la rotazione di corpi indeformabili e la vibrazione elastica.

6. I gradi di libertà molecolari

Esiste una relazione semplice che lega il numero di atomi che compongono una molecola e la sua struttura al numero e al tipo di moti molecolari possibili. Infatti per definire completamente la posizione nello spazio di una molecola poliatomiche è sufficiente specificare le posizioni di tutti gli atomi che la compongono. Quindi per una molecola composta da N atomi, bisognerà specificare $3N$ coordinate. Questo numero fissa anche il numero totale dei moti possibili della molecola.

Se pensiamo di concentrare in un punto la massa totale della molecola, le traslazioni nello spazio saranno descritte per tutte le molecole dal moto del centro di massa della molecola nelle tre direzioni. Tutte le molecole possiedono dunque 3 gradi di libertà traslazionali, che tengono conto delle tre possibili traslazioni lungo gli assi di un sistema di riferimento tridimensionale che ha origine centro di massa della molecola.

Se la molecola non è lineare, vi saranno tre diverse rotazioni attorno ai tre assi dello stesso sistema di riferimento, a cui sono associati quindi 3 gradi di libertà rotazionali. Se, invece, la molecola è lineare, saranno sufficienti solo due assi per specificare completamente il moto di rotazione della molecola, poiché la rotazione intorno all'asse di legame della molecola sarà nulla [3]. Per una molecola lineare vi sono quindi 2 gradi di libertà rotazionali. I restanti moti, $3N-6$ per una molecola non lineare o $3N-5$ per una molecola lineare, definiscono le possibili vibrazioni. Questo esaurisce il panorama dei moti molecolari possibili.

Tra le molecole che tratteremo, l'ossido di carbonio è una molecola biatomica (ovviamente lineare). I moti possibili sono dunque $3N=6$: 3 traslazioni, 2 rotazioni, 1 vibrazione. Per convincersene, basta considerare la molecola in un sistema di riferimento che assuma come origine il centro di massa molecolare e uno degli assi coincidente con l'asse di legame (gli altri due saranno perpendicolari a questo asse). Le traslazioni rappresentano il moto della molecola, come un tutto, lungo le tre possibili direzioni dello spazio. Per le rotazioni basterà prendere in considerazione una rotazione di 180° rispetto a uno degli assi perpendicolari all'asse di legame, seguita da una rotazione di 360° rispetto all'altro asse perpendicolare per riempire l'intera sfera di rotazione. L'unica vibrazione possibile è quella di stiramento (stretching) lungo l'asse di legame.

Per l'ammoniaca $3N=12$: 3 traslazioni, 3 rotazioni, 6 vibrazioni. Per le rotazioni, questa volta bisogna specificare le rotazioni rispetto a tutti e tre gli assi del sistema di riferimento. Delle 6 vibrazioni, poiché $N-1$ sono i possibili legami per una molecola di N atomi non ciclica, tre saranno le vibrazioni che interessano lo stiramento dei legami, mentre $2N-5=3$, saranno le vibrazioni che interessano gli angoli di legame (bending).

Per il cloroformio $3N=15$: 3 traslazioni, 3 rotazioni, 9 vibrazioni (4 stretching, 5 bending).

7. Lo spettro rotazionale dell'ossido di carbonio

La Meccanica Quantistica permette di risolvere in maniera esatta il moto di un rotatore rigido lineare. La soluzione della equazione di Schrödinger relativa fornisce il semplice risultato che l'energia rotazionale di una molecola biatomica rigida è data dall'espressione:

$$\varepsilon_J = BJ(J+1) \quad (1)$$

dove J è il numero quantico rotazionale, che può assumere tutti i numeri interi positivi, compreso il valore 0. B è detta costante rotazionale, ed è caratteristica della molecola in esame.

$$B = \frac{h}{8\pi^2 I c} \text{ cm}^{-1} \quad (2)$$

La costante rotazionale, espressa in cm^{-1} , unità di misura energetica solitamente usata in spettroscopia infrarossa, è funzione delle costanti universali h (costante di Planck) e c (velocità della luce) e del momento di inerzia della molecola, dato dal prodotto della massa ridotta molecolare per la lunghezza di legame al quadrato, cioè:

$$I = \mu r^2 \quad (3)$$

Nel caso dell'ossido di carbonio:

$$\mu = \frac{m_C m_O}{m_C + m_O} = 11.38 \cdot 10^{-24} \text{ g} \quad I = 14.57 \cdot 10^{-40} \text{ g} \cdot \text{cm}^2 \quad B \sim 2 \text{ cm}^{-1}$$

è facile calcolare l'energia dei livelli rotazionali:

Per $J=0$, $\varepsilon_0=0$; per $J=1$, $\varepsilon_1=2B \sim 4 \text{ cm}^{-1}$; per $J=2$, $\varepsilon_2=6B \sim 12 \text{ cm}^{-1}$; per $J=3$, $\varepsilon_3=12B \sim 24 \text{ cm}^{-1}$; per $J=4$, $\varepsilon_4=20B \sim 40 \text{ cm}^{-1}$.

Se si tiene conto che a temperatura ambiente (300K) l'energia termica è pari a ca. 200 cm^{-1} , si può notare come l'ossido di carbonio a temperatura ambiente popoli molti livelli rotazionali (si può ottenere facilmente che a $T=300\text{K}$ il livello rotazionale maggiormente popolato è quello con $J=9$).

Un altro importante risultato della QM assicura che, per interazione con la radiazione elettromagnetica, la molecola di CO possa assorbire energia solo tra livelli adiacenti. Da un generico livello J è possibile, cioè, solo assorbire un fotone dal campo elettromagnetico per salire sul livello $J+1$ o cedere un fotone e discendere sul livello $J-1$.

Nel primo caso si può passare da $J=0$ a $J=1$, da $J=1$ a $J=2$, da $J=2$ a $J=3$ e così via ($\Delta J=+1$, Ramo R). Nel secondo da $J=1$ a $J=0$, da $J=2$ a $J=1$, da $J=3$ a $J=2$ e così via ($\Delta J=-1$, Ramo P).

Usando i valori calcolati in precedenza ottengo un risultato semplicissimo. Infatti $\epsilon_1 - \epsilon_0 = 2B - 0 = 2B$, $\epsilon_2 - \epsilon_1 = 6B - 2B = 4B$, $\epsilon_3 - \epsilon_2 = 12B - 6B = 6B$, $\epsilon_4 - \epsilon_3 = 20B - 12B = 8B$. Ottengo cioè tante righe adiacenti, tutte ugualmente spaziate di $2B$. Esattamente gli stessi risultati si ottengono per le transizioni con $\Delta J=-1$.

Lo spettro vibrorotazionale della molecola di CO riportato in Figura 1 illustra chiaramente i risultati ottenuti. Lo spettro rappresenta infatti tutte le possibili transizioni tra gli stati rotazionali del livello vibrazionale fondamentale ($v=0$) e quelli dello stato vibrazionale eccitato ($v=1$).

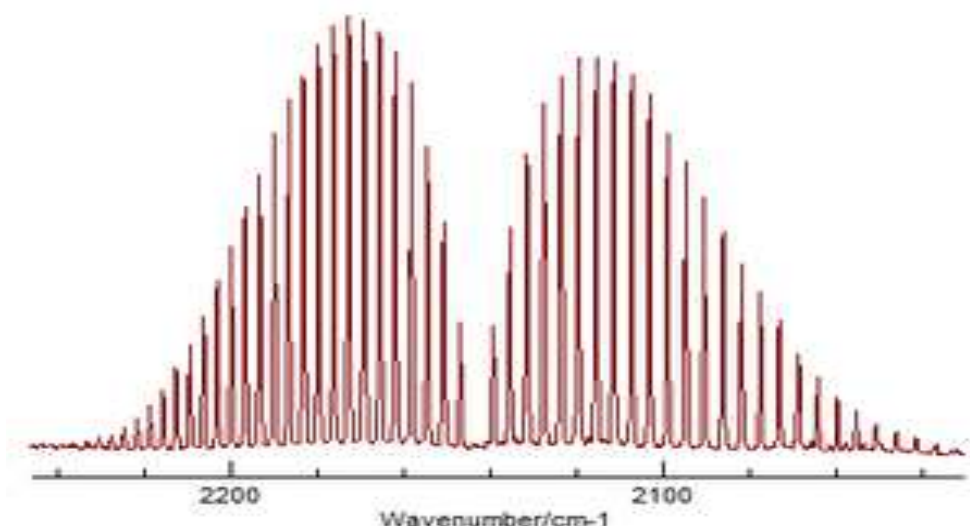


Figura 1. Spettro roto-vibrazionale della molecola di CO. La banda ad alte energie (sinistra) rappresenta tutte le transizioni rotazionali del tipo $J \rightarrow J+1$ (ramo R); la banda a energie minori (destra) tutte le transizioni rotazionali del tipo $J \rightarrow J-1$. Notare il caratteristico andamento dell'intensità di assorbimento, determinato dalla differente popolazione dei livelli rotazionali.

In particolare, dalla misura della spaziatura tra due righe adiacenti, pari a $2B$, si ottiene immediatamente la costante rotazionale e da questa, conoscendo le masse del carbonio e dell'ossigeno, si ottiene facilmente la distanza di legame molecolare. In laboratorio abbiamo ottenuto $B=1.92 \text{ cm}^{-1}$ e $r(\text{CO})=1.13\text{\AA}$, in ottimo accordo con il valore di letteratura [$r(\text{CO})=1.128\text{\AA}$].

Questo semplice modello spiega solo semi-quantitativamente lo spettro rotazionale del CO. In fin dei conti le molecole non sono rotatori rigidi, ma vibrano intorno alla loro posizione di legame.

Parleremo di vibrazioni illustrando il nostro prossimo esempio.

8. Effetto isotopico nello spettro vibrazionale delle molecole CHCl_3 e CDCl_3 .

Come già detto il cloroformio e il cloroformio deuterato, molecole penta-atomiche caratterizzate da una struttura piramidale, presentano nove frequenze vibrazionali fondamentali. Un modello semplificato tratta queste vibrazioni come degli oscillatori armonici indipendenti.

La soluzione della relativa Equazione di Schrödinger permette di determinare gli stati energetici di un oscillatore armonico:

$$\varepsilon_v = \left(v + \frac{1}{2}\right)h\nu \quad (4)$$

dove v è il numero quantico vibrazionale, che può assumere tutti i valori interi positivi compreso il valore 0 ($v=0,1,2,3,\dots$) e ν è la frequenza di vibrazione.

La frequenza è legata alla radice quadrata della costante di forza dell'oscillatore, k , e alla massa ridotta molecolare (proprio come un oscillatore armonico classico). In cm^{-1} :

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (5)$$

In Tabella 1 abbiamo riportato le frequenze misurate per le vibrazioni fondamentali delle molecole di cloroformio e cloroformio deuterato.

Tabella 1 – Frequenze misurate nello spettro vibrazionale in soluzione del cloroformio e cloroformio deuterato.

	CHCl₃	CDCl₃	Modo normale	Descrizione
$\bar{\omega}(\text{cm}^{-1})$	3021	2245	$\nu^S(C-H)$	Stretching C-H
$\bar{\omega}(\text{cm}^{-1})$	667	648	$\nu^S(C-Cl)$	Stretching C-Cl
$\bar{\omega}(\text{cm}^{-1})$	366	365	$\delta^S(Cl-C-Cl)$	Bending Cl-C-Cl
$\bar{\omega}(\text{cm}^{-1})$	761	735	$\nu^{AS}(C-Cl)$	Stretching asimmetrico C-Cl
$\bar{\omega}(\text{cm}^{-1})$	1217	910	$\delta^{AS}(H-C-Cl)$	Bending asimmetrico H-C-Cl
$\bar{\omega}(\text{cm}^{-1})$	262	261	$\delta^{AS}(Cl-C-Cl)$	Bending asimmetrico Cl-C-Cl

Le ultime 3 vibrazioni riportate in Tabella 1 hanno una vibrazione equivalente con la stessa energia (sono dette doppiamente degeneri), quindi l'elenco riportato esaurisce il numero di vibrazioni possibili (9) per le due molecole.

La prima vibrazione riportata si riferisce al moto di stretching del legame C-H. Chiaramente è fortemente influenzata dalla sostituzione isotopica e la frequenza si sposta di quasi 800 cm^{-1} nel passare dal cloroformio

al cloroformio deuterato. Se si analizzano questi dati, si scopre che il rapporto tra le frequenze osservate è praticamente uguale alla radice quadrata dell'inverso del rapporto tra le masse ridotte dei legami C-H e C-D.

Infatti:

$$\frac{\omega(C-H)}{\omega(C-D)} = \frac{3021}{2245} \approx 1.345$$

mentre:
$$\sqrt{\frac{\mu(C-D)}{\mu(C-H)}} = \sqrt{\frac{m_C \cdot m_D}{m_C + m_D} / \frac{m_C \cdot m_H}{m_C + m_H}} = 1.361$$

Se si riprende l'equazione 5 si scopre che questo risultato implica che le costanti di forza delle due molecole siano uguali. La ragione fisica di questo risultato è che la costante di forza dell'oscillatore non è altro che una misura della forza del legame chimico tra i due atomi. Quest'ultimo è determinato solo dall'interazione tra gli elettroni dei due atomi e non risente quindi della sostituzione isotopica (approssimazione di Born-Oppenheimer).

Se si analizzano le altre vibrazioni si scopre che alcune di queste (bending simmetrico e antisimmetrico dell'angolo Cl-C-Cl) non sono influenzate dalla sostituzione isotopica, mentre altre, che pure non sembrerebbero coinvolgere l'atomo di idrogeno, come lo stretching simmetrico e antisimmetrico C-Cl, risentono, anche se in misura minore, della sostituzione isotopica.

La ragione è che le vibrazioni normali coinvolgono gli spostamenti di tutti gli atomi della molecola e quindi in linea di principio sono tutte influenzate dalla sostituzione isotopica. Nella realtà il peso dello spostamento dell'atomo di idrogeno in una vibrazione normale varia per le diverse vibrazioni molecolari (è ovviamente predominante nello stretching C-H e trascurabile nel bending Cl-C-Cl), determinando quindi il diverso effetto della sostituzione isotopica. Se pensiamo alla molecola in vibrazione come una serie di molle collegate tra loro, allora è chiaro che la vibrazione del legame C-Cl è influenzata dalla variazione della costante di forza associata alla 'molla' C-H o C-D.

In Figura 2 sono stati riportati gli spettri in soluzione del cloroformio e del cloroformio deuterato. Come appare dalle figure, negli spettri compaiono molte più frequenze oltre alle 6 vibrazioni normali previste (3 singole + 3 doppiamente degeneri). Questo risultato è dovuto al fatto che le vibrazioni molecolari non sono affatto armoniche, ma hanno tutte un comportamento anarmonico per allungamenti sensibili delle distanze di legame. In effetti, non è la stessa cosa comprimere o allungare un legame. Tentare di accorciarlo al di sotto della distanza di legame vuol dire scontrarsi con il muro delle interazioni repulsive a corto raggio.

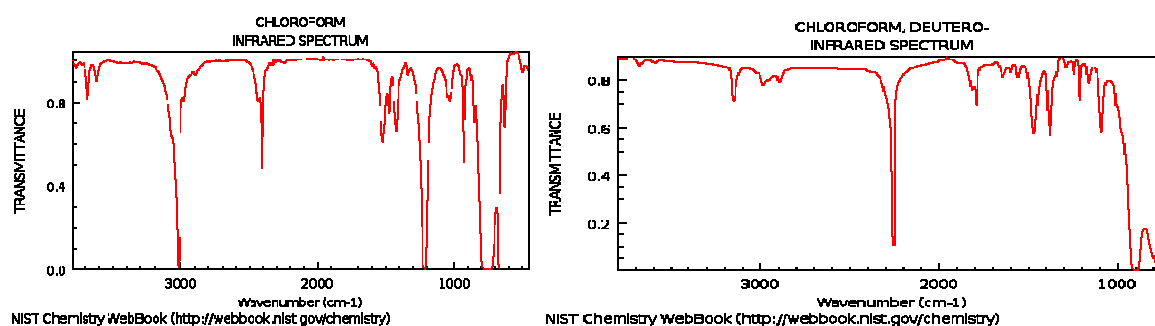


Figura 2. Spettro IR della molecola di cloroformio (a sinistra) e del cloroformio deuterato (a destra)

9. L'effetto tunnel rivelato dallo spettro rotovibrazionale dell'ammoniaca.

L'ammoniaca è una molecola tetra-atomica di struttura piramidale. Ci aspettiamo quindi 6 vibrazioni normali (3 di stretching, 3 di bending), alle quali, in fase gassosa, sono sovrapposte tutte le transizioni rotazionali permesse. Per una molecola di questo tipo la struttura rotazionale associata ad ogni vibrazione, dovrebbe essere composta da tre diverse bande: il ramo P, che riunisce tutte le transizioni con $\Delta J = -1$, il ramo Q ($\Delta J = 0$)

ed il ramo R ($\Delta J = +1$) [4]. Se si osserva il moto di stretching simmetrico NH ($3200-3500\text{ cm}^{-1}$) effettivamente queste sono le transizioni osservate (Fig. 3).

Se si analizza invece lo spettro rotazionale associato alla vibrazione di bending simmetrico dell'angolo H-N-H ($1200-800\text{ cm}^{-1}$), si può notare come la struttura delle bande PQR sia tutta duplicata. Lo spettro è cioè composto da due strutture PQR sovrapposte e spaziate di ca. 36 cm^{-1} .

La ragione fisica di questo effetto è dovuta alla presenza di un moto aggiuntivo, detto moto di inversione, in cui la molecola di ammoniaca inverte la propria configurazione passando attraverso uno stato planare ad alta energia (Fig.4). Questo moto è detto ad ombrello e capita a frequenze confrontabili con il moto vibrazionale di bending simmetrico dell'angolo H-N-H.

La spiegazione del fenomeno è puramente quantistica e non ha equivalenti dal punto di vista classico. Il modello a doppio pozzo (Fig. 4) fa infatti ricorso all'effetto tunnel tra le due diverse configurazioni dell'ammoniaca riportate in Fig. 4. Il tunnel è attraverso la barriera rappresentata dalla elevata energia della configurazione planare, in cui tutti e tre gli atomi di idrogeno sono sullo stesso piano dell'azoto.

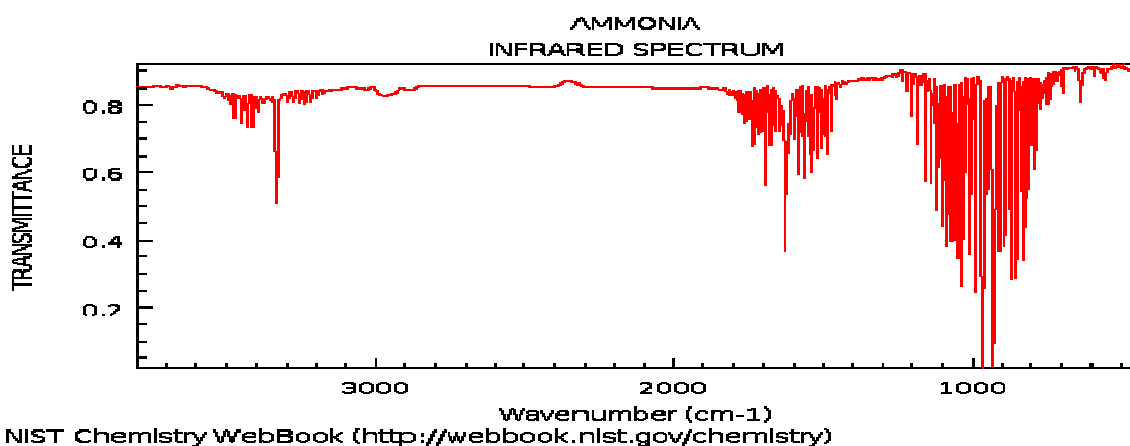


Figura 3. Spettro IR della molecola di ammoniaca in fase gassosa. La prima banda a sinistra è associata allo stretching simmetrico NH, l'ultima a destra è la banda di bending simmetrico HNH.

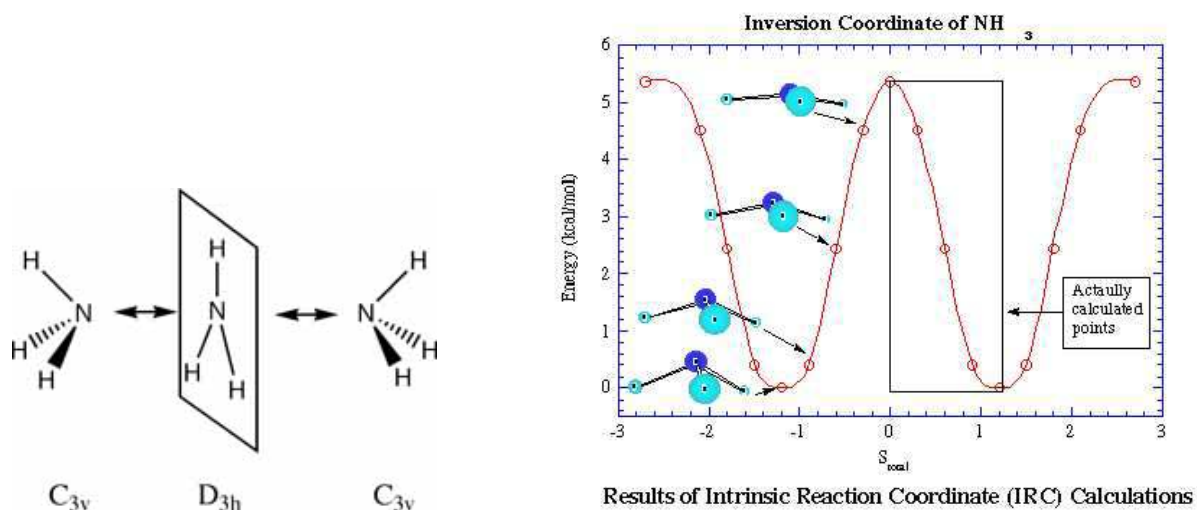


Figura 4. Moto di inversione (a ombrello) dell'ammoniaca (a sinistra). Modello a doppio pozzo per il moto di inversione (a destra). I due minimi rappresentano le due configurazioni molecolari con la piramide rivolta a sinistra e a destra, mentre il massimo di energia rappresenta la configurazione planare.

Quantisticamente, le funzioni d'onda che rappresentano le due configurazioni molecolari possono attraversare la barriera anche ad energie minori del massimo energetico della barriera. Questa è la base fisica dell'effetto tunnel: per passare da una configurazione all'altra non bisogna necessariamente superare la barriera di energia, come prescritto dalla fisica classica, ma è possibile letteralmente passarci attraverso. Questo effetto è descritto quantisticamente da una funzione d'onda totale generata dalla combinazione lineare delle funzioni d'onda che descrivono le due configurazioni molecolari 'piramide sinistra' e 'piramide destra'.

Il risultato è che i livelli rotazionali dello stato 0 e dello stato 1 si dividono in due seconda del segno della combinazione lineare delle due funzioni d'onda.

Avremo quindi gli stati 0^+ (sovrapposizione simmetrica delle due funzioni d'onda) e 0^- (sovrapposizione antisimmetrica delle funzioni d'onda). Lo stesso effetto avremo per lo stato 1, generando due stati a differente energia 1^+ e 1^- . Il calcolo quantitativo di questo effetto prevede che gli stati 0^+ - 0^- siano separati di 1 cm^{-1} , mentre gli stati 1^+ e 1^- di 35 cm^{-1} .

La trattazione quantistica dell'interazione tra la radiazione elettromagnetica e il sistema molecolare chiarisce che le transizioni permesse sono solo quelle che cambiano la simmetria del sistema, cioè la $0^+ \rightarrow 1^-$ e la $0^- \rightarrow 1^+$. Questo spiega la duplicazione della struttura rotazionale PQR (una relativa alla transizione $0^+ \rightarrow 1^-$, l'altra relativa alla transizione $0^- \rightarrow 1^+$) e la loro differenza energetica pari a 36 cm^{-1} .

10. Conclusioni

Abbiamo delineato brevemente le proprietà strutturali e i moti rotazionali e vibrazionali di tre molecole semplici in interazione con il campo elettromagnetico. Gli esempi riportati hanno evidenziato la natura quantistica degli stati energetici molecolari e della interazione tra radiazione elettromagnetica e sistemi molecolari. In molti casi la trattazione è solo semi-quantitativa, ma i nodi concettuali della natura quantistica della struttura della materia vengono messi chiaramente in evidenza.

La commistione tra il linguaggio classico che abbiamo usato per descrivere le rotazioni e le vibrazioni molecolari, e i modelli interpretativi introdotti (oscillatore armonico, rotatore rigido) non fanno velo ai comportamenti sperimentalmente dimostrati che svelano la natura quantistica dei fenomeni investigati.

E' compito dell'insegnante guidare lo studente attraverso questo percorso accidentato che, utilizzando modelli e intuizioni basate sulla fisica classica, porta alla comprensione di fenomeni che solo la MQ è in grado di spiegare correttamente.

Bibliografia e note

- [1] Bernardini, C. (2011). Prodigiosa importanza della nozione di invarianza fisica, in M.A. Floriano & D. Chillura Martino (Eds.) Atti della Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze "Il tempo nella Scienza, la Scienza nel tempo". *Quaderni di Ricerca in Didattica (Science)*, n. speciale 1.
- [2] Si ringraziano in particolare le Professoressa Rita Berdini (ITIS Fermi, Frascati), Annarita Di Genova (LS Majorana, Latina), Luisa Messina (Liceo Scientifico Ceccano), Gaetana Mirabelli (ITIS Pascal, Roma), Felicetta Ventresca (LS Majorana, Latina).
- [3] Il momento di inerzia di una molecola in rotazione è definito come la somma delle masse degli atomi che le compongono per il quadrato della distanza dall'asse di rotazione. Nel caso di un asse di rotazione coincidente con l'asse di legame, tutti gli atomi di una molecola lineare giacciono sull'asse di rotazione ed il momento di inerzia relativo è nullo.
- [4] Contrariamente alle molecole lineari (vedi Fig. 1), le transizioni rotazionali di molecole piramidali possono avvenire anche tra stati rotazionali contrassegnati dallo stesso numero quantico rotazionale ($\Delta J=0$, ramo Q).

Procarioti dalle mille risorse: nuove scoperte sui metabolismi batterici che utilizzano la luce

Paola Quatrini

Dipartimento Scienze e Tecnologie Molecolari e Biomolecolari. STEM BIO,
Università degli Studi di Palermo Viale delle Scienze, ed. 16 - 90128 Palermo, Italy

E-mail: paola.quatrini@unipa.it

Abstract. I batteri fototrofi costituiscono un ampio ed eterogeneo gruppo di procarioti ampiamente distribuiti nel plancton marino ed i loro processi basati sulla luce sostengono e controllano il flusso di energia negli oceani. Recenti scoperte di nuovi batteri includono almeno tre modalità di fotosintesi: la fotosintesi aerobica ossigenica (tipica dei cianobatteri e simile a quella condotta dalle piante), la fotosintesi anaerobica anossigenica e la fotosintesi aerobica anossigenica (entrambe esclusive dei procarioti). Altri importanti processi basati sulla luce utilizzano le rodopsine, contribuendo così al metabolismo energetico cellulare. La fotosintesi ossigenica "pura" sembra più l'eccezione che la regola mentre appare chiaro che i procarioti sono in grado di usare strategie miste (foto/chemiotrofia e auto/eterotrofia) in funzione delle condizioni ambientali e della disponibilità di nutrienti. Gli ecologi non sono ancora in grado di stabilire un bilancio completo del metabolismo di questi sistemi marini complessi.

1. La fotosintesi

La produzione primaria (terrestre e acquatica) dipende per larga parte dalla fotosintesi e generalmente il processo della fotosintesi viene associato alle piante. Tuttavia occorre precisare che la fotosintesi non è prerogativa degli organismi eucarioti (piante ed alghe) ma anche molti procarioti (batteri) sono fotosintetici. Dal punto di vista metabolico la capacità di ottenere energia dalla luce si chiama fototrofia e gli organismi sono pertanto fototrofi. Mentre la maggior parte dei metabolismi utilizza energia chimica (tali metabolismi sono definiti chemiotrofi), nella fototrofia avviene la trasduzione dell'energia luminosa in energia chimica mediata dai pigmenti fotosintetici: le clorofilla e la batterioclorofilla; tali pigmenti sono in grado di assorbire *quanti* di luce a diverse lunghezze d'onda modificando il proprio stato di eccitazione. L'energia assorbita viene trasferita mediante fotofosforilazione all'ATP. Molti organismi fototrofi (come le piante) sono anche autotrofi (foto-autotrofi) cioè sono capaci di utilizzare la CO₂ come unica fonte di carbonio riducendola a composti organici (Fig.1). Tra i procarioti fototrofi, invece, sono anche presenti batteri fotoeterotrofi che, pur ottenendo energia dalla luce, utilizzano la sostanza organica come fonte di carbonio. E' inoltre noto che la fotosintesi genera ossigeno dalla fotolisi dell'acqua ma vedremo in seguito che esiste anche una fotosintesi anossigenica che non produce ossigeno. Questo breve quadro introduttivo presenta la grande diversità associata alla fototrofia nei procarioti e invita a non generalizzare i concetti legati al metabolismo fototrofo delle piante.

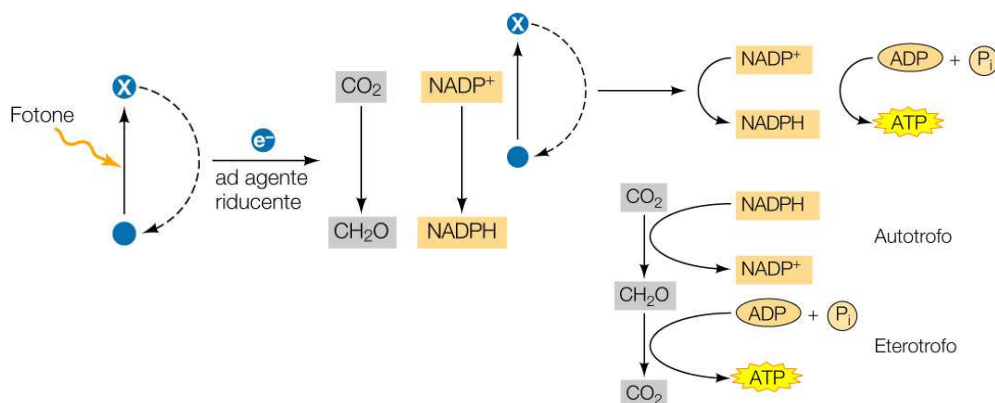


Figura 1. Schema semplificato delle reazioni che supportano la maggior parte delle forme di vita (da: Perry et al., 2004)

2. Reazioni alla luce e reazioni al buio

Nella fotosintesi l'energia luminosa causa la foto-attivazione di clorofille e batterioclorofille (Fig.2) Le clorofille sono molecole composte da quattro anelli pirrolici con un atomo di Mg al centro e una catena laterale idrofobica che serve all'ancoraggio della molecola alle membrane cellulari. Nella figura 2 è evidenziata la differenza tra la clorofilla *a* (presente nelle piante, nelle alghe e nei cianobatteri) e la batterioclorofilla *a* presente negli altri tipi di batteri fototrofi. La molecola di clorofilla e di batterioclorofilla presentano diverse sostituzioni che ne modificano lo spettro di assorbimento. Le piante presentano principalmente la clorofilla *a* e *b* mentre i batteri fototrofi possiedono fino a sette tipi di molecole di batterioclorofille diverse. Nelle reazioni che dipendono dalla luce la molecola di clorofilla (o batterioclorofilla) assorbe un fotone (foto-attivazione) e trasferisce un elettrone ad un accettore di elettroni primario. L'elettrone inizia il flusso verso il sistema di trasferimento degli elettroni ETS (Electron Transfer System, Fig 3) e ne risulta la formazione di ATP e NADPH che vengono utilizzati dalla cellula per la crescita e le biosintesi nelle reazioni indipendenti dalla luce. Negli organismi fotoautotrofi ATP e NADPH vengono usati nel Ciclo di Calvin per ottenere la fissazione della CO₂ in composti organici; le reazioni di fissazione del carbonio sono indipendenti dalla luce.

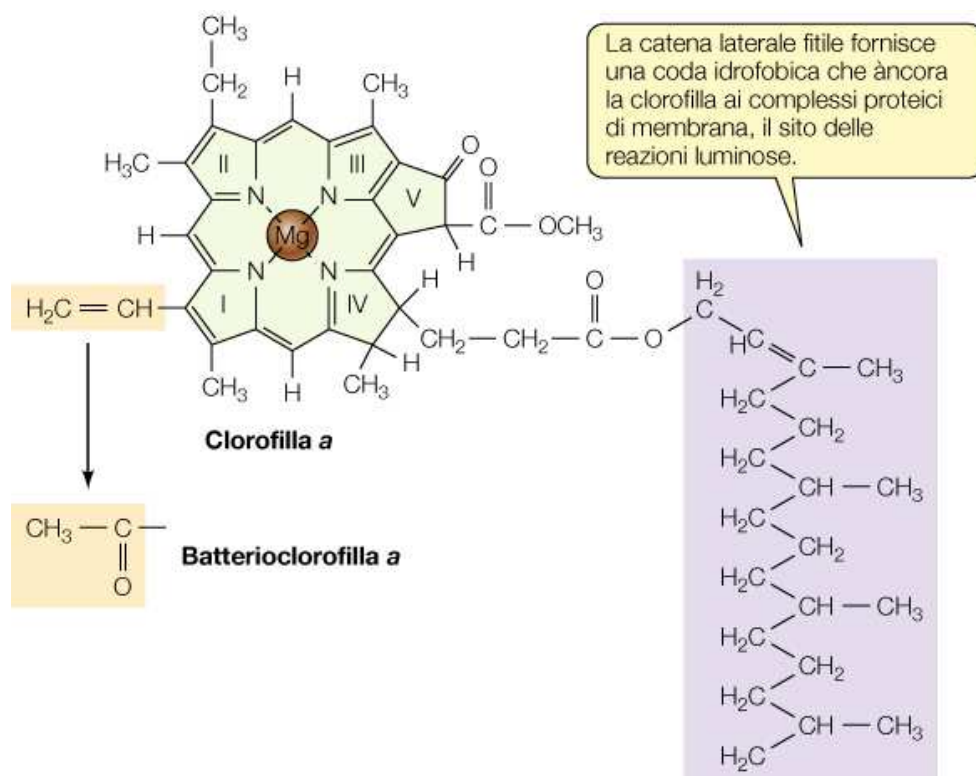


Figura 2. Struttura della clorofilla *a*. La batterioclorofilla si differenzia per il sostituito evidenziato in giallo a sinistra (da: Perry et al., 2004)

3. La fototrofia nei procarioti

I procarioti sono organismi unicellulari privi di nucleo definito. Filogeneticamente si distinguono due domini di procarioti: gli *Archaea* ed i *Bacteria*. Tra i *Bacteria* vi sono numerosi taxa fototrofi che si distinguono dai fototrofi eucarioti per diversi aspetti. I batteri fototrofi (ad eccezione dei cianobatteri) contengono batterioclorofille al posto delle clorofille inoltre i batteri sono dotati di pigmenti accessori la cui natura varia da un gruppo batterico all'altro e che consentono di sfruttare un più ampio range di lunghezze d'onda. I pigmenti accessori principali sono i carotenoidi e le ficobiline (ficocianina, ficoeritrine alloficocianina) che, oltre ad assorbire la luce, hanno anche una funzione di foto protezione. Inoltre nei procarioti non sono presenti cloroplasti ma membrane fotosintetiche variamente organizzate. La fotosintesi ossigenica è presente solo nei cianobatteri mentre gli altri batteri fototrofi svolgono fotosintesi anossigenica (vedi paragrafo n.5). Una ulteriore differenza tra piante e procarioti fototrofi è nella diversità di fonti di C utilizzate. Infatti non tutti i procarioti fototrofi sono anche autotrofi (cioè capaci di utilizzare la CO₂ come fonte di C). Alcuni batteri sono fotoeterotrofi, utilizzano cioè la sostanza organica come fonte di C pur continuando a sfruttare l'energia luminosa. Un elenco dei principali gruppi di batteri fototrofi e delle loro caratteristiche è presentato in Tabella 1. Altre scoperte recenti hanno mostrato meccanismi di utilizzazione della luce sconosciuti fino a pochi anni fa. Questi meccanismi si basano sulla conversione diretta della luce in un gradiente protonico di membrana mediato dalle proteorodopsine e dalle batterio rodopsine (vedi paragrafo 6). Questi pigmenti funzionano come pompe protoniche azionate dalla luce in diversi taxa di procarioti marini appartenenti sia ai *Bacteria* che agli *Archaea*.

Tabella 1. Alcune proprietà dei batteri fototrofi.

	Sorgente di potere riducente	Prodotto ossidato	Fonte di C	Crescita eterotrofa
Batteri purpurei non zolfo	H ₂ e materia organica ridotta	Materia organica ossidata	CO ₂ e materia organica	Sì
Solfobatteri Purpurei	H ₂ S	SO ₄ ²⁻	CO ₂	Sì (limitata)
Batteri Verdi Solfobatteri	H ₂ S	SO ₄ ²⁻	CO ₂	Sì (limitata)
Cianobatteri	H ₂ O	O ₂	CO ₂	Sì (limitata)
Eliobatteri	Lattato e materia organica	Materia organica ossidata	Lattato, piruvato	necessaria

4. Fotosintesi ossigenica e cianobatteri

Nella fotosintesi ossigenica la luce è fonte di energia mentre la fonte di carbonio è costituita dalla CO₂; l'acqua (H₂O) funge da donatore di elettroni e, pertanto, il prodotto della fotolisi dell'acqua è l'O₂. L'equazione "classica" della fotosintesi ossigenica è la seguente: $CO_2 + 2 H_2O \rightarrow CH_2O + H_2O + O_2$ ($\Delta G = + 115 \text{ kcal / mol}$). La fotosintesi ossigenica è il processo dominante nella biosfera ed è attuata dalle piante terrestri, dalle alghe e, tra i procarioti, dai cianobatteri. I cianobatteri, un tempo definiti alghe blu-verdi, rappresentano gli unici batteri fotosintetici capaci di generare ossigeno durante la fotosintesi. La loro attività è stata di fondamentale importanza nel fornire alla terra un'atmosfera ricca di ossigeno che ha consentito l'avvio della respirazione aerobia. I cianobatteri sono un gruppo di procarioti morfologicamente eterogeneo che comprende sia forme unicellulari che filamentose di dimensioni variabili da 0,5-1 µm fino a 40 µm di diametro. Contengono clorofilla (Fig.2) e ficobiline e possiedono due fotosistemi (PSI e PSII, Fig.3) molto simili a quelli delle piante verdi. I complessi pigmenti-proteine coinvolti nella fotosintesi sono disposti in strutture simili a protuberanze, chiamate ficobilisomi, che si proiettano sulla superficie esterna della membrana cellulare. I ficobilisomi sono costituiti da ficoeritrina e ficocianina che assorbono luce di diversa lunghezza d'onda. Quando la cellula si trova in presenza di radiazione verde sintetizza principalmente ficoeritrina che assorbe nel verde mentre in presenza di luce rossa viene sintetizzata ficocianina che assorbe nel rosso. Questa variabilità dei ficobilisomi è definita adattamento cromatico. L'energia luminosa assorbita dai ficobilisomi viene trasferita ai centri di reazione costituiti dalla clorofilla.

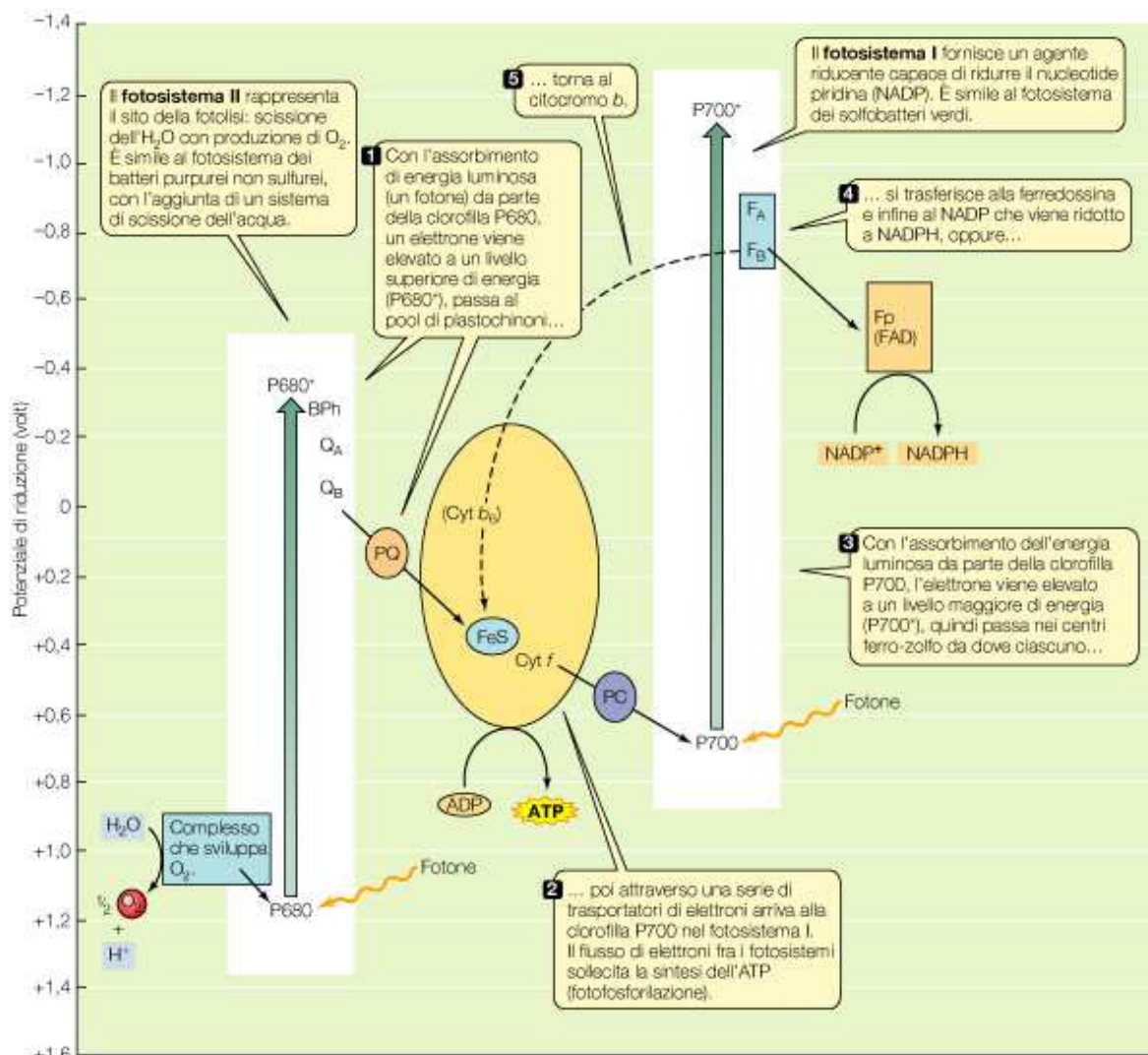


Figura 3. Flusso di elettroni nel centro di reazione di un cianobatterio. I cianobatteri possiedono due fotosistemi come le piante. Q_A, Q_B PQ plastochinoni; FeS: centro ferro-zolfo; PC plastocianina; Fd ferridossina. (Da: Perry et al., 2004)

5. Fotosintesi anossigenica

Nella fotosintesi anossigenica la luce è la fonte di energia che alimenta un unico fotosistema (Fig.4). La molecola che funge da donatore di elettroni è l'H₂S (ma anche H₂, composti organici e Fe²⁺) e pertanto il prodotto che ne deriva è lo zolfo elementare o il solfato (o il Fe³⁺). La CO₂ viene utilizzata come fonte di carbonio ma non esclusivamente poiché i batteri fototrofi anossigenici sono anche eterotrofi. L'equazione della fotosintesi anossigenica è la seguente: $CO_2 + 2 H_2S \rightarrow CH_2O + H_2O + 2S$.

La fotosintesi anossigenica è attuata da diversi gruppi di batteri (elencati in Tabella 1). I batteri fototrofi purpurei appartengono al *phylum* dei proteobatteri (batteri Gram-negativi dotati di grande diversità metabolica) e sono caratterizzati dalla presenza di membrane fotosintetiche intracitoplasmatiche nelle quali sono inseriti i pigmenti e le batterioclorofille. Nei batteri fototrofi purpurei un unico fotosistema rende possibile la produzione di ATP mediante una foto-fosforilazione definita ciclica poiché gli elettroni si spostano all'interno di un circuito chiuso tornando alla batterioclorofilla del centro di reazione. Durante questo processo tuttavia non si genera NADH (ridotto) poiché il potenziale redox dei chinoni (trasportatori di elettroni nelle membrane fotosintetiche) non è sufficientemente negativo da poter ridurre direttamente il NAD. E' quindi richiesta

energia per "spingere" gli elettroni contro gradiente e questo processo di riduzione del NAD a NADH che richiede consumo di energia sotto forma di ATP si chiama trasporto inverso di elettroni (Fig. 4).

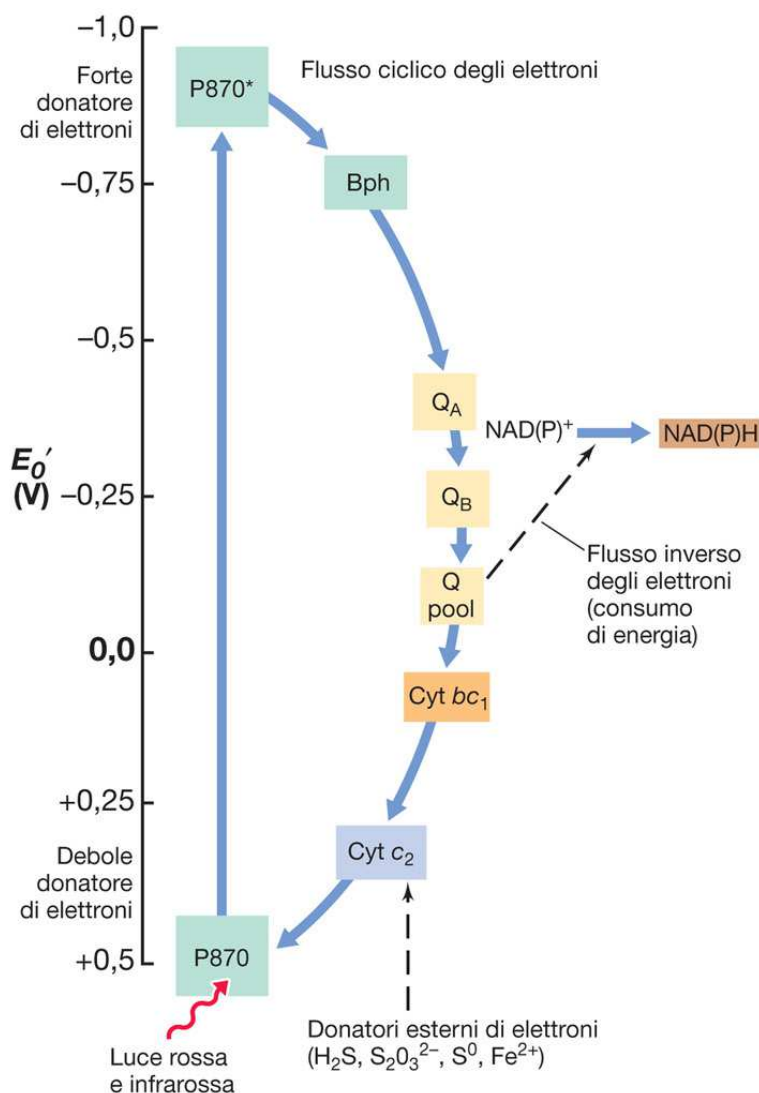


Figura 4. Schema generale del flusso di elettroni nella fotosintesi anossigenica dei batteri purpurei. L'energia luminosa converte il P870 in un donatore di elettroni (P870*) e a seguito di questo evento si verifica una serie di reazioni simili a quelle che hanno luogo nella catena di trasporto degli elettroni nella respirazione. Bph batteriofeofitina; Q_A , Q_B Q pool : chinoni; Cyt, citocromo

6. Altri meccanismi di utilizzazione della luce

In carenza di ossigeno e con luce intensa alcuni Archea alofili sintetizzano un pigmento rosso, la batteriorodopsina che è costituito da una proteina di membrana (opsina) ed un cromoforo (il retinale, aldeide della vitamina A). Le molecole di batteriorodopsina si aggregano nella membrana e formano placche (membrana purpurea) conferendo agli specchi d'acqua (es. saline) la tipica colorazione rossa.

La batteriorodopsina funziona come una pompa protonica azionata dalla luce (Fig. 5). La luce causa una modificazione conformazionale del retinale protonato della batteriorodopsina (dallo stato tutto *trans* allo 13-*cis*), ciò innesca una serie di modifiche conformazionali della proteina che comportano la traslocazione di un

protone dal citoplasma attraverso la membrana, stabilendo così una forza proto - motrice. La forza proto - motrice viene poi utilizzata dall'ATP-sintasi per la sintesi di ATP. Più recentemente in diversi batteri marini (*Bacteria*) sono state individuate proteine simili alle batteriorodopsine degli *Archea*, chiamate proteorodopsine. I geni che codificano per le rodopsine sono stati definiti cosmopoliti poiché presenti in molti taxa diversi. L'ipotesi corrente è che tali geni abbiano una particolare predisposizione per il trasferimento orizzontale e che si siano diffusi tra i procarioti per il grande vantaggio selettivo legato alla possibilità di ottenere energia dalla luce mediante la sintesi di una sola proteina e di un derivato di carotenoide.

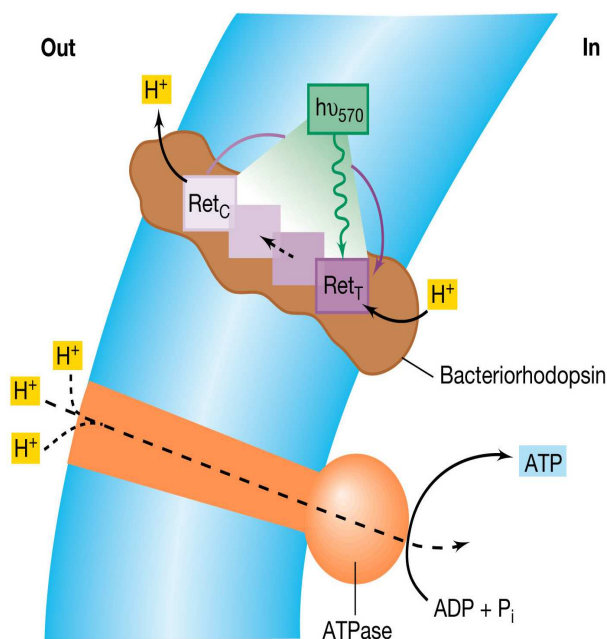


Figura 5. Modello del funzionamento della batteriorodopsina per la produzione di ATP. La luce alla lunghezza d'onda di 570 nm converte il retinale protonato dalla forma trans (Ret_T) alla forma cis (Ret_C) in parallelo alla traslocazione di un protone verso la superficie della membrana esterna stabilendo così una forza protonomotrice. Quest'ultima attiverà l'ATPasi con produzione di ATP (Da Madigan e Martinko, 2007)

7. Diversità dei fototrofi in ambiente marino

Alla luce degli studi degli ultimi anni dobbiamo concludere che le attività dei batteri fototrofi sono più diversificate di quanto si pensasse. La maggior parte di microrganismi fotosintetici in mare aperto viene considerata ossigenica ma ci sono evidenze che i batteri fotosintetici aerobi che non producono ossigeno (AAnP) costituiscono fino all'11% dei batteri marini. Recenti scoperte sui batteri marini indicano che in mare coesistono ben tre tipi di fotosintesi: la fotosintesi ossigenica (PO), la fotosintesi anaerobica anossigenica (AAnP) e la fotosintesi aerobica anossigenica (AAnP) (Fig.7). Inoltre altri due meccanismi di produzione di ATP attivati dalla luce e basati su proteorodopsine e batteriorodopsine RH e sui fitocromi (PC) rendono il quadro ancora più complesso.

Insieme, questi processi basati luce, sostengono e controllano il flusso di energia nell'oceano globale. I batteri fotosintetici trasformano la CO₂ atmosferica in sostanza organica ed è per questo che il mare viene considerato un accumulatore di sostanza organica in grado di sottrarre anidride carbonica dall'atmosfera. La maggior parte dei metabolismi fototrofi comprende anche l'eterotrofia ed è possibile che i batteri aerobi anossigenici possano usare simultaneamente la luce e la sostanza organica attuando strategie miste (foto/chemiotrofia e auto/eterotrofia) in funzione delle condizioni ambientali e della disponibilità di nutrienti.

La fotosintesi ossigenica pura (OP) può essere considerata l'eccezione in oceani a basso contenuto di nutrienti, mentre processi metabolici misti che sfruttano sia l'energia derivata dalla luce che quella derivata

dal'utilizzazione della sostanza organica (DOM) sono più probabili in mare aperto. Gli ecologi non sono ancora in grado di stabilire un bilancio completo del Carbonio e dell'energia di questi sistemi marini complessi.

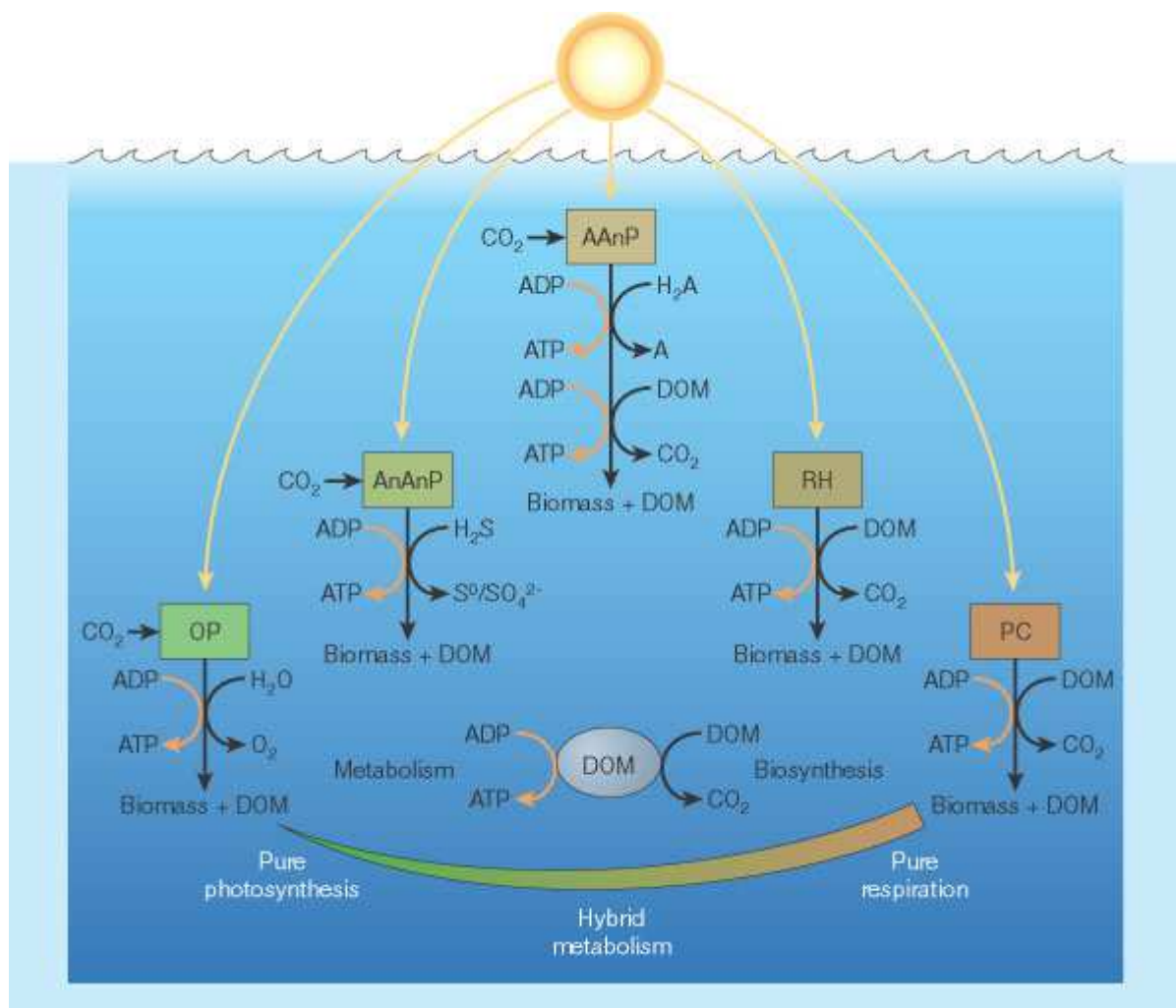


Figura 6. Una visione attuale dei complessi rapporti tra la luce solare, la produzione di energia e la materia organica disciolta (DOM) in mare aperto. PO: fotosintesi ossigenica, AnAnP: fotosintesi anaerobica anossigenica AAAnP fotosintesi aerobica anossigenica RH: produzione di ATP da attività basate su proteorodopsine e batteriorodopsine (Da Karl, 2002)

Bibliografia

Karl D. M. 2002. Microbiological oceanography: Hidden in a sea of microbes Nature 415, 590-591

Madigan, M.T, Martinko J.M. 2007. *Brock Biologia dei Microrganismi*. C.E.A.

Perry J.J., Staley J.T., Lory S., 2004. *Microbiologia Vol.1 Fisiologia, genetica virologia evoluzione e diversità*. Zanichelli ed.

Luci ed ombre sul DNA: non è solo un modo di dire!

Fabio Caradonna

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Molecolari e Biomolecolari (STEMBIO)
Sezione di Biologia Cellulare - Università di Palermo

E-mail: fabio.caradonna@unipa.it

Sommario. E' ormai assodato che ogni essere vivente, uomo compreso, ha caratteristiche che meglio lo fanno adattare all'ambiente in cui vive ed è anche altrettanto noto che all'interno di una stessa popolazione di viventi la presenza di variabilità è garanzia di adattamento all'ambiente mutevole. La variabilità genetica ha origine nel DNA, unica macromolecola in grado di gestire identità e diversità dell'informazione al susseguirsi delle generazioni; questo, nel grande tempo evolutivo, attraverso meccanismi di mutazione genetica e selezione ambientale, ha fatto sì che ogni singolo vivente erediti una capacità differenziale di adattarsi finemente all'ambiente in cui vive.

Per una cellula umana, la luce, in quanto energia, può promuovere importanti metabolismi, ma è anche fonte di mutazione per il DNA e perciò può essere ascritta fra i promotori di variabilità genetica. Oltre certi limiti, però, è anche fonte di danno cromosomico, e quindi di disfunzioni metaboliche, di gravi patologie, cancro compreso. E' per questo che nell'arco evolutivo la cellula delle specie animali più "recenti", ha sfruttato la luce come catalizzatore metabolico per reazioni biochimiche indispensabili alla vita ma, in tutti quegli ambienti dove la principale fonte di luce (il sole) era maggiormente presente, attraverso processi evolutivi di variabilità genetica, ha imparato a difendersi dai suoi effetti esagerati e dannosi. Nella specie umana, ad esempio, alcune popolazioni viventi in zone climatiche con una componente UV solare alta, hanno sviluppato un fenotipo "pelle scura" rispetto ad altre popolazioni che invece vivono in zone non molto colpite dalla radiazione solare che invece mostrano un fenotipo "pelle chiara" per riuscire a catturare il più possibile fotoni utili a soddisfare i metabolismi vitali luce-dipendenti. Luci ed ombre sul DNA: non è solo un modo di dire!

E' oggi abbastanza noto che la variabilità genetica distribuisce in una popolazione diversi genotipi a diversi individui i quali acquisiscono diversi fenotipi con i quali reagiscono diversamente a stimoli ambientali più disparati. Ciascun individuo, in buona sostanza, è una combinazione irripetibile di genotipi e di conseguenza mostrerà i conseguenti fenotipi che lo renderanno unico e diverso dagli altri. Il concetto di unicità è quindi legato a quello di diversità nel senso che solo in una popolazione di diversi è possibile distinguere elementi unici e peculiari. La variabilità fenotipica è sotto gli occhi di tutti ed è abbastanza presente nell'immaginario collettivo anche dei non competenti del settore (colore dei capelli, degli occhi, statura, etc.). Un po' meno evidente è che la variabilità fenotipica è una diretta conseguenza di quella genetica che si realizza attraverso una non fedeltà di trasmissione del messaggio genetico da una generazione all'altra: il DNA (Fig. 1) è l'unica molecola in grado di dispensare contemporaneamente identità e diversità agli organismi viventi attraverso due grandi meccanismi che assicurano identità di passaggio di informazioni (la replicazione semiconservativa) e diversità di passaggio di informazioni (attraverso la mutazione e la sua gestione) in un genoma.

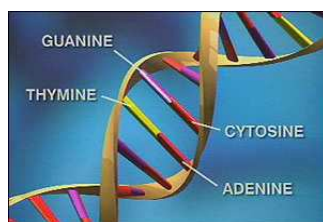


Figura 1.

Queste due condizioni, la mutazione ed il mantenimento dell'identità di sequenza, agiscono in regime di equilibrio (Fig. 2) e tutto ciò che può spingere l'equilibrio da una parte o dall'altra ha certamente delle conseguenze sui viventi in termini di eccesso di variabilità genetica o di sua diminuzione.

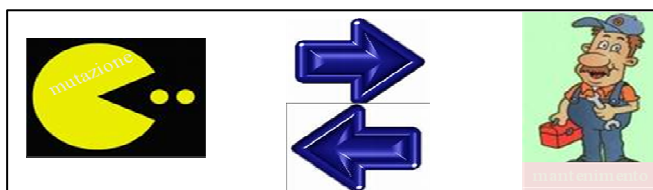


Figura 2.

Il vaglio che stabilisce nei fatti quale diversificazione dell'informazione genetica è più vantaggiosa per quella situazione contingente è l'ambiente che seleziona colui che porta informazioni relative ad un vantaggio a vivere e competere rispetto a colui che non le possiede e per questo è svantaggiato in quel tempo ed in quello spazio. La mutazione è quindi il vero motore dell'evoluzione biologica ed adesso si può comprendere perché è necessaria una grande variabilità all'interno di una popolazione, proprio per assicurare diverse combinazioni informazionali che in caso di cambiamenti ambientali rendano la popolazione in grado di sopravvivere con qualcuno dei suoi componenti particolarmente resistente a quella nuova situazione ambientale, ma anche a scapito di altri suoi componenti particolarmente sensibili a quell'insulto. I primi, riproducendosi con più facilità (per il vantaggio acquisito) trasmetteranno le loro caratteristiche alla popolazione che da essi ne ricaverà un vantaggio; i secondi, riproducendosi meno dei precedenti, nel corso delle generazioni, trasmetteranno sempre meno i loro genotipi alla popolazione futura.

E' quindi sottile il confine fra variabilità e condizione patologica (ad esempio, alleli mutati per le opsine che causano le discromie): infatti è proprio la variabilità genetica che nel grande tempo evolutivo assicura il graduale miglioramento della specie, ma nel piccolo tempo, paragonabile con la vita di un individuo, restituisce capacità differenziale di reagire a stimoli ambientali. Se questi stimoli sono anche degli insulti all'integrità del genoma o all'omeostasi cellulare, può essere compreso come il concetto di variabilità genetica è legato nel piccolo tempo a quello di suscettibilità individuale.

La luce, nella sua componente visibile ed invisibile, gioca un ruolo importante nel determinare, insieme a tanti altri agenti, il tasso di mutazione spontanea che ogni popolazione mostra nel tramandare le informazioni. I danni da irradiazione UV che un DNA subisce causano rotture a singolo e doppio filamento della sua elica che necessita di un apparato multi enzimatico per la riparazione oltre che di una serie di controlli che bloccano il ciclo cellulare affinché non prosegua tramandando o semplicemente aggravando il danno stesso. Tutti questi tratti fenotipici dipendono da geni della riparazione del DNA, geni controllori della crescita cellulare o dell'omeostasi metabolica: ogni individuo potrà essere provvisto di due copie di ogni gene controllore funzionale oppure possederne solo uno funzionale e quindi trovarsi nella condizione eterozigote. Poiché queste mutazioni agiscono in recessività, la condizione di eterozigosi non sarà fenotipicamente distinguibile da quella di omozigosi per alleli entrambi funzionali. L'esposizione a luce UV (quale quella che le cellule della cute subiscono durante una prolungata permanenza sotto la luce solare, ad esempio, per volontà di abbronzarsi) potrebbe mettere in crisi la riparazione del DNA ed il controllo della crescita cellulare di alcune cellule più esposte di un soggetto eterozigote ed invece provocare meno conseguenze in quello omozigote per alleli entrambi funzionali.

Per una cellula umana, la luce, dunque, in quanto energia, può promuovere importanti metabolismi, ma è anche fonte di mutazione per il DNA e perciò può essere ascritta fra i promotori di variabilità genetica. Oltre certi limiti, però, è anche fonte di aberrazioni cromosomiche, fra cui le traslocazioni, e quindi di disfunzioni metaboliche, di gravi patologie, trasformazione neoplastica compresa (Fig. 3).

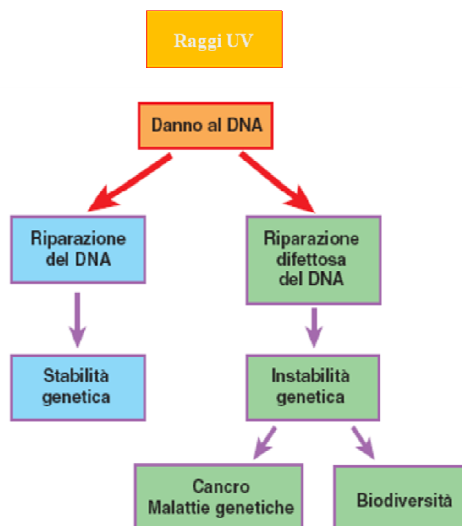


Figura 3.

È per questo che nell'arco evolutivo la cellula delle specie animali più "recenti", ha sfruttato la luce come catalizzatore metabolico per reazioni biochimiche indispensabili alla vita (quelle che coinvolgono la vitamina D, ad esempio [1]) ma, in tutti quegli ambienti dove la principale fonte di luce (il sole) era maggiormente presente, attraverso processi evolutivi di variabilità genetica, ha imparato a difendersi dai suoi effetti esagerati e dannosi. Nella specie umana, ad esempio, alcune popolazioni viventi in zone climatiche con una componente UV solare alta, hanno sviluppato un fenotipo "pelle scura" rispetto ad altre popolazioni che invece vivono in zone non molto colpite dalla radiazione solare che invece mostrano un fenotipo "pelle chiara" (Fig. 4) [2] per riuscire a catturare il più possibile fotoni utili a soddisfare i metabolismi vitali luce-dipendenti.

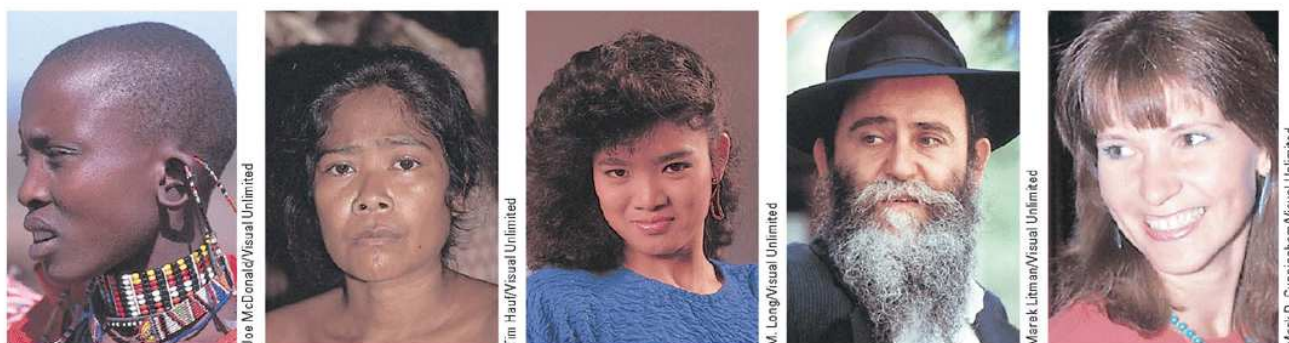


Figura 4.

In conclusione, poiché analogamente a quanto detto la variabilità genetica può agire su altri geni, interessando ad esempio i geni del gusto, o della metabolizzazione della nicotina, e contribuire così al consolidamento di alcune abitudini alimentari o stili di vita che possono influire sul rischio differenziale di contrarre patologie cronico degenerative, si può sfruttare quanto fin'ora ragionato per attività laboratoriali scolastico-educative. E' molto diffuso, infatti, nell'immaginario dei giovani in particolare, il concetto errato che vari individui hanno un uguale rischio di ammalarsi quando esposti ad una stessa fonte di danno. Questo concetto, per quanto provato qualche volta con successo, oggi sappiamo essere associabile soltanto (ed a volte con dif-

ficoltà) ai rischi di contrarre patologie infettive. Ma ormai da più di un trentennio le patologie cronico-degenerative hanno superato le infettive, soprattutto nei paesi industrializzati, come causa di morte o di sofferenza della popolazione ed è altrettanto noto che davanti alla contrazione di queste patologie spesso a poco servono i paragoni di uguaglianza con altri individui. Nel vivere comune, infatti, si osserva spesso che alcuni individui sembrano, quasi misteriosamente, immuni e fortunati ed altri, invece, particolarmente inclini ad ammalarsi e dunque sfortunati. Conducendo gli studenti attraverso il percorso logico che unisce la variabilità genetica alla suscettibilità individuale a contrarre patologie si può più ragionevolmente proporre loro di superare questo concetto di uguaglianza di rischio fra gli uomini a contrarre patologie, portandoli in maniera inductiva a comprendere che anche certi atteggiamenti, abitudini e stili di vita possono, in maniera "personalizzata" grazie alla variabilità genetica, essere fattori di rischio a contrarre patologie, anche gravi.

Bibliografia

- [1] Davis, C.D., Milner, J.A. (2011). "Nutrigenomics, vitamin D and cancer prevention". *J Nutrigenet Nutrigenomics* 4(1), 1-11. Epub 2011 Mar 23.
- [2] Cummings M.R. (2009). Eredità: "Principi e problematiche della genetica umana". Edizioni EdiSes.

Radioattività ambientale

Giovanni Magliarditi

Liceo Scientifico Archimede, Messina

e-mail: giomagli@alice.it

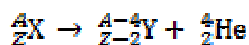
Sommario. In questo lavoro si espone un'esperienza riguardante la misurazione della radioattività ambientale fatta dagli alunni in campo aperto e facilmente riproducibile in tutte le scuole di ogni ordine e grado. Il progetto è stato proposto dalla S.I.F. (Società Italiana di Fisica) in collaborazione con l'I.N.F.N. (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) e con l' A.I.F. (Associazione per l'insegnamento della Fisica), è stato sponsorizzato dal MIUR (Ministero dell' Istruzione, dell' Università e della Ricerca) e dal Ministero dell' Ambiente. Oltre quello scientifico il fine di tale progetto è quello di avvicinare i giovani a tematiche attuali come quella della radioattività. Nella prima parte si espongono gli elementi base dei fenomeni radioattivi, delle radiazioni ionizzanti e della statistica della misura. Queste trattazioni non hanno certo la pretesa di essere esaustive ma hanno la funzione di essere di riferimento per i docenti e per gli alunni al fine di introdurre l'esperienza che viene presentata nella seconda parte del lavoro. Per ulteriori approfondimenti, dunque, si rinvia a testi specifici.

1. Radioattività naturale

Quando un nucleo atomico spontaneamente si trasforma in un altro diverso o modifica il suo stato energetico interno siamo davanti ad un fenomeno di decadimento radioattivo naturale. Possiamo avere tre tipi di decadimenti: α , β , γ . Si parla di decadimento α quando il processo è accompagnato dall'emissione di un nucleo di elio per l'appunto chiamato particella α ; si ha decadimento β quando si avverte l'emissione di un elettrone da parte del nucleo, mentre si osserva decadimento γ quando viene emessa radiazione elettromagnetica ad alta frequenza cioè fotoni molto energetici. Il decadimento naturale è possibile se la somma delle masse a riposo dei prodotti finali è inferiore a quella del nucleo originario. La differenza di massa la ritroviamo sotto forma di energia che nel caso delle reazioni α e β è sostanzialmente l'energia cinetica delle particelle ottenute dopo la reazione, mentre nel caso del decadimento γ coincide con quella dei fotoni. Nei decadimenti così descritti si conserva, oltre la massa-energia, anche la carica, l'impulso, il momento angolare ed il numero di nucleoni.

Decadimento alfa

Il decadimento α (disintegrazione α) può essere così schematizzato:



dove con X abbiamo indicato il simbolo chimico di un generico elemento radioattivo, con Y quello del nucleo generato dal decadimento, mentre con ${}^4_2 \text{He}$ un nucleo di elio: dunque la particella α .

In tale tipo di trasmutazione osserviamo come il numero di massa A del nuovo nucleo è inferiore di 4 unità rispetto a quello del nucleo originario, mentre il numero atomico Z è diminuito di 2 unità.

Decadimento beta

Il decadimento β (disintegrazione β) può essere di due tipi: β^- e β^+ .

Decadimento β^-

La relazione:



esprime un generico decadimento β^- dove, al solito, con X abbiamo indicato il generico nucleo padre mentre con Y il generico nucleo figlio. In questa reazione si osserva l'emissione di una particella β^- corrispondente ad un elettrone negativo e^- emesso dal nucleo nonché l'espulsione di un antineutrino $\bar{\nu}$.

Quest'ultima reazione è a sua volta interpretabile attraverso la seguente:



che descrive come all'interno di un nucleo un neutrone n si trasforma in un protone p (che resta nel nucleo) più un elettrone ed un antineutrino che vengono entrambi espulsi.

Nel caso in esame osserviamo che dopo la trasmutazione β^- il numero di massa A è rimasto invariato mentre il numero atomico è aumentato di un'unità.

Decadimento β^+

Siamo davanti a decadimento β^+ quando all'interno di un nucleo un protone p si trasforma in un neutrone n e viene emesso un positrone e^+ (particella β^+) ed un neutrino ν secondo la relazione:



La reazione nucleare può essere così sintetizzata:



con l'ovvio significato dei simboli.

In una simile trasmutazione si osserva che il numero di massa A è rimasto inalterato come nel decadimento β^- mentre, in questo caso, il numero atomico è diminuito di un'unità.

Decadimento gamma

Gran parte dei decadimenti alfa e beta lasciano il nucleo in uno stato eccitato che si riassetta emettendo fotoni ad alta energia chiamati radiazioni gamma. In questo tipo di decadimento, quindi, il numero di massa ed il numero atomico restano invariati.

2. La legge del decadimento radioattivo

I decadimenti spontanei dei nuclei sono processi casuali indipendenti gli uni dagli altri per cui non è possibile prevedere quando un nucleo decada ma è possibile prevedere la probabilità che un certo numero di atomi di una data specie si disintegrino in un dato intervallo di tempo.

Consideriamo un campione radioattivo costituito da una certa quantità N_0 di atomi. Dopo un tempo dt il numero dN di atomi decaduti è proporzionale al tempo infinitesimo dt nonché al numero di atomi N , non ancora disintegrati, presenti al tempo t :

$$dN = -\lambda N dt$$

in questa relazione il segno meno sta ad indicare che la quantità di atomi che si trovano nello stato iniziale diminuisce nel tempo, mentre il fattore di proporzionalità λ , chiamato costante di decadimento (o di disintegrazione), è un parametro caratteristico dell'elemento considerato.

La precedente relazione può essere riscritta nel seguente modo:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

da cui integrando

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

si ottiene la relazione:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

detta legge di decadimento radioattivo.

Di particolare interesse è considerato il tempo che deve trascorrere per dimezzare il numero iniziale N_0 di radionuclidi che, per l'appunto, viene chiamato tempo di dimezzamento T .

Dalla legge di decadimento sopra descritta si ottiene:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

da cui:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

quindi:

$$\lambda T = \ln 2$$

dunque:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

3. Radiazioni ionizzanti

Le radiazioni su descritte sono dette ionizzanti nel senso che quando interagiscono con la materia sono in grado di ionizzare gli atomi che la costituiscono. Nei sistemi biologici le radiazioni ionizzanti possono generare la formazione di radicali liberi nonché la rottura di legami nelle molecole del DNA che, di conseguenza, procura alterazioni genetiche alle cellule. Se la radiazione non è sufficientemente elevata la materia vivente è in grado di riparare il danno, altrimenti possono essere prodotti danni biologici permanenti. In ogni modo, come meglio vedremo in seguito, tutto ciò non deve dar luogo ad eccessive preoccupazioni, in quanto, la vita è "nata" in presenza di radiazioni naturali a bassa attività e continua a prosperare indisturbata in tali condizioni. Il terreno, l'acqua, l'aria, gli alimenti contengono elementi radioattivi che interagiscono con gli esseri vivente. La Terra, inoltre, riceve costantemente dallo spazio siderale un flusso di radiazioni costituito da raggi cosmici che trovano origine nel Sole e nelle altre stelle.

Particolari parametri significativi per lo studio delle radiazioni sono:

- L'attività (A) intesa come il numero di disintegrazioni al secondo ed ha come unità di misura il Becquerel (Bq). Dove $1\text{Bq} = 1$ disintegrazione al secondo.
- La dose assorbita (D) che è l'energia assorbita dalla massa di 1 kg della materia considerata e si misura in Gray (Gy). $1\text{Gy} = 1\text{J}/1\text{kg}$.
- L'intensità di dose, misurata in $1\text{Gy}/1\text{s}$, che indica la rapidità con cui viene assorbita la dose da un particolare materiale.

Poiché il danno biologico dipende dalla quantità di energia assorbita dalla materia vivente sono state definite delle grandezze che mettono in relazione l'energia assorbita con il danno biologico.

In radioprotezione importanti grandezze da considerare sono:

- Dose equivalente

Dal momento che radiazioni di diverso tipo producono, a parità di energia, danni diversi, in quanto rilasciano energia in modo diverso, è stata definita dalla ICRP (International Commission for Radiological Protection) la grandezza "dose equivalente (H_T)", misurata in Sievert (Sv), riferita ad un organo o ad un tessuto. La H_T si ricava come prodotto della dose assorbita (da un organo o da un tessuto) D_T moltiplicata per un fattore w_R , detto anche efficacia biologica relativa, che dipende dal tipo di radiazione.

$$H_T = D_T \cdot w_R$$

I valori w_R sono stati definiti prendendo come riferimento i fotoni per i quali a w_R è stato dato, per definizione, il valore 1. A titolo di esempio prendiamo in considerazione le radiazioni α per le quali $w_R = 20$, questo significa che il danno biologico prodotto da tali radiazioni, a parità di dose assorbita, è venti volte superiore a quello prodotto dai fotoni.

- Dose efficace

dal momento che il danno biologico, oltre che dal tipo di radiazione, dipende, anche dall'organo o dal tessuto irraggiato, bisogna introdurre un altro parametro (w_T) che tenga conto di ciò. A titolo di esempio consideriamo il fattore 0,12 relativo ai polmoni. Questo significa che se una persona viene irraggiata uniformemente il 12% della probabilità di ottenere danno biologico dipende dall'irraggiamento dei polmoni.

Dunque, la dose efficace (E), espressa in Sievert, è un indice del possibile danno biologico dell'intero individuo e tiene conto sia dell'efficacia biologica (dovuta alla diversa tipologia delle radiazioni) che della diversa suscettibilità dei vari organi (o tessuti). La E si calcola sommando, per tutti gli organi (o tessuti), i prodotti delle singole dosi equivalenti (H_T), riferite ad ogni singolo organo (o tessuto), moltiplicate per i corrispondenti fattori di peso (w_T) degli organi (o dei tessuti) stessi:

$$E = w_{gonadi} \cdot H_{gonadi} + w_{midollo} \cdot H_{midollo} + w_{colon} \cdot H_{colon} + \dots\dots$$

Alla luce di quanto detto vediamo di quantificare l'entità del rischio a cui è soggetto un essere umano sottoposto a radiazioni ionizzanti. In modo molto sintetico possiamo dire che per ogni mSv assorbito all'anno da un adulto la probabilità di ammalarsi a causa delle radiazioni ionizzanti aumenta dello 0,0056%. La legislazione italiana ritiene di considerare come "rischio accettabile" per un lavoratore classificato "esposto" la probabilità di ammalarsi di 1 individuo su mille e questa si ottiene se si assorbono 20 mSv annui ($0,0056\% \cdot 20 \approx 0,1\%$). Tale probabilità è paragonabile a quella di un lavoratore del settore tessile ed è inferiore a quella di un lavoratore del settore edile, mentre per la popolazione è considerato "rischio accettabile" la probabilità di contrarre malattie provocate da radiazioni ionizzanti da 1 persona su 20 mila e questo valore si ottiene se si è esposti a circa un mSv annuo.

4. Il contatore Geiger

Descriviamo, adesso, brevemente lo strumento utilizzato per la nostra esperienza e cioè il contatore Geiger. Questo strumento, pur essendo stato concepito circa un secolo fa, continua ad essere utilizzato per la sua semplicità e praticità d'uso. Esso misura il numero di particelle ionizzanti che lo attraversano nell'unità di tempo. E' costituito da un'ampolla contenente due elettrodi, immersi in gas a bassa pressione (di solito argon), tra cui vi è una differenza di potenziale dell'ordine del centinaio di Volt. Quando una particella ionizzante attraversa l'ampolla provoca la ionizzazione del gas generando una scarica che viene rivelata da un semplice circuito elettronico. In questo modo si riescono a contare il numero di particelle che attraversano il

dispositivo. Questo strumento, quindi, è stato da noi utilizzato per misurare il numero di conteggi al minuto (cpm) e non l'intensità di dose ambientale. Il contatore è stato interfacciato con un computer che, attraverso un software dedicato, ha elaborato i conteggi.

5. Il progetto

La Società Italiana di Fisica (S.I.F.) in collaborazione con l' Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.) e con l' Associazione per l'insegnamento della Fisica (A.I.F.), ha avviato, sotto la guida del responsabile nazionale prof. Roberto Habel, una campagna per la rilevazione della radioattività ambientale in Italia. Il progetto è stato, dunque, sponsorizzato dal Ministero dell' Istruzione, dell' Università e della Ricerca (MIUR) e dal Ministero dell' Ambiente.

Oltre quello scientifico il fine di tale progetto è quello di avere una ricaduta didattica per cui le misurazioni vengono effettuate con l'ausilio degli allievi delle scuole presenti sul territorio. Sono stati, dunque, distribuiti agli Enti interessati circa cinquanta strumenti atti a rilevare i parametri in esame. Significativo partner in tale iniziativa si è rivelata l'A.I.F. che con le numerose Sezioni permette una diffusa attuazione delle attività. In questo lavoro vengono presentati i risultati ottenuti monitorando sette siti ubicati in provincia di Messina nonché la misura della radioattività rilevata sul monte Etna. Infatti, a Messina la locale Sezione, in accordo con gli Istituti scolastici della provincia, ha effettuato numerose misurazioni in località ritenute significative sia da un punto di vista geografico (zona tirrenica e zona jonica) che geologico (zone vulcaniche).

6. La statistica della misura

I valori riferiti ad una misurazione fisica ripetuta molte volte non sono tutti uguali, ma seguono una determinata "distribuzione di probabilità", che per molti esperimenti è quella gaussiana (altrimenti intesa distribuzione "normale"): ad esempio le misure del periodo di un pendolo, le misure della lunghezza di un oggetto, etc. . In questi casi il valore più attendibile è la media dei valori ottenuti, mentre l'incertezza della misura è legata alla deviazione standard. Si tratta quindi di una distribuzione che dipende da due parametri: la media e la deviazione standard. I risultati di un conteggio di particelle con un Geiger seguono invece una statistica di "eventi rari" che è governata dalla distribuzione di Poisson (Fig. 1). A titolo di esempio sono state effettuate due serie di misurazioni nello stesso sito ma con durata differente e sono stati, dunque, riportati in due istogrammi i valori osservati.

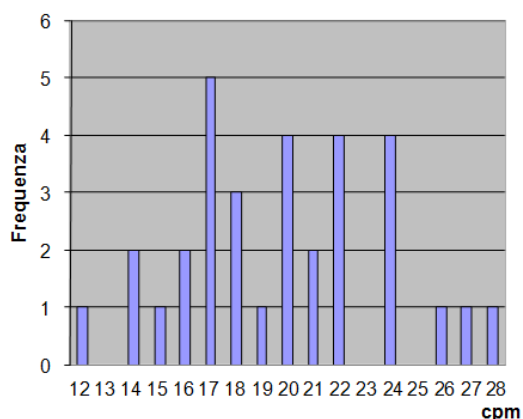


Figura 1. Con un basso numero di misurazioni si osserva una distribuzione di Poisson

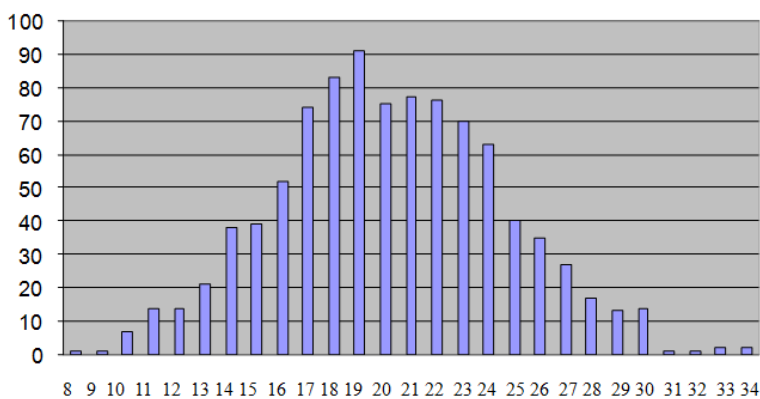


Figura 2. Con un alto numero di misurazioni si osserva una distribuzione di Gauss

Si noti che la distribuzione poissoniana, in generale asimmetrica (Fig. 1), tende ad una distribuzione normale quando il numero di conteggi è elevato (Fig. 2).

Tornando alla distribuzione di Poisson, possiamo dire che essa dipende da un solo parametro poiché la media e la deviazione standard sono legate da una semplice relazione matematica. Si dimostra che la deviazione standard della distribuzione è data dalla radice quadrata del valore medio, ovvero:

$$\sigma = \sqrt{M} \quad (1)$$

In una serie di misurazioni l'incertezza statistica associata al valor medio (se il livello di confidenza scelto è 68%) può essere valutata come la deviazione standard divisa per la radice del numero delle misure, cioè:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{M}{n}} \quad (2)$$

L'incertezza relativa percentuale sarà pertanto:

$$\epsilon_{\%} = 100 \cdot \frac{\epsilon}{M} = \frac{100}{\sqrt{M-n}} \quad (3)$$

Operativamente (come sarà meglio specificato in seguito) questo si traduce nella necessità di effettuare una serie di misurazioni tale che l'incertezza sul risultato finale sia ragionevolmente bassa, per esempio il 5%.

7. La misurazione

Lo strumento consiste in un kit (Fig. 3) composto da un computer portatile dotato di software dedicato per l'elaborazione delle misure, da un contatore Geiger, interfacciato con il computer, e da un GPS per la rilevazione delle coordinate geografiche; il GPS è anch'esso interfacciato con lo stesso portatile.



Figura 3. Il kit per le misurazioni

Prima di iniziare l'esperienza è necessario scegliere un luogo non influenzato da fattori che potrebbero alterare i valori della radioattività ambientale naturale come, ad esempio, la presenza di costruzioni in cemento, muri, pavimentazione, etc. . E' per tale motivo che la prova viene svolta all'aperto in un terreno libero dove vengono posizionati i sopraelencati elementi avendo cura di porre il contatore Geiger all'altezza di

circa un metro dal suolo. Viene quindi azionato lo strumento che rende possibile osservare sul monitor del portatile le misure rilevate espresse in cpm. Il programma di gestione del contatore è settato in modo tale da effettuare una registrazione al minuto.

Dalla (3), sostituendo μ a M , nell'ipotesi di ottenere un'incertezza percentuale inferiore al 5%, si esplicita n e si ottiene:

$$n = \frac{1}{\mu \cdot (0,05)^2} \quad (4)$$

Si fa, dunque, una stima di massima dei conteggi (μ) e si applica la (4) per decidere il numero di misurazioni da fare al fine di ottenere un'incertezza inferiore a quella prevista del 5%.

A titolo di esempio vengono riportate le misure fatte a Messina (zona Bocchetta) in prossimità del Liceo Scientifico Archimede (Tabella 1).

Il valore μ dato da una prima stima è di 18 cpm, con questo valore n risulta pari a 22. Per maggior sicurezza si decide, quindi, di fare 30 misurazioni. Si procede in questo modo per 30 minuti fino a raggiungere un totale di 30 registrazioni. Questa serie di misure viene, dunque, memorizzata su un file chiamato "Archimede 1". La prova viene ripetuta per altre quattro volte riposizionando lo strumento in punti dello stesso sito posti a breve distanza tra loro. Le nuove quattro serie di dati vengono memorizzate su altrettanti quattro file denominati: "Archimede 2", "Archimede 3", "Archimede 4" e "Archimede 5".

L'opportunità di effettuare più di una serie di misurazioni nasce dalla considerazione che il sottosuolo, da cui provengono le radiazioni, è composto da variegate componenti che presentano valori diversi di radioattività. Pertanto, è necessario ripetere le misurazioni in posizioni differenti al fine di monitorare il sito su un'ampia area.

Alla fine dell'esperienza, con l'ausilio del GPS, si rileva il punto geografico che risulta essere:

Latitudine	38° 11' 56"
Longitudine	15° 32' 44"
Altezza	80 m

8. Elaborazione dei dati

Per ogni serie di misurazioni si calcola il valor medio M e la deviazione standard secondo Gauss:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - M)^2}{n}}$$

Si confronta con la deviazione standard secondo Poisson:

$$\sigma = \sqrt{M}$$

si calcola l'incertezza:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{M}{n}}$$

e l'incertezza relativa percentuale:

$$\epsilon_{\%} = 100 \cdot \frac{\epsilon}{M} = \frac{100}{\sqrt{M \cdot n}}$$

Si ripetono i calcoli per ogni serie, si fa, poi, la media totale (M_t) fra le medie delle singole serie, si calcola la deviazione standard (σ_m) dei valori medi di ogni serie ed infine si stima la variabilità del sito esprimendola in percentuale:

$$\text{Variabilità del sito} = \frac{\sigma_m}{M_e} \cdot 100$$

Riguardo l'esempio sopra citato si ottiene la tabella 1.

Tabella 1. Cinque serie di misure effettuate a Messina in prossimità del Liceo Scientifico Archimede (zona Boccetta)

	Archimede 1	Archimede 2	Archimede 3	Archimede 4	Archimede 5				
12	14	23	20	22					
21	23	20	21	16					
27	21	25	19	9					
19	11	16	10	20					
16	23	17	17	20					
15	18	16	14	22					
16	15	26	21	20					
17	15	23	16	15					
15	11	18	18	16					
16	9	13	18	17					
15	16	14	15	20					
19	16	17	21	15					
20	20	29	16	17					
17	17	20	18	22					
21	12	12	12	19					
12	13	22	19	20					
19	11	22	18	18					
19	27	24	15	20					
11	25	19	18	7					
20	17	16	20	10					
17	19	18	19	22					
18	19	18	18	20					
18	20	17	23	22					
28	12	16	22	19					
22	17	23	21	29					
18	17	13	27	21					
15	13	16	25	12					
16	22	16	21	15					
10	16	18	19	24					
16	24	13	16	9					
Media	18	17	19	19	18	Media totale	18	Dev. Stand. della media	0,67
Dev. Stand. (Gauss)	4,00	4,65	4,26	3,55	4,90				
Dev. Stand. (Poisson)	4,18	4,14	4,32	4,31	4,23				
Incertezza (%)	4,36	4,42	4,23	4,24	4,31				

Notiamo che le incertezze calcolate dopo l'elaborazione sono in accordo con quelle desiderate (stimate a priori inferiori al 5%).

I risultati vengono, dunque, sintetizzati nella tabella 2.

Tabella 2. Sintesi dei risultati (zona Boccetta Messina)

KIT	1094			
Tutor	Giovanni Magliarditi			
Isituto	L.S. Archimede			
Classe	3 I; 2 B; 2 N			
gruppo				
data	03/12/2005			
SITO	Messina			
lat.	38° 11' 56"			
long.	15° 32' 44"			
altezza	80 m			
	media (cpm)	st dev (cpm)	n misure	incertezza (cpm)
posizione 1	18	4,18	30	0,8
posizione 2	17	4,14	30	0,8
posizione 3	19	4,32	30	0,8
posizione 4	19	4,31	30	0,8
posizione 5	18	4,23	30	0,8
media sito (cpm)	18			
variabilità sito	4%			
Note ed osservazioni				
La misura è stata fatta a Messina città, in campo aperto, in prossimità del torrente Boccetta. Nel sottosuolo sono presenti rocce sedimentarie				

9. Risultati finali

Nella tabella 3 vengono esposti i risultati dei siti monitorati.

Tabella 3. Siti monitorati

Sito	Coordinate geografiche	Media (cpm)	Variabilità del sito	Sintetica descrizione del sito
Messina (Bocchetta)	Lat. 38° 11' 56" Long. 15° 32' 44" Quota 80 m	18	4%	Rocce sedimentarie
Giammoro	Lat. 38° 12' 05" Long. 15° 19' 20" Quota 45 m	18	5%	Abbondante acqua nel sottosuolo
S. Placido	Lat. 38° 04' 39" Long. 15° 29' 17" Quota 203 m	19	9%	Terreno argilloso
Isola di Lipari	Lat. 38° 30' 55" Long. 14° 57' 25" Quota 90 m	53	4%	Pomice e ossidiana
Isola di Vulcano	Lat. 38° 24' 57" Long. 14° 57' 38" Quota 5 m	29	7%	Zolfo, acque sulfuree salsobromoiodiche
Roccalumera	Lat. 37° 58' 46" Long. 15° 23' 57" Quota 0 m	14	12%	Spiaggia
Caronia	Lat. 38° 02' 17" Long. 14° 26' 35" Quota 0 m	10	8%	Spiaggia
Monte Etna (Rifugio Sapienza)	Lat. 37° 42' 00" Long. 14° 59' 55" Quota 1952 m	25	8%	Rocce vulcaniche effusive

10. Considerazioni

I valori più alti di radioattività sono stati riscontrati nelle zone vulcaniche: Isola di Lipari, Isola di Vulcano, Monte Etna; mentre i valori più bassi sulle spiagge di Roccalumera (Zona jonica) e di Caronia (zona tirrenica).

Sull'Etna sensibilmente più bassi sono stati i valori osservati nella prima serie di misure, fatta su di una colata lavica meno recente, rispetto agli altri rilevati su colate più giovani.

L'iniziativa si è rivelata una valida esperienza didattica in quanto gli allievi hanno imparato ad utilizzare sofisticati strumenti di misura, hanno raggiunto la padronanza delle tecniche riguardanti l'analisi e l'elaborazione statistica dei dati nonché l'interpretazione degli stessi. Inoltre, hanno affrontato le tematiche relative alle radiazioni ionizzanti.

11. Riproducibilità dell'esperienza

L'esperienza è facilmente riproducibile in tutte le scuole di ogni ordine e grado in quanto il costo del Geiger, compreso di software, è di qualche centinaio di Euro. Inoltre, è possibile proporre l'esperimento a vari livelli da tutti gli insegnanti di scienze sperimentali. Infatti, nella scuola primaria ci si può limitare all'acquisizione del conteggio, nelle scuole secondarie di primo grado si possono trattare anche i decadimenti, mentre nelle scuole secondarie di secondo grado è possibile estendere lo studio all'elaborazione dei dati statistici.

Bibliografia

Bedogni, R.. *Radiazione e radioprotezione*. INFN Laboratori Nazionali di Frascati.

Caforio, A., Ferilli A. (2009) *Fisica*. (Firenze: Le Monnier).

Magliarditi, G. (2007). Misure di radioattività ambientale a Messina e dintorni. *La Fisica nella Scuola*, anno XL n. 3, supplemento,.

Sito ufficiale italiano dell'Anno Mondiale della Fisica. www.wyp2005.it

Materiale e immateriale in interazione

Giovanni Villani

Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici (ICCOM – UOS Pisa)

villani@pi.iccom.cnr.it

Sommario. La luce è da sempre stata utilizzata sia per scopi pratici sia innalzata a divinità nelle antiche religioni. La sua capacità di interagire con la materia e di provocare trasformazioni, permanenti o temporanee, è un fatto ben noto dall'antichità. Gli effetti dell'interazione luce-materia sono, infatti, ben rilevabili dai sensi, per esempio il riscaldamento provocato dall'irraggiamento. Nel corso dei secoli, sono state proposte molte ipotesi su come l'interazione luce-materia potesse avvenire e come innescasse le trasformazioni nella materia. Tuttavia, è solo con lo sviluppo scientifico recente che si è arrivati a una comprensione soddisfacente dei processi di interazione luce-materia e delle trasformazioni indotte dalla radiazione luminosa. Una conoscenza dell'interazione luce-materia ha, infatti, dovuto attendere sia la comprensione del fenomeno della radiazione luminosa sia lo sviluppo della teoria atomica/molecolare della materia.

Abstract. The light has always been used for both practical purposes and raised to divinity in the ancient religions. His ability to interact with matter and to cause changes, permanents or temporaries, is a fact well known since antiquity. The effects of light-matter interaction are, in fact, well detectable by the senses, for example, the warming effect due to irradiation. Over the centuries, they have been proposed many hypotheses about how the light-matter interaction could take place and how to activate changes in the matter. However, it is only recently that scientific development has reached a satisfactory understanding of the light-matter interaction processes and of the transformations induced by light. A knowledge of light-matter interaction has, in fact, had to wait for both the understanding of the phenomenon of light radiation and the development of atomic/molecular theory of the matter.

1. Introduzione

In questo lavoro andremo a sviluppare i tre termini del titolo: materiale, immateriale e interazione. Per materiale si intende un pezzo di materia, non necessariamente pura e, in questo contesto dove vogliamo analizzare l'interazione della materia con la radiazione, è stato usato tale termine per contrapporlo al termine seguente, "immateriale". In particolare, andremo a mostrare l'evoluzione del concetto di "materia microscopica", e principalmente di atomo, in un breve lasso di tempo (meno di vent'anni) tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento. In quel periodo storico, in parte per scoperte sperimentali (elettrone, radioattività) in parte per elaborazione teorica (radiazione del corpo nero, modelli atomici), si modificò in maniera sostanziale il concetto di atomo.

L'immateriale che andremo a considerare in questo lavoro è rappresentato dalla radiazione. Essa non sempre fu ritenuta "immateriale". Newton, infatti, pensava che la radiazione fosse materiale e lo stesso Lavoisier tra i trentatré elementi da lui determinati inserì anche la luce. Accanto a questa visione "materialista" della luce, è stata sempre presente una visione che la considerava immateriale. Si attribuisce in genere a Huyghens (fisico olandese, contemporaneo di Newton) l'idea che la luce fosse un'onda. Nell'Ottocento, tale idea venne codificata da Maxwell nelle famose equazioni che descrivono matematicamente l'oscillazione del campo elettrico e magnetico, creando la dizione (ancora attuale) di radiazione elettromagnetica.

Considereremo, infine, l'interazione tra la materia e la luce. Se la materia fosse "assolutamente" materiale e la luce "assolutamente" immateriale, anche la loro interazione sarebbe di principio esclusa. In realtà, nella fisica odierna la materia è diventata meno materiale, assumendo aspetti immateriali, mentre la radiazione ha

assunto aspetti materiali, accanto a quelli ondulatori. Queste due realtà sono diventate, quindi, molto più simili e anche la loro interazione più "naturale".

Il punto fondamentale di questo lavoro è, tuttavia, quello di mostrare che la materia non può essere completamente "dissolta" in concetti immateriali come l' "energia", perché essa ha una sua "organizzazione" (o "struttura") che rende il concetto di materia ineliminabile. È proprio tale organizzazione, o meglio la sua modifica, che viene attivata dalla luce e, studiando i risultati di tale interazione, possiamo capire come questo pezzo di mondo è "organizzato/strutturato". Questo vale per il concetto di atomo che, come vedremo, ha dovuto introdurre, proprio nel periodo studiato, l'essenziale concetto di struttura. A maggior ragione, vale per il concetto principe della chimica, la molecola, e, quindi, anche se non parleremo molto delle molecole, va sempre tenuto presente che le spettroscopie hanno proprio queste ultime con loro soggetto principale di studio.

2. L'atomo tra fine Ottocento e inizio Novecento

Il concetto di atomo (e la sua controparte macroscopica, il concetto di elemento) ha una lunga storia. Essa può essere fatta risalire indietro nel tempo di venticinque secoli, ma probabilmente, considerando anche la civiltà indiana, anche di più [1]. Io credo che questa lunga storia possa essere raggruppata in quattro fasi: dall'atomo greco/romano a quello "riscoperto" nella scienza moderna (fino al XVIII secolo), l'atomo ottocentesco da Dalton in poi, l'atomo di inizio Novecento (fino a Bohr) ed, infine, l'atomo quantistico. Io in questo lavoro mi occuperò solamente di un piccolo pezzetto di tale storia (la terza fase), meno di vent'anni tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento. In questo breve periodo, infatti, dei cambiamenti, sia sperimentali sia teorici, portarono a una "rivoluzione" del concetto di atomo, chiudendo quello che può essere definito "l'atomo classico", per poi dare vita a quello "quantistico". In questo piccolo lasso di tempo, il concetto di atomo subì trasformazioni fondamentali, fino a diventare contraddittorio con il suo stesso nome (che, come è noto, significa "indistruttibile"). In concomitanza, anche il concetto di elemento si modificò sostanzialmente, quasi ripescando "la trasmutazione" alchemica. In pratica, i due decenni che vanno dalla scoperta dell'elettrone nel 1897 all'atomo di Bohr nel 1913, segnano una vera svolta nelle conoscenze sulla materia, sulla radiazione e sulla loro interazione.

La data di nascita dell'elettrone è il 1897, anno in cui J. J. Thomson, direttore del *Cavendish Laboratory* di Cambridge, osservò che i raggi catodici erano sensibili ai campi elettrici e magnetici e che si comportavano come particelle cariche negativamente. Thomson progettò un esperimento per determinare le caratteristiche di queste particelle. Dalla misura della loro velocità, Thomson riuscì a determinare il rapporto carica/massa in funzione di alcune grandezze dell'apparato sperimentale. Il valore trovato risultava essere circa 2000 volte più grande del rapporto carica/massa dello ione idrogeno (cioè del protone). Inoltre questo valore era sempre lo stesso indipendentemente dal materiale di cui era fatto il catodo e indipendentemente dal tipo di gas che aveva generato i raggi catodici. Da ciò egli dedusse che gli elettroni erano costituenti di tutti gli atomi [2 (traduzione mia)] "poiché gli elettroni possono essere prodotti da tutti gli elementi chimici, noi dobbiamo concludere che essi entrano nella costituzione di tutti gli atomi. Noi abbiamo quindi fatto il primo passo verso la comprensione della struttura dell'atomo".

La scoperta dell'elettrone nel 1897 da parte di J. J. Thomson cambiò la prospettiva nello studio del legame chimico e introdusse il concetto di "struttura atomica". Della sua influenza sul concetto di legame chimico non mi occupo in questo lavoro. Si può fare riferimento a [3 (Cap. 5), 4 (Cap. 6)] per i lettori interessati. Qui mi occupo della nascita del concetto di "struttura atomica". Tale strutturazione dell'atomo ha notevoli conseguenze, sia in campo scientifico sia in quello epistemologico. Il concetto di "struttura", infatti, richiama alla mente sia le Scienze della Complessità sia la Sistemica. Altrove [5], ho proposto di considerare la chimica come una scienza della "complessità sistemica" *ante litteram* proprio per l'importanza che in tale disciplina esplica tale concetto. Ritornando a Thomson, egli trovò che i raggi catodici, prodotti da una scarica elettrica in un tubo contenente gas rarefatti, erano formati da particelle che trasportavano una carica elettrica negativa. Questo provava la natura corpuscolare dell'elettricità. In realtà già alla fine dell'Ottocento questo era chiaro a Helmholtz (1881) "Il risultato più stupefacente della legge di Faraday è forse questo. Se accettiamo l'ipotesi che le sostanze elementari siano composte da atomi, non possiamo non giungere alla conclusione che anche l'elettricità, tanto positiva quanto negativa, è divisa in definite porzioni elementari, che si comporta-

no come atomi di elettricità" e a Nernst (1898): "l'invariabilità della carica minima trasportata da uno ione fa sì che si debba ascrivere alla stessa elettricità una struttura atomistica, e anche ammettere l'esistenza di particelle elementari positive o negative" [6, (p. 71)].

La presenza degli elettroni negli atomi portò a molte domande e le principali erano: il numero di elettroni presenti in ogni atomo, dove risiede la carica positiva e come spiegare la massa degli atomi. Queste problematiche costituirono gli ingredienti del concetto di struttura atomica. Nel 1904 Thomson, parecchi anni dopo la scoperta dell'elettrone, in un saggio sul *Philosophical Magazine*, propose il suo modello atomico. Il modello consisteva in una sfera di carica positiva e priva di massa e di decine di migliaia di corpuscoli che si muovevano al suo interno su orbite circolari, disposte su di un piano e concentriche. I «corpuscoli» di Thomson erano gli unici portatori di massa, e di conseguenza il loro numero era enorme. Il modello spiegava bene il legame polare ed era stabile rispetto alle leggi dell'elettromagnetismo classico. La stabilità, infatti, era ottenuta considerando i corpuscoli in movimento su orbite circolari, in numero crescente dal centro verso l'esterno. L'immagine didatticamente consolidata dei canditi e del panettone, che ha poi etichettato questo modello, è sicuramente fuorviante.

Nel 1911 E. Rutherford elaborò il modello planetario dell'atomo. L'elemento centrale di questo atomo era il nucleo, molto più piccolo dell'atomo, di carica positiva e che portava la quasi totalità della massa. Attorno vi ruotavano gli elettroni, in numero non così elevato come per Thomson. Ogni tipo di atomo era caratterizzato dal suo numero di elettroni e quindi, per la neutralità, dalla sua carica nucleare. L'atomo di Rutherford era un atomo dove predominava il vuoto. Nel 1920 Rutherford diede a questo nucleo atomico il nome di "protone". Negli atomi, la forza gravitazionale che tiene insieme il sole e i pianeti, era stata rimpiazzata da quella di Coulomb di attrazione tra cariche opposte, il nucleo e gli elettroni. Tuttavia, nello schema dell'elettrodinamica classica, un elettrone che si muovesse in queste condizioni dovrebbe continuamente perdere energia, emettendo radiazione elettromagnetica e, con un moto a spirale, finire sul nucleo. Il modello di Rutherford, quindi, dava una spiegazione soddisfacente degli esperimenti di Hans Geiger e Ernst Marsden, ma non spiegava la stabilità del sistema atomico. Un ulteriore problema era quello di spiegare con questo modello perché negli spettri di emissione gli atomi emettevano energia solo a specifiche frequenze, mentre il modello di Rutherford prevedeva una variazione continua di frequenza.

Una possibile risposta a queste questioni fu data da Niels Bohr, con il suo modello atomico del 1913. Ponendo al centro dell'attenzione la comprensione della stabilità della materia, che dal punto di vista della meccanica classica appariva come "un miracolo" [4, (Cap.5)], avanzò una prima ipotesi: contrariamente alla meccanica classica, gli elettroni potevano muoversi solo in certe selezionate orbite con energia costante o, in maniera equivalente, a certe distanze fissate dal nucleo (orbite circolari). Questa ipotesi portò ad un numero (poi detto numero quantico principale) intero e positivo, che caratterizzava ogni orbita e la sua energia. Una seconda ipotesi stabilì che tutti i processi radiativi in un atomo, come l'emissione o l'assorbimento di fotoni, fossero associati a transizioni, "salti", tra due orbite (stati stazionari). Questi salti spiegavano la variazione discontinua nell'assorbimento o emissione, ma aprivano subito un altro problema: era tale transizione istantanea? Se la risposta fosse stata negativa, immediatamente si sarebbe posta la domanda: dove è l'elettrone durante il salto? Bohr assunse, allora, che tale transizione fosse istantanea. Questo tipo di transizione tra stati fu criticato da molti fisici. Per esempio Louis de Broglie si poneva il problema che questi salti non potevano essere descritti nello spazio e per E. Schrödinger l'idea dei salti quantistici era un nonsenso. D'altra parte le ipotesi di Bohr permisero di calcolare il raggio dell'atomo d'idrogeno, il suo potenziale di ionizzazione e di riprodurre correttamente la serie spettrale di Balmer per questo atomo.

Da questo momento in poi, l'atomo, proprio perché strutturato, sarà caratterizzato da diversi livelli energetici permessi. In generale esso tende a stare nello stato di minima energia (stato fondamentale), ma in presenza di energia, per esempio quella di una radiazione, può passare in uno stato a più alta energia (stato eccitato). Naturalmente ogni stato ha le sue caratteristiche specifiche e determina caratteristiche specifiche per il sistema atomico. Il passaggio, quindi, da uno stato all'altro modifica queste caratteristiche atomiche.

3. La teoria della luce: un po' di storia

Fino al XVII secolo, le idee sulla natura della luce e sui colori erano le più disparate. Per esempio, la luce era considerata "incolora" e i colori erano "emanazione" dei corpi colorati, oppure essi erano considerati mescolanze di bianco e nero.

Il primo a dare un'interpretazione moderna e a studiare metodicamente il comportamento della luce è stato il grande fisico e astronomo Isaac Newton, a cui si deve, nel 1704, il primo vero trattato di Ottica: "Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light". In tale trattato, Newton espone la sua visione meccanicistica secondo cui la luce era costituita da corpuscoli che si muovevano in linea retta e in questa ottica diede una spiegazione dei fenomeni della rifrazione e della riflessione. Egli descrisse, inoltre, la separazione dei colori attraverso un prisma, dimostrando che questo fenomeno era legato all'indice di rifrazione del mezzo attraversato.

La teoria corpuscolare, tuttavia, non riusciva a dare spiegazione di alcuni fenomeni ottici, quali l'interferenza tra sorgenti luminose e la diffrazione. Per primo, nel 1690, Christiaan Huygens prese distanza da questa teoria, introducendo il modello ondulatorio della luce. Tale modello venne successivamente sviluppato dal fisico francese Auguste-Jean Fresnel e dall'autodidatta Thomas Young, interpretando i fenomeni ottici tramite l'interazione di onde luminose con i corpi, in modo analogo al suono nell'aria. Young nel 1802 effettuò, anche, la prima misura della lunghezza d'onda della luce.

Il modello ondulatorio della luce pose un grande interrogativo. Infatti, il suono per propagarsi ha bisogno di un mezzo in cui muoversi (per esempio l'aria). La luce, per esempio quella che ci arriva dalle stelle, ha anch'essa bisogno di un mezzo in cui muoversi? La risposta affermativa a questa domanda fece nascere l'esigenza concettuale di un mezzo etereo, chiamato appunto "etere", duro, elastico ed inosservabile, capace di supportare e trasmettere le onde luminose nello spazio. Nel 1859, il britannico James Clerk Maxwell, unificò l'etere luminifero e l'etere elettromagnetico in un'unica teoria del campo, dove la luce era spiegata in termini di mutua trasformazione del campo elettrico oscillante nel campo magnetico oscillante, e viceversa. Nel 1887, il famoso esperimento degli statunitensi Albert Michelson e Williams Morley dimostrò che la velocità della luce nello spazio era indipendente dal moto stesso della sorgente rispetto all'etere, smontando l'impianto concettuale che aveva portato all'esistenza dell'etere.

La legge della radiazione del corpo nero, formulata nel 1890 dal fisico tedesco Max Planck, creò un modello di spiegazione dei meccanismi di assorbimento e emissione della radiazione. Egli dimostrò che un corpo riscaldato si comportava come un sistema dove la materia e la radiazione erano in equilibrio e poteva essere assimilato ad un insieme di oscillatori in risonanza, ognuno dei quali aveva un'energia finita, multipla della frequenza della radiazione. Macroscopicamente ne risultava uno spettro continuo della radiazione emessa, con un massimo di lunghezza d'onda dipendente solo dalla temperatura. Einstein, applicò poi il modello di Planck alla luce, dimostrando, nell'effetto fotoelettrico, che essa è quantizzata in particelle di luce, dette fotoni.

Nel 1927, infine, la visione duale della luce, venne estesa anche alla materia poiché il fisico francese Louis de Broglie, associò ad ogni particella una natura sia ondulatoria sia corpuscolare e, a secondo delle circostanze, si manifestava l'una o l'altra.

4. Breve storia delle Spettroscopie

Il primo ad intuire che la luce "bianca" fosse una combinazione di colori è stato, come detto, Newton nel suo famoso esperimento in cui un raggio solare veniva scomposto nei colori dell'arcobaleno nell'attraversare un prisma. Tuttavia, la spettroscopia, come scienza empirica, possiamo farla nascere solamente nel XIX secolo, quando William Hyde Wollaston per la prima volta osservò delle righe scure nella luce solare senza, tuttavia, comprenderne appieno il loro significato.

Le prime osservazioni sistematiche dello spettro del Sole e la prima catalogazione delle righe di emissione fu fatta dall'ottico tedesco Joseph von Fraunhofer, che può essere considerato il padre della spettroscopia. Egli, nel 1814, con uno strumento di sua costruzione osservò molte righe nella luce solare, e, in pochi anni, segnò la posizione di 574 di esse, contrassegnando le più importanti con le lettere dell'alfabeto. Tale classificazione alfabetica sopravvive ancora oggi.

È con Gustav Robert Kirchoff, conosciuto ai più per il suo contributo alla teoria dei circuiti elettrici, e Robert Bunsen, che l'osservazione degli spettri divenne scienza e nacque la spettroscopia. Bunsen realizzò un dispositivo – il becco Bunsen - che permetteva di portare ad alte temperature gli elementi chimici ed insieme a Kirchoff costruirono il primo esemplare di spettroscopio, catalogando lo spettro di diversi elementi chimici in fase gassosa.

Nel 1859 Kirchoff enunciò tre leggi empiriche per la spettroscopia:

1. Un solido, un liquido o un gas a forte pressione emettono uno spettro continuo che copre tutti i colori dell'iride;
2. Un gas incandescente a bassa pressione emette uno spettro continuo, al quale si sovrappongono delle brillanti e specifiche righe di emissione;
3. Quando davanti alla sorgente di spettro continuo, viene posto un gas freddo, si osservano, sovrapposte allo spettro, delle righe scure di assorbimento; queste hanno la stessa lunghezza d'onda delle righe brillanti emesse dal medesimo gas portato all'incandescenza.

Le righe luminose sono dette di emissione e le informazioni ad esse legate sono provenienti direttamente dalla sorgente, mentre quelle scure sono dette di assorbimento e le informazioni sono inerenti alla materia che esiste tra la sorgente e noi.

Le implicazioni di queste leggi sono enormi. Per la prima volta si evidenziava un carattere di universalità nella legge che governa l'assorbimento e l'emissione di un corpo ad una data temperatura, costituendo i fondamenti teorici delle spettroscopie.

5. Conclusione

In questo breve lavoro abbiamo analizzato i tre concetti fondamentali di materia, radiazione e loro interazione in un approccio storico-epistemologico. In questa Conclusione riprenderemo di questa analisi un solo punto ma essenziale: la materia microscopica (atomo e molecola) presenta degli stati discreti, distinti in uno stato fondamentale (quello a più bassa energia) e in stati virtuali. Questi ultimi possono essere aggiornati dall'interazione con la radiazione e sono queste transizioni tra stati a determinare lo spettro di una sostanza. Dalle transizioni tra stati si possono ricavare informazioni strutturali sugli atomi e sulle molecole e spiegare anche la complessità e la ricchezza degli spettri. Sono, quindi, le spettroscopie le principali fonti di dati sulle caratteristiche delle strutture atomiche e molecolari.

Bibliografia

- [1] Pullman, B. (1998). *The Atom in the history of human thought*. New York Oxford: Oxford University Press.
- [2] Thomson, J. J. (1914). *The Atomic Theory*. Oxford: Clarendon Press.
- [3] Villani, G. (2001). *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*. Napoli: CUEN.
- [4] Villani, G. (2008). *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*. Milano: FrancoAngeli.
- [5] Villani, G. (2010). La chimica: una scienza della complessità sistemica *ante litteram*. In L. Urbani Ulivi (Ed.), *Strutture di mondo. Il pensiero sistemico come specchio di una realtà complessa* (pp. 67-85). Bologna: il Mulino.
- [6] Cerruti, L. (2003). *Bella e potente La chimica del Novecento fra scienza e società*. Roma: Editori Riuniti.

Vivere e convivere con le radiazioni

Margherita Venturi

Dipartimento di Chimica "G. Ciamician" dell'Università di Bologna

E-mail: margherita.venturi@unibo.it

*È più facile spezzare un atomo
che rompere un pregiudizio*

Albert Einstein

1. Cosa sono le radiazioni?

Le radiazioni sono onde, così come sono di tipo ondulatorio molti altri fenomeni che ben conosciamo: il movimento del mare, il suono, i terremoti, ecc.; le radiazioni sono onde dette elettromagnetiche perché possono essere scomposte in un campo elettrico e in un campo magnetico oscillanti su due piani ortogonali (Figura 1). Una loro prerogativa importante è quella di potersi propagare anche nel vuoto, cosa che, invece, gli altri fenomeni ondulatori prima citati (onde meccaniche) non possono fare; ad esempio, il vuoto è completamente muto perché il suono ha bisogno di un mezzo per propagarsi.

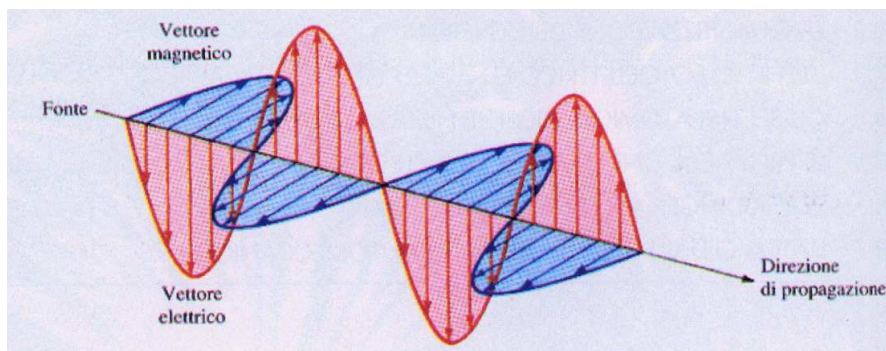


Figura 1. Rappresentazione dei vettori magnetico ed elettrico di una radiazione elettromagnetica.

Noi viviamo immersi nelle radiazioni elettromagnetiche che sono di vario tipo e hanno origine sia naturale che artificiale; è interessante notare, infatti, che esse, pur avendo la stessa natura, presentano proprietà molto diverse le une dalle altre tanto da venir utilizzate per i più svariati scopi: si va dalle onde radio, che trovano impiego nelle comunicazioni radio-televisive, ai raggi X, che vengono usati nella diagnostica medica, dalle radiazioni luminose, cioè la luce, la cui fonte naturale è il Sole da sempre associato all'idea di benessere, ai raggi gamma che, derivando dal decadimento di specie radioattive, ci richiamano alla mente le immagini nefaste di esplosioni nucleari.

Le diverse proprietà delle radiazioni elettromagnetiche, il cui insieme costituisce il cosiddetto spettro elettromagnetico (Figura 2), sono da attribuirsi al fatto che, passando dalle onde radio ai raggi gamma, varia un

parametro molto importante e caratteristico della radiazione, *l'energia*, che aumenta andando dalle prime ai secondi.

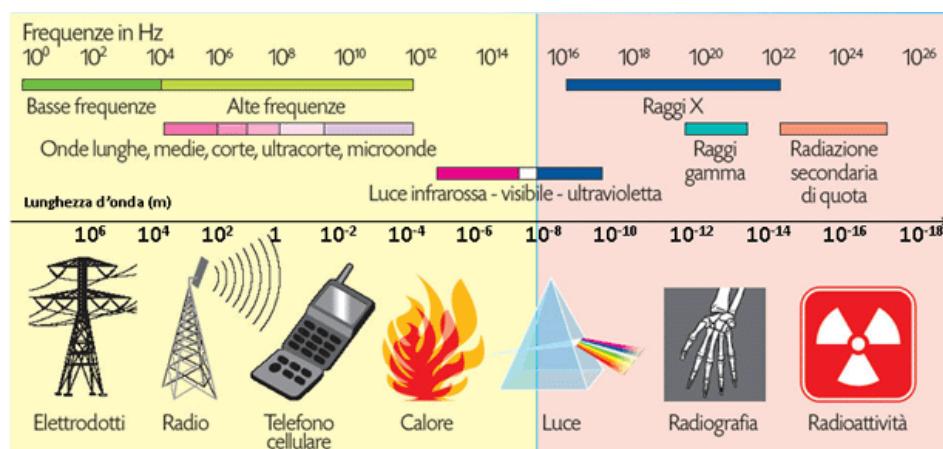


Figura 2. Spettro elettromagnetico.

Così le onde radio sono radiazioni poco energetiche, mentre i raggi X, i raggi gamma, e ancor di più i raggi cosmici, sono molto energetici e questo forse è il motivo per cui, intuitivamente e a ragione, diffidiamo dei raggi gamma e non delle onde radio. Il fattore energetico è, infatti, determinante perché quando le radiazioni attraversano un mezzo, ad esempio l'aria oppure il nostro stesso corpo, cedono in parte o tutta la loro energia. Per capire cosa succede in questo trasferimento energetico bisogna entrare dentro la struttura intima della materia e, immaginando di avere una lente di ingrandimento potentissima, andare a vedere sempre più nel piccolo fino ad arrivare alle molecole, i componenti ultimi della materia che costituiscono tutto ciò che ci circonda compreso il nostro corpo. È qui che dobbiamo focalizzare la nostra attenzione perché è a questo livello che avviene lo scambio energetico. Se le radiazioni non sono tanto energetiche, le molecole nell'interazione acquistano poca energia e subiscono modifiche piccole e temporanee, per esempio possono cominciare a ruotare, a vibrare, o a muoversi più velocemente; se, invece, l'interazione avviene con radiazioni molto energetiche, le molecole acquistano una grande quantità di energia e, come conseguenza, possono subire modifiche molto drastiche, tanto che in alcuni casi possono addirittura cambiare identità.

Il presente contributo verte proprio su quest'ultimo tipo di radiazioni, da una parte, per sottolinearne la potenziale pericolosità e, dall'altra, per dimostrare che, se usate con intelligenza e maturità, possono offrire notevoli vantaggi e benefici.

2. Radiazioni ad alta energia

Le radiazioni ad alta energia comprendono raggi X, raggi gamma, raggi cosmici, ma anche le altre radiazioni o particelle emesse dai decadimenti radioattivi, dal momento che hanno tutte le stesse proprietà ed inducono gli stessi effetti nel mezzo attraversato. Queste radiazioni, indicate cumulativamente come radiazioni ionizzanti, destano molto timore ed, in effetti, se non vengono trattate con la dovuta cautela, i danni che possono provocare sono drammatici.

È fuor di dubbio che il loro uso per scopi bellici deve essere condannato e, quasi certamente, le centrali nucleari non sono la giusta risposta al problema energetico per i rischi che comportano dal punto di vista della sicurezza e per quanto riguarda lo smaltimento delle scorie [1].

A parte questi aspetti, però, le radiazioni ad alta energia, le sostanze radioattive e/o le particelle che accompagnano il loro decadimento non vanno demonizzate perché, volente o nolente, dobbiamo convivere anche con esse. Gli atomi, infatti, partecipano alla costituzione di tutto ciò che ci circonda, compreso il nostro corpo, nella loro composizione isotopica naturale che, nella maggioranza dei casi, contiene isotopi radioattivi; a causa di ciò esiste "una radioattività di fondo" a cui siamo continuamente esposti e che non possiamo evitare. Le rocce che formano le montagne, il terreno che calpestiamo, l'aria che respiriamo, il cibo di cui ci nutriamo sono radioattivi, noi stessi siamo piccole sorgenti di radioattività. L'elemento che maggiormente

contribuisce a creare il fondo naturale di radioattività, sia direttamente che indirettamente, è l'uranio e specificatamente il suo isotopo 238 (Figura 3). L'azione diretta si deve al fatto che le rocce, soprattutto quelle di origine vulcanica, contenendo una buona percentuale di questo isotopo che ha un tempo di decadimento lunghissimo tanto da essere considerato coevo della Terra, mantengono ancora oggi una radioattività non trascurabile.

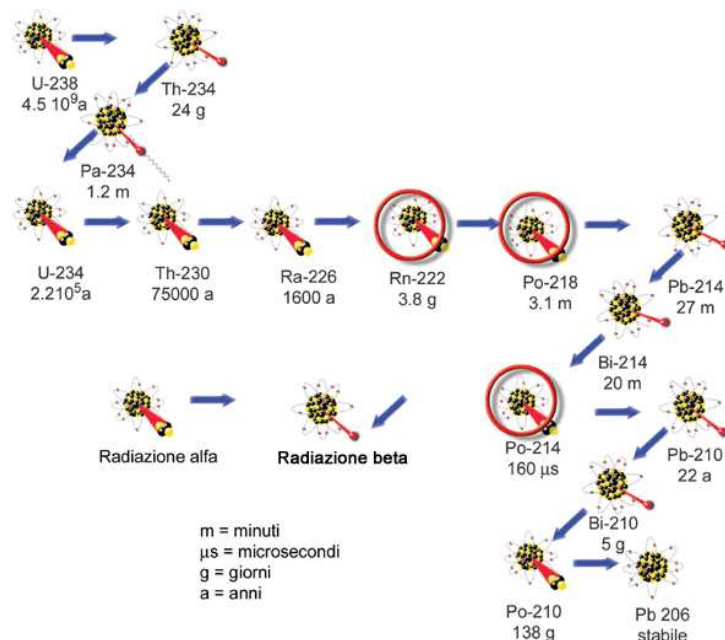


Figura 3. Decadimento dell'isotopo 238 dell'uranio.

L'azione indiretta dell'uranio è, però, di gran lunga la più importante e si deve al fatto che, nel suo decadimento (Figura 3), questo elemento genera il radon 222, un radioisotopo gassoso, che si scioglie nell'acqua che percola nel sottosuolo, o nelle sacche di gas intrappolate nel terreno e, dopo un tempo più o meno lungo, diffonde nell'aria. Il radon, quindi, si trova nell'aria che respiriamo, ma anche, a concentrazione più elevata, all'interno degli edifici, dove si accumula, sia perché viene costantemente prodotto dai materiali da costruzione utilizzati, sia perché si libera, soprattutto in cucina e in bagno, quando apriamo il rubinetto dell'acqua o usiamo il gas per cucinare [2]. La buona pratica di arieggiare mattina e sera gli ambienti riporta, comunque, il livello di radioattività al valore del fondo naturale. È importante sottolineare che il radon è un problema reale solo per alcune parti del mondo; ad esempio, ad Hancock nel Maine (U.S.A.) e ad Helsinki in Finlandia l'acqua potabile ha un livello di radioattività dovuta al radon anche diecimila volte superiore al fondo naturale. Per quanto riguarda l'Italia, nonostante a fasi alterne i mezzi di informazione facciano del terrorismo, il problema radon all'interno degli edifici non sussiste; c'è solo l'eccezione della zona attorno a Napoli dove, a causa del tufo che è ancora usato come materiale da costruzione, è possibile registrare negli ambienti livelli di radon leggermente superiori al fondo, livelli che, però, sono sempre estremamente contenuti.

Oltre a questo fondo di radioattività esterna siamo anche soggetti ad un irradiazione interna causato dal cibo che consumiamo perché, come già detto, quasi tutti gli alimenti contengono isotopi radioattivi, il più importante dei quali è, senza dubbio, un isotopo del potassio, K-40, che, fra l'altro, va ad accumularsi nei nostri muscoli. Così un uomo, avendo una massa muscolare maggiore, è "una sorgente" di radiazioni ad alta energia più potente di una donna e un uomo atletico è molto più "radioattivo" di un uomo mingherlino. La quantità di radioattività che ingeriamo, inoltre, dipende molto dal tipo di dieta: per esempio i popoli nordici che si cibano di renne e caribù, che a loro volta mangiano licheni in cui si accumulano Pb-210 e Po-210, sono esposti ad una radioattività interna quindici volte superiore a quella della media mondiale.

Non dobbiamo poi dimenticare che anche lo stile di vita a cui siamo oggi abituati ci sottopone a continui "irraggiamenti"; guardare la televisione svariate ore al giorno e, soprattutto, intraprendere viaggi aerei, quelli

intercontinentali in particolare, ci espongono, infatti, a quantità di radiazioni ionizzanti non trascurabili. Questo, però, non sembra preoccuparci più di tanto, mentre siamo pronti ad insorgere tutte le volte che viene prospettato un utilizzo per scopi pratici delle radiazioni ad alta energia, senza pensare che, se usate con maturità e intelligenza, possono offrirci notevoli benefici [2].

Si può partire considerando il campo sanitario, in cui l'ostilità pubblica è minore, forse perché in tale ambito il principio rischio-beneficio è accettato più facilmente. È indubbio che in questo settore i benefici che si possono ottenere dalle radiazioni ad alta energia sono tanti, sia dal punto di vista diagnostico che da quello terapeutico.

Per quanto riguarda il primo aspetto, l'uso delle radiazioni ad alta energia si può far risalire al 1895, anno della scoperta dei raggi X. La radiografia che Roentgen fece alla mano della moglie nello stesso anno (Figura 4) è rimasta nella storia perché segna l'importante momento in cui l'uomo ha realizzato di poter vedere dentro se stesso in maniera non invasiva.

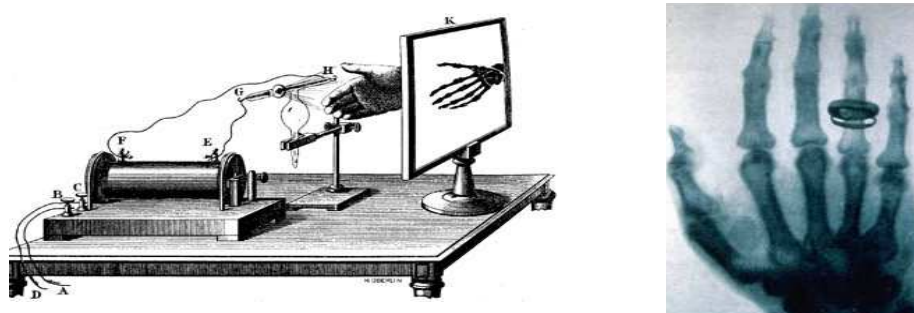


Figura 4. Schema illustrativo dell'esperimento di Roentgen effettuato nel 1895 e radiografia eseguita alla mano della moglie Berta nel dicembre dello stesso anno.

Da allora le tecniche diagnostiche che fanno uso di sostanze radioattive e radiazioni ionizzanti si sono sviluppate in maniera incredibile diventando sempre più sofisticate, precise e sensibili. Non solo queste tecniche permettono di ottenere immagini tridimensionali estremamente definite, come ad esempio la TAC (tomografia assiale computerizzata), ma possono anche dare informazioni sul funzionamento di un particolare organo, compreso quello in assoluto più complesso e misterioso: il cervello. Questo è il caso della PET (tomografia a emissione di positroni) che permette di studiare le funzioni cerebrali e le patologie connesse con grande dettaglio.

Per quanto riguarda, invece, l'aspetto terapeutico, basta pensare alla cobaltoterapia che sfrutta l'effetto killer dei raggi gamma nei confronti delle cellule per sconfiggere i tumori. Di recente, poi, è nata l'adroterapia, che si basa sull'uso di particelle pesanti accelerate, come protoni e nuclei di C-12; questa tecnica presenta molti vantaggi rispetto alla cobaltoterapia; è, infatti, molto efficace e, al contempo, permette di preservare al massimo i tessuti sani limitrofi alla zona tumorale; è in grado di debellare in maniera quasi definitiva un tipo di tumore del retro-occhio non trattabile con altri mezzi e che, prima dell'avvento di questa terapia, portava a morte certa; inoltre, utilizzando nuclei di C-12, è possibile avere una buona risposta terapeutica nel caso di tumori radioresistenti.

Anche al di fuori del campo medico le radiazioni ionizzanti trovano innumerevoli applicazioni e nei più svariati settori, che vanno da quello industriale a quello ambientale, artistico e alimentare. Come già detto, però, appena si esce dall'ambito sanitario, l'ostilità della gente cresce sensibilmente, soprattutto in Italia, dove c'è un netto rifiuto nei confronti di queste tecniche più che altro per mancanza di una seria informazione.

Giusto per fare qualche esempio, in campo industriale i raggi gamma vengono usati per sterilizzare i presidi medicali monouso, come siringhe, corredi per dialisi, sacche per contenere il sangue, ecc. Questa tecnologia garantisce una perfetta sterilità, anche perché i prodotti vengono trattati già confezionati, e rappresenta l'unica alternativa all'ossido di etilene che è un gas inquinante per l'ambiente, tossico per l'uomo e molto pericoloso, dato il suo alto potere esplosivo.

Un altro settore industriale in cui le radiazioni ad alta energia trovano validissimo impiego è quello dei polimeri, cioè delle materie plastiche, dove sono usate per indurre la polimerizzazione di monomeri, per conferire proprietà migliori o addirittura nuove ai materiali plastici, indipendentemente dal modo con cui sono stati ottenuti, e per degradare polimeri così da rendere più facile il loro smaltimento o il loro riciclo. Rispetto ai processi tradizionali questa tecnologia ha il vantaggio di non richiedere l'uso di solventi, di iniziatori e additivi che, nella maggioranza dei casi, sono tossici per l'uomo e dannosi per l'ambiente.

Le radiazioni ad alta energia trovano proficue applicazioni anche nel settore ambientale, per trattare rifiuti solidi, fanghi, acque di scarico, fumi delle centrali siderurgiche e termoelettriche, e nel campo dei beni culturali, per verificare lo stato di conservazione di un'opera d'arte, per stabilirne l'autenticità e per effettuare interventi di recupero.

Per concludere è doveroso spendere qualche parola sull'applicazione delle radiazioni ionizzanti nel settore alimentare, applicazione che desta molta paura e diffidenza soprattutto in Italia.

La prima domanda che si può fare è per quale motivo irradiare i cibi. Gli scopi sono fondamentalmente due: eliminare agenti patogeni e allungare il tempo di conservazione degli alimenti [3]. Per quanto riguarda il primo punto, con le radiazioni ionizzanti è possibile distruggere la salmonella eventualmente presente in carni, pollame, uova e altri microrganismi patogeni riscontrabili in pesce, spezie, tè e cacao. I vantaggi che ne conseguono sono evidenti e consistono nel limitare infezioni e intossicazioni alimentari che gravano pesantemente sulla spesa sanitaria pubblica. Fra l'altro, poiché il trattamento avviene sugli alimenti già confezionati, l'igiene è conservata al massimo; lo dimostra il fatto che persone affette da gravissime deficienze immunitarie sono alimentate esclusivamente con cibi così trattati. Per quanto riguarda invece il secondo punto, queste radiazioni permettono di rallentare la maturazione della frutta e la formazione di muffe in frutta e verdura, eliminare agenti infestanti da cereali e inibire la germinazione di patate (Figura 5), aglio e cipolle, il che comporta un consistente aumento del tempo di conservazione.

Questo aspetto è molto importante se si considera che circa il 30% delle derrate alimentari va perso dopo il raccolto per infestazione da parassiti e/o per deterioramento e che la tecnica che utilizza le radiazioni ad alta energia è in alternativa all'uso di fumiganti, antiparassitari e conservanti la cui tossicità è stata da tempo evidenziata e il cui impatto ambientale è notevole.



Figura 5. Confronto a 50 giorni dalla raccolta fra patate non trattate (sinistra) e trattate con radiazioni ionizzanti (destra) a scopo antigerminativo.

Il consumatore ha alcune paure istintive che nascono dalla mancanza di informazione, o che, ancora peggio, sono il frutto di informazioni distorte; basta, infatti, far riferimento a ciò che ci dice la scienza per dimostrare come esse siano solamente credenze senza alcun fondamento.

I cibi trattati con le radiazioni non sono radioattivi e ciò è stato ampiamente dimostrato; fra l'altro è anche impossibile che una cosa del genere si verifichi perché l'energia delle radiazioni usate non è tale da indurre radioattività. I cibi trattati con le radiazioni non sono né cancerogeni, né mutageni, né teratogeni e anche questo è stato ampiamente dimostrato. Le prove, raccolte in più di mezzo secolo di sperimentazione, sono contenute in un documento redatto dalle Organizzazioni Mondiali della Sanità, chiamato Codex Alimentarius, che è consultabile da tutti.

Un'altra paura dei consumatori è che il trattamento con le radiazioni consenta di immettere sul mercato cibi non di prima qualità; anche questo timore è infondato perché le radiazioni non fanno miracoli: un ali-

mento deteriorato non ritorna magicamente fresco, quando viene irradiato. C'è poi da aggiungere che questo tipo di trattamento, essendo abbastanza costoso, viene utilizzato solo per cibi di primissima qualità.

I consumatori temono anche che le radiazioni ad alta energia possano indurre nei cibi la formazione di radicali liberi, dei quali oggi si parla tanto e spesso a sproposito. Ebbene, questa volta la risposta è affermativa, ma la quantità di radicali che si forma con l'irradiazione è molto piccola, molto più piccola di quella che si produce con altri trattamenti, quali la tostatura, la friggitura e l'essiccamento: una fetta di pane tostato contiene una quantità di radicali liberi di gran lunga superiore a quella presente in un chilo di cibo secco irradiato. La cosa, comunque, non ci deve preoccupare eccessivamente perché i radicali, essendo specie molto reattive, vengono subito neutralizzati dalla saliva della nostra bocca con la quale reagiscono dando prodotti innocui.

Per quanto riguarda, poi, l'aspetto nutrizionale, altro punto di perplessità, le ricerche effettuate hanno dimostrato che i cibi irradiati sono perfettamente comparabili a quelli che hanno subito un qualsiasi altro trattamento a scopo conservativo come, ad esempio, la bollitura.

Prima di concludere è importante sottolineare, anche se sembra strano a dirsi, che le tecnologie che utilizzano le radiazioni ad alta energia sono più rispettose per l'uomo e l'ambiente di quelle tradizionali (ad esempio, non richiedono l'uso di additivi e solventi, per quanto riguarda le applicazioni industriali, di pesticidi, fumiganti ed insetticidi, per quanto riguarda il settore alimentare) e questo è anche il motivo per cui in molti paesi europei e negli Stati Uniti sono già industrialmente consolidate. Un'obiezione che viene normalmente sollevata è che, così facendo, si potrebbe andare incontro ad un inquinamento di tipo nucleare a causa delle sorgenti radioattive necessarie per produrre le radiazioni ad alta energia, ma ciò non è assolutamente vero per due motivi. Il primo è che le sorgenti radioattive comunemente usate sono principalmente costituite da un isotopo del cobalto, Co-60, che si disattiva in un tempo relativamente breve dando una specie non radioattiva, Ni-60. Inoltre, e questo è il secondo motivo, in qualsiasi settore applicativo, compreso quello medico, si sta andando sempre più nella direzione di sostituire le sorgenti radioattive con macchine che producono radiazioni o particelle con le stesse caratteristiche dei raggi gamma e che hanno il grande vantaggio di poter essere accese e spente come lampadine.

3. Conclusione

Quanto sopra esposto dovrebbe farci capire che possiamo vivere e convivere pacificamente anche con le radiazioni ad alta energia, che istintivamente temiamo e consideriamo "cattive", perché ne possiamo trarre utili benefici. L'importante è usarle con intelligenza e nel pieno rispetto del genere umano, una regola che chi lavora in ambito scientifico non dovrebbe mai dimenticare.

Bibliografia

- [1] N. Armaroli, V. Balzani, *Energia per l'Astronave Terra*, Chiavi di Lettura, Zanichelli, **2011**.
- [2] *Radiation, People and the Environment*, IAEA, **2004**.
- [3] (a) *Facts about Food Irradiation*, IAEA, **1999**; (b) *Enhancing Food Safety through Irradiation*, IAEA, **1999**.

La proteina verde fluorescente ovvero come una medusa rivoluzionò la biochimica

Elena Ghibaudi

Dip.to Chimica IFM, Università di Torino, via Giuria 7, 10125 Torino.

E-mail: elena.ghibaudi@unito.it

Abstract. Il premio Nobel per la Chimica 2008 è stato assegnato a Shimomura, Chalfie e Tsien per aver isolato e caratterizzato la Proteina Verde Fluorescente (GFP), aprendo la strada ad una serie di applicazioni biotecnologiche che hanno consentito sostanziali progressi nella comprensione dei meccanismi biochimici che governano la vita delle cellule e degli organismi.

La GFP è una proteina prodotta dalla medusa *Aequorea Victoria* la quale, se eccitata con luce Ultravioletta, presenta una caratteristica fluorescenza verde. Tale fenomeno è spontaneo e non richiede la presenza di cofattori estrinseci o di specie chimiche estranee alla proteina stessa.

Grazie a queste sue particolari caratteristiche, Chalfie ebbe la fondamentale intuizione di utilizzare la GFP (e le sue varianti variamente fluorescenti, prodotte da Tsien) come marker fluorescente di geni, aprendo la strada ad un approccio dinamico allo studio dei sistemi viventi e dei processi cellulari, approccio un tempo impossibile. La GFP è stata dunque protagonista di un'autentica rivoluzione metodologica che, a sua volta, ha prodotto un'evoluzione concettuale in campo biochimico e biologico, contribuendo a modificare il nostro modo di pensare gli organismi viventi. Tali progressi saranno illustrati attraverso la discussione di alcuni esempi significativi.

1. Introduzione

La storia della proteina verde fluorescente è paradigmatica di alcuni aspetti della ricerca scientifica che vengono spesso trascurati o male interpretati. Essa infatti dimostra che:

1. la ricerca scientifica, contrariamente a quanto spesso si crede, non segue percorsi lineari.
2. essa necessita di tempi lunghi e deve poter esplorare vie apparentemente improduttive o fine a se stesse per portare a risultati significativi sul lungo termine.
3. è fortemente influenzata dallo sviluppo tecnologico: lo sviluppo di nuove tecnologie consente lo sfruttamento di risultati ottenuti in precedenza e temporaneamente "dormienti".
4. le sinergie tra discipline, tecnologie e metodologie di indagine diverse contribuiscono non soltanto allo sviluppo della massa di conoscenze, ma possono contribuire a modificare i paradigmi attraverso i quali interpretiamo la realtà.

La storia della GFP (Green Fluorescent Protein) si sviluppa in un arco di 30 anni, tra il 1962 e gli anni '90. Al 1962 risale la sua scoperta (casuale) da parte di Shimomura, che si interessava di altri sistemi fluorescenti presenti in organismi marini. Nel 1994, grazie allo sviluppo concomitante della biologia molecolare, la proteina viene clonata e Chalfie ne intuisce le potenzialità come marker fluorescente, grazie alle sue peculiari proprietà intrinseche. Negli anni successivi Tsien produce una varietà di proteine mutanti, con emissioni di fluorescenza in zone diverse del visibile e si sviluppa quell'approccio dinamico allo studio dei fenomeni in vivo che è noto come FRET (Fluorescence Resonance Emission Transfer).

La storia della GFP è soltanto l'ultima di una serie di scoperte che hanno reso visibili realtà prima ignorate (e dunque, virtualmente inesistenti). Ogni volta che ciò è accaduto nella storia della scienza, si è prodotta una rivoluzione...Basti pensare all'invenzione del microscopio, che ha dischiuso le meraviglie del mondo dei microrganismi e delle cellule; i raggi X, che hanno svelato i segreti della struttura delle molecole, oltre a trovare molte applicazioni (TAC); la risonanza magnetica, che permette di fare diagnosi accurate sulle masse tumorali, ecc.

La GFP e le tecnologie ad essa correlate hanno disvelato gli aspetti dinamici della organizzazione degli organismi viventi, modificando il nostro modo di pensare il mondo vivente e aprendo nuove prospettive anche in ambito medico e farmacologico.

2. Una storia in tre atti: I atto, La scoperta

La GFP viene isolata dalla medusa *Aequorea Aequorea* nel 1961, come sottoprodotto dell'aequorina, una proteina blu fluorescente Ca-dipendente, presente in notevoli quantità nella medusa. L'isolamento della Aequorina è di per sé un risultato importante, in quanto nasce da una intuizione di Shimomura. Egli, contro la comune convinzione che la fluorescenza blu della medusa fosse dovuta a luciferina (una sostanza organica), dopo vari tentativi falliti di purificazione intuisce che responsabile della fluorescenza non è una comune molecola organica, ma una proteina. Ciò spiega il fallimento dei precedenti tentativi di isolamento, in quanto la proteina ha proprietà specifiche che richiedono tecniche di manipolazione *ad hoc*.

Nell'isolare l'Aequorina, Shimomura nota la presenza di una componente proteica minoritaria, che fluoresce nel verde, e la isola a sua volta. Tuttavia, a causa delle basse quantità di GFP, è necessario aspettare il 1979 prima che una quantità sufficiente di proteina venga accumulata per consentirne la caratterizzazione e, in particolare, per individuare il cromoforo responsabile della fluorescenza.

La novità rappresentata dal cromoforo della GFP è assoluta: esso infatti non è un cofattore estrinseco della proteina, che viene associato alla componente proteica in fase post-traduzionale. Si tratta invece di un frammento di sequenza, modificato dalla proteina stessa in modo autocatalitico. Ciò spiega perché GFP, al contrario di Aequorina e di altre proteine, non necessita di ioni calcio o altri trigger per emettere luce. Il sistema è, per così dire, autoconsistente.

Nel 1996 la proteina sarà poi cristallizzata e si vedrà che la sua struttura è a botte, con il cromoforo immerso nell'ambiente idrofobico tipico dell'interno delle proteine, che lo protegge dal contatto con il mezzo acquoso e preserva le sue proprietà fluorescenti. La proteina assorbe luce blu o UV ed emette nel verde.

3. Una storia in tre atti: II atto, L'intuizione di Chalfie

Alla fine degli anni '80 Martin Chalfie studia la differenziazione e la funzione delle cellule nervose in un animale modello, un nematode dall'elegante nome di *Caenorhabditis elegans*.

A questo scopo clona vari geni implicati nei neuroni sensoriali, ma non sa nulla sui meccanismi di regolazione dell'espressione di questi geni.

Un gene è una porzione di DNA che codifica per una proteina. La biosintesi della proteina richiede dapprima l'attivazione del gene corrispondente, che viene trascritto in mRNA, il quale viene trasferito dal nucleo ai ribosomi, dove la sequenza di basi azotate viene tradotta in una sequenza di aminoacidi, ovvero in proteina. Il problema di Chalfie era: Come osservare le modificazioni subite dai neuroni (e dunque le modifiche dell'espressione genica) durante lo sviluppo dell'animale?

I metodi disponibili all'epoca erano solo tre, ma erano invasivi e fornivano immagini statiche (fotografie) del sistema. Non c'era alcuna possibilità di seguire l'evoluzione dell'espressione genica in tempo reale.

Per risolvere il problema, Chalfie – che nel frattempo aveva letto la notizia della clonazione della GFP e dunque sapeva che il gene di quest'ultima era disponibile – immaginò di connettere il gene della GFP a vari interruptori genici oppure a geni di altre proteine. In pratica si trattava di utilizzare la GFP come una lanterna che consentisse di osservare l'attivazione dell'espressione genica in *Caenorhabditis elegans* e di visualizzare dove e quando le diverse proteine venivano prodotte.

Tuttavia ciò sarebbe stato possibile solo se la maturazione della proteina (ovvero la formazione del cromoforo) non avesse richiesto l'intervento di enzimi specifici, che difficilmente sarebbero stati presenti nell'organismo-ospite in cui GFP veniva espressa. L'unico modo per saperlo era provare.

Chalfie provò ad inserire il gene della GFP in *E.coli* e ottenne batteri fluorescenti: una prova indiretta che il fluoroforo viene convertito nella sua forma attiva attraverso un meccanismo auto catalitico, ovvero senza l'intervento di enzimi specifici.

Ciò spalancò la porta ad applicazioni prima inimmaginabili.

Gli esperti di proteine amano sottolineare che le proteine sono bizzarre molecole, perché ciascuna ha una propria personalità caratteristica, una forma di individualità. Le peculiarità della GFP che la rendono unica sono tre:

- Il cromoforo si forma spontaneamente, senza intervento di *cellular machinery*.
- Non richiede attivazione da parte di cofattori (come invece la Aequorina, che ha bisogno di calcio)
- La proteina è ereditabile e conferisce all'organismo erede le caratteristiche di fluorescenza che le competono

Queste peculiarità hanno reso possibile l'applicazione della GFP allo studio di diversi fenomeni dinamici entro la cellula, sfruttando gli strumenti tecnologici della biologia molecolare.

4. Una storia in tre atti: III atto, Tsien crea un arcobaleno di proteine

Il III atto vede l'ampliarsi del panorama delle proteine fluorescenti. Chalfie intuì subito l'importanza di disporre di proteine fluorescenti con emissioni in diverse zone del visibile: ciò avrebbe consentito di seguire più fenomeni in contemporanea e di ottenere informazioni differenziate nello spazio e nel tempo riguardo ai meccanismi di funzionamento cellulari.

Nel 1994 Tsien e Heim chiarirono il dettaglio molecolare del meccanismo di formazione del cromoforo e, grazie alla biologia molecolare e all'introduzione di varie mutazioni nella sequenza di GFP, generarono un arcobaleno di proteine fluorescenti.

Divenne così possibile seguire più processi cellulari allo stesso tempo, in quanto i colori codificati geneticamente rendono molti **processi biochimici direttamente visibili all'interno di cellule e organismi viventi**. Grazie alla GFP, è ora possibile osservare quando e dove i singoli geni vengono attivati e disattivati, quando vengono sintetizzate le proteine, dove migrano, con quali altre proteine interagiscono, quanto durano nel tempo.

Altra applicazione importante è la FRET, ovvero la tecnica basata sul trasferimento di fluorescenza tra proteine aventi proprietà spettroscopiche opportune. Alcuni esempi di applicazioni della FRET sono disponibili a questo indirizzo web: <http://stke.sciencemag.org/cgi/content/full/sigtrans;2003/205/tr5/DC1>

5. La portata epistemologica della scoperta della GFP

Oggi la GFP viene usata per comprendere la funzione delle cellule e delle proteine all'interno di esseri viventi. Le proteine sono gli **utensili chimici** della vita – controllano quasi tutto ciò che accade dentro ogni cellula vivente. Ogni essere umano funziona grazie ad un macchinario ben rodato di migliaia di proteine, come l'emoglobina, gli anticorpi, l'insulina, ecc.. Se qualcosa funziona in modo improprio, ecco comparire malattie e stati patologici. Perciò è fondamentale **individuare il ruolo dinamico delle diverse proteine**.

La rivoluzione della GFP (che è metodologica) non avrebbe potuto avere luogo in assenza di precedenti sviluppi tecnologici, come la PCR (Polymerase Chain Reaction) e lo sviluppo della biologia molecolare; ecco perché si son dovuti attendere 30 anni dalla sua scoperta prima di trovarne un'applicazione importante.

Grazie alle biotecnologie basate sulla manipolazione del DNA è stato possibile connettere la GFP a proteine che ci interessano, ma che non c'era modo di visualizzare in quanto non fluorescenti. La GFP funge dunque da **lanterna**, attivata dalla luce blu e UV. La fluorescenza verde serve a seguire la traccia di queste proteine entro l'organismo.

Ma questi progressi metodologici e conoscitivi hanno anche contribuito a modificare il nostro modo di pensare gli organismi viventi e la loro organizzazione.

Nel XX secolo la biochimica e la biologia hanno subito impressionanti progressi e continui cambi di paradigmi, scatenati dallo sviluppo di nuove metodologie e dalla conseguente elaborazione di nuovi concetti.

In estrema sintesi, potremmo schematizzare i progressi della biochimica nei seguenti stadi:

- **Biochimica classica** → Individuazione delle vie anaboliche e cataboliche, misurazioni delle attività enzimatiche

- **Enzimologia e strutturistica di proteine e degli acidi nucleici** → lo sviluppo delle tecniche di caratterizzazione strutturale di macromolecole (a partire dagli studi di Perutz sulla mioglobina, di Watson e Crick sul DNA, di Pauling sull'alfa elica proteica, ecc) ha permesso l'indagine delle relazioni struttura-funzione nelle macromolecole biologiche.
- **Genetica classica e chimica degli acidi nucleici** → hanno portato alla genomica moderna, fino al Progetto Genoma e alla sequenziazione del genoma di interi organismi, incluso l'uomo.

Tuttavia, nessuno di questi approcci ha fornito gli strumenti sperimentali per **monitorare i processi spatio-temporali intra- e inter-cellulari che definiscono il comportamento dinamico dei sistemi viventi**. La scoperta di GFP ha dunque consentito un approccio dinamico allo studio dei sistemi viventi e dei processi cellulari prima impensabile, **permettendo di seguire nel tempo e nello spazio un crescente numero di fenomeni nelle cellule viventi e negli organismi**.

Ad es.: Espressione genica, localizzazione di proteine, dinamiche conformazionali, interazioni tra proteine, divisione cellulare, cellular trafficking e signalling, replicazione cromosomica, pathway di trasporto intracellulare, biogenesi di organelli, ecc.

Ciò ha costretto a rivedere anche il modo di pensare l'organizzazione dei sistemi viventi. Quest'ultima non è più pensata in modo **statico**, come un'impalcatura rigida (ovvero come un prodotto) ma in modo **dinamico** (un processo, un evento in divenire). L'organizzazione del mondo vivente è plastica e si basa sulla probabilità di innumerevoli combinazioni diverse, ciascuna delle quali può essere attivata o disattivata in funzione delle necessità dell'organismo. **Questa natura in continuo divenire è essenziale per consentire - fra l'altro - l'adattabilità e l'evoluzione di tali sistemi**.

6. Altri progressi scientifici che stanno modificando la nostra visione della biologia

Del resto, altri avanzamenti conoscitivi e tecnologici hanno contribuito a questa rivoluzione. Ad es. il progetto Genoma ha radicalmente modificato il modo di pensare il DNA, scalzando il dogma centrale della biologia secondo il quale ad ogni gene corrisponde una proteina. Oggi sappiamo che a ca. 30000 geni corrispondono ca. 150000 proteine: non vi è corrispondenza biunivoca. E dunque il DNA non può più essere pensato come la cassaforte che conserva tutta l'informazione necessaria all'organismo, una informazione che sarebbe codificata in modo univoco. Il codice genetico è piuttosto una **toolbox**, in cui le diverse combinazioni possibili di geni e di regolazioni consente l'espressione – istante per istante – di proteine diverse.

In questi anni poi altri concetti un tempo ritenuti fondamentali sono stati messi in discussione: si pensi al ruolo del cosiddetto Junk DNA (il DNA non codificante) che costituisce la gran parte della sequenza del DNA e che sembra avere un ruolo fondamentale nella regolazione dell'espressione genica.

O allo stesso paradigma proteico, per il quale ad una struttura corrisponde una funzione. La scoperta delle Intrinsically Disordered Proteins, spesso coinvolte nelle malattie neurodegenerative, mette in questione questo assunto in modo radicale.

Paradossalmente, dunque, con il crescere delle conoscenze si è accresciuto anche lo spazio dell'ignoto, nel senso che ci si è resi conto di quanto poco sappiamo in realtà sul funzionamento di un organismo vivo.

Quindi, per tornare al soggetto principale di questa lezione, la GFP, la sua importanza non si è limitata allo sviluppo metodologico che essa ha consentito, ma si iscrive in quadro di una vera e propria rivoluzione biologica.

Scrive Barabasi (2004):

"E' ormai chiaro che la maggior parte delle funzioni cellulari è svolta da molecole entro moduli funzionali.

Questi moduli non sono isolati l'uno dall'altro; interagiscono e spesso si sovrappongono, entro una struttura a rete. Inoltre possono essere "accesi o spenti" secondo le necessità locali (nel tempo e nello spazio) dell'organismo.

Questa visione dinamica modificherà in modo significativo la nostra comprensione della biologia e potrà avere conseguenze anche nella pratica medica."

Oggi infatti si comincia a parlare di medicina personalizzata, anche in virtù degli sviluppi concettuali e conoscitivi che hanno avuto luogo negli ultimi 40 anni.

7. Una riflessione sulla ricerca di base e i suoi finanziamenti

La storia della GFP è una tipica storia di ricerca di base. In un momento storico nel quale si enfatizza la centralità della ricerca applicata e si minimizzano i finanziamenti per quella ricerca che ha come unico scopo quello di produrre conoscenza, è significativo riprendere alcuni passi del discorso che Martin Chalfie ha tenuto in occasione dell'assegnazione del Nobel, nel 2008.

Dice Chalfie:

“Questo è un a Premio alla ricerca di base. La GFP fu scoperta da Osamu Shimomura per cercare di rispondere ad un quesito affascinante: in che modo alcuni organismi producono luce?”

In questi giorni si sente molto dire che la scienza dovrebbe essere più rivolta alle applicazioni, ad esempio la ricerca che applica la comprensione dei fenomeni studiati in laboratorio alla risoluzione dei problemi legati alla salute

Sebbene questo tipo di applicazione sia fondamentale, a me sembra che molte affermazioni di coloro che premono per passare dalla ricerca di base a quella applicata siano basate su false premesse

Basta uno sguardo a qualunque sequenza di geni (umana, di mosca, di lombrico...) per smentire questa affermazione, dal momento che la maggior parte dei geni individuati codificano prodotti indicati come “proteine di funzione ignota”. Abbiamo ancora molto da imparare. Non soltanto cosa queste proteine fanno, ma anche come interagiscono fra loro per sostenere la vita e lo sviluppo. Come molti hanno detto, c'è bisogno di conoscenze da applicare per poter fare ricerca applicativa..... E se consideriamo quanto è ristretto il numero di organismi studiati dagli scienziati, il mistero che ci circonda diventa ancora maggiore....”

Ed è significativo che Chalfie concluda la Nobel lecture con queste parole:

“Research in my lab has been funded by grants from the NIH (National Institute of Health)”

Perfino negli Stati Uniti, il sostegno pubblico alla ricerca è fondamentale! Del resto, **la ricerca di base non può essere finanziata dal privato, in quanto – per sua natura - non produce guadagno, se non in termini di conoscenze e dunque i suoi costi non sono ammortizzabili se non sul lungo termine.**

Diventa allora importante tenere presente alcune cifre, per capire le scelte del nostro Paese:

L'Italia destina lo 0.9 % del PIL alla ricerca, contro il 2.5-3% di Europa/USA/Giappone.

Inoltre, manca di una programmazione certa dei fondi per la ricerca e taglia pesantemente il Fondo di Finanziamento delle Università: politicamente, finora il nostro paese ha scelto di non puntare sulla ricerca, sulla formazione e sui giovani. E' una scelta lungimirante?

8. Una domanda resta aperta...

Ma, per tornare sulla nostra GFP e concludere la sua storia, vale ancora la pena sottolineare un fatto. L'aspetto più singolare della storia della GFP è che **il mistero permane irrisolto....**: Perché la medusa *Aequorea victoria* emette luce?

Molti organismi che vivono nel mare usano la luce per confondere i propri nemici, procurarsi cibo o attirare un partner. Ma nessuno sa perché l'evoluzione ha portato la medusa *Aequorea victoria* a produrre la aequorina e la GFP. Eppure, se nessuno si fosse posto questa “inutile” domanda, un intero capitolo della biochimica moderna forse non sarebbe stato scritto.

La bioluminescenza nei pesci batifili dello Stretto di Messina.

Mauro Cavallaro

Università degli Studi di Messina – Facoltà di Medicina Veterinaria. Polo Universitario dell'Annunziata - Messina

mauro.cavallaro@unime.it

Riassunto: Il presente lavoro descrive una breve introduzione sul fenomeno della bioluminescenza negli organismi marini in generale per poi approfondire l'argomento nei pesci batifili presenti nello Stretto di Messina anche con la trattazione della struttura degli organi luminosi (fotofori). Tale excursus pone in risalto non solo la peculiarità delle caratteristiche ecologiche dello Stretto di Messina ma anche dei fenomeni di convergenza adattativa che lo studio di tali organi luminosi garantisce.

Abstract: This paper describes a brief introduction to the phenomenon of bioluminescence in marine organisms in general and then go into that deep sea fish present in the Strait of Messina with the discussion of the structure of the luminous organs (photophores). This excursion highlights not only the peculiarities of the ecological characteristics of the Strait of Messina but also convergence of adaptive phenomena that the study of luminous organs such guarantees.

1. La bioluminescenza

1.1 Introduzione

Il termine "bioluminescenza" viene generalmente usato per definire ogni tipo di chemiluminescenza prodotta da una reazione biochimica specifica in un organismo vivente.

La bioluminescenza è un processo che tende a sfuggire alle generalizzazioni, infatti non vi è caratteristica chimica, anatomica, fisiologica o filogenetica che unifichi il tutto o, al massimo, gli organismi luminosi. (Harvey, 1916, 1917, 1920, 1952; Hastings, 1968; Herryng, 1972, 1978; Nicol, 1969).

"Luminescenza" è un termine molto generico per spiegare il processo di emissione di luce al di sotto di determinate temperature, ed è per questo che l'emissione luminosa viene definita di "luce fredda".

Dal punto di vista chimico la luminescenza può essere definita come la capacità che hanno alcuni composti di riemettere, sotto forma di onde elettromagnetiche, l'energia precedentemente accumulata.

Il cambiamento di livello energetico delle molecole può realizzarsi manifestando l'energia sotto varie forme: la fotoluminescenza, stimolata dalla luce; la radioluminescenza, dall'irradiazione con raggi X; la termoluminescenza, dal riscaldamento moderato di un composto; la chemiluminescenza è riferita all'emissione associata ad una reazione chimica esoergonica in cui l'energia deriva da legami chimici.

Tutte le reazioni bioluminescenti sono processi chemiluminescenti (Kricka, 1995; McCapra, 1973, 1976).

Molte reazioni bioluminescenti comportano l'interazione di un enzima (luciferasi) con un substrato (luciferina).

I termini luciferina e luciferasi sono stati originariamente proposti da Raphael Dubois (1887) in riferimento a due componenti estratti dal mollusco bivalve *Pholas dactylus*.

Tali termini sono utilizzati però in maniera generica, aspecifica ovvero senza fare riferimento ad una precisa identità chimica o ad un determinato organismo luminescente.

Comunque, non tutta la bioluminescenza riguarda la classica interazione di una luciferina con la sua specifica luciferasi; per esempio, la medusa *Aequorea* sembra contenere una fotoproteina che richiede solamente la presenza di ioni calcio o di ioni stronzio per l'emissione di luce in vitro (Shimonura et al., 1980).

La varietà di cofattori, richiesta dai sistemi biochimici di differenti organismi luminescenti, serve a favorire anche la loro distinzione. La tabella 1 riassume le varie forme di luminescenza.

Tabella 1. Varie forme di luminescenza.

Tipo	Causa
Elettroluminescenza	Corrente elettrica in gas ionizzato o semiconduttore
Radioluminescenza	Materiale radioattivo
Chemiluminescenza	Reazione chimica
Termoluminescenza	Temperatura e radioattività
Triboluminescenza	Rottura di cristalli
Sonoluminescenza	Onde sonore in liquidi
Fotoluminescenza	Assorbimento di luce infrarossa, visibile, ultravioletta
Bioluminescenza	Reazioni enzimatiche

1.1.1. Reazioni luminose

Dal punto di vista chimico, l'energia per la produzione delle onde luminose proviene da una reazione esoergonica che genera un prodotto intermedio o finale in uno stato elettronico eccitato che, decadendo, emette energia sotto forma di fotoni.

Il potere luminogeno di un qualunque sistema luminescente dipende da diversi fattori: a) la reazione deve fornire energia sufficiente per consentire l'eccitazione della sostanza luminosa; b) il sistema deve comprendere almeno una specie elettronicamente eccitabile; c) la velocità di reazione deve essere tale da produrre nell'unità di tempo un numero di fotoni sufficientemente elevato da poter essere rilevato.

Le reazioni chemiluminescenti possono essere dirette o indirette (figure 1 e 2).

Si parla di reazione chemiluminescente diretta quando il substrato chemiluminescente produce uno stato elettronico eccitato che, decadendo, emette energia sotto forma di fotoni; quando, invece, ad emettere luce è un accettore, al quale viene trasferita l'energia di attivazione dal prodotto di reazione eccitato, si verifica una reazione indiretta.

Affinché si verifichi una reazione luminosa saranno dunque necessari: a) il substrato chemiluminescente che reagisce per formare la molecola allo stato eccitato (responsabile nelle reazioni luminose dirette ed indirette); b) un accettore di elettroni che solitamente è l'ossigeno; c) un catalizzatore che riduce l'energia di attivazione ed aumenta la velocità di reazione; d) cofattori necessari per convertire il substrato in una forma capace di reagire con il catalizzatore, o necessari per la rottura del legame che darà origine alla specie molecolare emittente; e) un accettore di energia (solo se si tratta di reazioni indirette).

Un tipico esempio di reazione chemiluminescente diretta è rappresentata dall'ossidazione del luminolo in ambiente alcalino (figura 3).

1.1.2. Esempi di sistemi bioluminescenti

Le reazioni bioluminescenti presentano alcune peculiarità non riscontrate nelle reazioni chemiluminescenti; infatti esse si svolgono in mezzi acquosi in cui molte reazioni luminescenti non avverrebbero; le rese quantitative sono solitamente elevate; è coinvolto almeno un componente proteico che può essere un enzima o una fotoproteina.

Durante il processo luminescente, le molecole enzimatiche vengono riciclate e catalizzano l'ossidazione di numerose molecole di substrato, mentre le molecole fotoproteiche non riciclano o lo fanno molto lentamente. I sistemi bioluminescenti più noti sono: il sistema luciferina – luciferasi in *Photinus pyralis* (una specie nord americana di lucciola) ed il sistema di alcune specie batteriche marine (*Vibrio fischeri*, *Vibrio harveyi*, *Photobacterium phosphoreum*).

I componenti di questi sistemi possono essere estratti direttamente dagli organismi anche se, molti di essi, possono essere sintetizzati in laboratorio grazie all'impiego di tecniche di ingegneria genetica.

Il sistema luciferina – luciferasi può essere schematizzato come in figura 4.

Tale reazione è articolata secondo lo schema riassunto in figura 5.

Lo stadio iniziale della reazione consiste nella conversione rapida, in presenza di Mg^{++} e ATP, della luciferina a luciferil-adenilato legato all'enzima, con liberazione di pirofosfato; tale complesso si combina con l'ossigeno portando alla formazione del complesso enzima – ossiluciferina – adenilato nello stato eccitato ed all'eliminazione di anidride carbonica.

Il ritorno allo stato fondamentale iniziale comporta la restituzione dell'energia di legame acquisita con l'emissione di un fotone. Infine il complesso si dissocia in enzima, AMP ed ossiluciferina.

Con il termine luciferina si raggruppano i diversi tipi biochimici di substrato riscontrati nelle diverse specie di organismi bioluminescenti. Ad esempio in *Argyropelecus hemigymnus* è presente la coelenterazina (Baguet 1975; 1977; 1985; Baguet & Marechal, 1974; 1976; Baguet & Piccard, 1981; Baguet et al, 1983) che si lega ad un gruppo proteico e non necessita di ossigeno per produrre luce. Ciò è dovuto al fatto che l'ossigeno è già fissato ad un sito specifico della proteina e quindi il sistema è potenzialmente carico. Nel caso specifico la reazione è innescata dallo ione calcio e, affinché si realizzi tutto ciò, tre ioni calcio devono legarsi a tre siti specifici della proteina che subirà così una deformazione nel punto ove la molecola di ossigeno è fissata. A causa di questa deformazione l'ossigeno si stacca dalla proteina e va a legarsi ad un sito ben preciso della coelenterazina; questa reazione provoca la rottura del legame con conseguente emissione di luce. (Mc Elroy 1960; Mc Elroy et al., 1961, 1962).

1.2. Distribuzione della bioluminescenza

La bioluminescenza è un processo biochimico catalizzato da specifici enzimi che si realizza in un vasto numero di organismi viventi appartenenti a vari taxa zoologici di collocazione tassonomica e filogenetica varia.

Tale fenomeno non è comparso in seno ad un singolo gruppo di organismi, ma si è sviluppato attraverso vari phyla. (Cormier, M. J. & Totter, J. R. 1964; 1968; Cormier, M. J. et al 1966; 1973a; 1973b).

Numerose ipotesi indicano che la bioluminescenza sarebbe comparsa a livello di organismi anaerobi come un processo biochimico finalizzato all'eliminazione dell'ossigeno, tossico per questi organismi (Buck, 1961).

Il fenomeno, molto diffuso nel regno animale, è assente in quello vegetale.

La bioluminescenza terrestre è limitata ad alcuni funghi (serve da richiamo per gli insetti per la diffusione delle spore) (Wassink, 1948) ed a qualche specie di insetti (Lloyd, 1971) e di anellidi; ma la gran parte degli organismi capaci di dar luogo a fenomeni bioluminescenti vive in ambiente marino (tabella 2).

Tabella 2. Distribuzione della bioluminescenza

Tipo ed esempio di organismo	Fattori essenziali	Emissione massima (nm)
Batteri	Luciferina (aldeide)	478-505
<i>Vibrio fischeri</i>	Luciferasi e O_2	
Protozoi Dinoflagellati	Luciferina (un pigmento biliare)	470
<i>Gonyaulax</i>	Luciferasi e O_2	
Celenterati		508
Idrozoi	Fotoproteine e Ca^{2+}	
Antozoi		509
<i>Renilla</i>	Celenterazina	
Anellidi		465
Policheti	Fotoproteina Fe^{2+} , H_2O_2 e O_2	
<i>Chaetopterus, Odontosyllis</i>	Luciferina, Luciferasi, CN^-	
Oligocheti	Luciferina (aldeide), Luciferasi, H_2O_2	500

Molluschi		
Gasteropodi	Luciferina, Luciferasi	535
<i>Latia</i>		
Bivalvi	Luciferina, Luciferasi (o Fe ²⁺) e O ₂	490
<i>Pholas</i>		
Cefalopodi	Celenterazina Luciferasi e O ₂	-
<i>Chiroteuthis</i>		
<i>Onychoteuthis</i>		
<i>Watasenia</i>		
Crostacei		
Ostracodi	Cipridina e O ₂	465
<i>Cypridina</i>		
Decapodi	Luciferina (Coelenterazina)	462
<i>Oplophorus</i>	Luciferasi e O ₂	
<i>Sergestes</i>		
Eufasiacei	Fotoproteine	476
<i>Eufhausia</i>		
<i>Meganyctiphanes</i>		

1.2.1. La bioluminescenza nei pesci

Tra gli organismi marini, sono i pesci quelli che hanno differenziato le più evolute strategie per la produzione di onde luminose (Herring, 1972; 1976; 1977).

La maggior parte dei pesci bioluminescenti (circa il 90%) vive nella zona mesopelagica (tra 150 e 1000 m di profondità) e quindi vengono definiti animali scotofili (Cavallaro G., 1987).

Tra essi è possibile distinguere tre tipi fondamentali di processi bioluminescenti (Allen & Case, 1990; Haygood et al 1994; Haneda, 1963):

- bioluminescenza extracellulare
- bioluminescenza intracellulare
- bioluminescenza batterica

1.2.1.1. Bioluminescenza extracellulare

La bioluminescenza extracellulare è quel tipo di fenomeno che prevede il versamento di materiale ghiandola-re luminescente nell'ambiente esterno direttamente o indirettamente tramite l'intestino; il secreto diviene luminoso a contatto con l'acqua di mare (solitamente è l'ossigeno disciolto che funge da cofattore).

In questo tipo di bioluminescenza la produzione di luce è controllata dalla concentrazione del substrato luminescente.

1.2.1.2. Bioluminescenza batterica

La bioluminescenza batterica è l'emissione di luce derivante da reazioni chemiluminescenti prodotte da colonie di batteri simbiotici localizzati in varie parti del corpo dell'animale che controlla, peraltro, la produzione di luce mediante apposite strutture.

Tali parti possono essere barbigli o filamenti, solitamente annessi ai potenti mascellari inferiori, oppure le cosiddette "esche" dei pesci pescatori, ovvero delle vere e proprie sacche provviste di pori per la fuoriuscita di composti luminescenti collegati al corpo dell'animale da lunghi peduncoli.

I batteri luminescenti si possono trovare nelle cavità buccali, in quelle anali o, addirittura, all'interno delle cavità orbitali.

1.2.1.3. Bioluminescenza intracellulare

La bioluminescenza intracellulare è tipica di quegli organismi che possiedono veri e propri organi luminosi, di natura ghiandolare, dislocati su tutta la superficie del corpo. Tali organi possiedono cellule ghiandolari specifiche che sono deputate alla secrezione del substrato chemiluminescente, i fotociti, nonché tutta una serie di strutture diottriche caratteristiche.

Nella bioluminescenza intracellulare la produzione di radiazioni luminose è regolata da meccanismi nervosi e da reazioni ormonali.

1.2.1.3.1 Struttura dei fotofori

Gli organi luminosi o fotofori sono stati scoperti dal messinese Anastasio Cocco nel 1838 grazie alle osservazioni che eseguì su pesci di profondità riportati in superficie dalle correnti ascensionali dello Stretto di Messina. Egli li descrisse come punti luminosi o brillanti, senza precisare le loro specifiche funzioni fisiologiche.

I fotofori sono veri e propri organi luminosi di natura ghiandolare che variano per forma e dimensione a seconda della specie cui appartengono e possono rappresentare il 12% della superficie del pesce e fino al 15% del volume (Anctil, 1972).

Alcuni, di forma sferoidale, sono dislocati tra le scaglie come nel genere *Hygophum* (figura 6) altri hanno, invece, forma di piccoli otri come in *Vinciguerra* (figura 7).

Anche il numero, la forma e la disposizione variano da specie a specie e, in alcuni casi, i fotofori sono riuniti ed i fotociti raggruppati in una camera comune. In *Argyropelecus hemigymnus*, ad esempio, sulla faccia ventrale si aprono 24 orifizi tubolari che fanno capo ad una grande camera, all'interno della quale sono contenuti i fotociti (figura 8).

Dal punto di vista macroscopico i fotofori si presentano, nelle diverse specie, con morfologia differente; ciò non si verifica, invece, a livello microscopico dove possiamo notare una organizzazione simile.

I fotociti si trovano, infatti, raggruppati all'interno di una camera, detta fotogena, alla periferia della quale è localizzata una struttura, detta lente, la cui funzione è quella di concentrare la luce emessa dall'organo (figura 9).

L'intera camera fotogena è circondata da uno strato di cellule, ricche di cristalli di guanina, detto riflettore con la funzione di riflettere la luce emessa e convogliarla verso la lente (figura 10).

L'organo presenta una imponente vascolarizzazione che assicura il trofismo dell'organo, il cui controllo funzionale è garantito da una serie di terminazioni nervose (Bassot, 1960a, b).

Le cellule fotogene, dette fotociti, sono deputate alla produzione del substrato chimico per le reazioni luminose. Esse sono voluminose, con il nucleo sempre confinato in una zona ialina del citoplasma.

I fotociti, presentano un ergastoplasma molto sviluppato e granuli di secrezione con caratteristiche istochimiche (glicoproteine) identiche in tutte le specie studiate. Tali cellule durante la loro intensa attività secretoria, si caricano di questi granuli di secrezione. Le cellule della lente, invece, appaiono ripiene di vacuoli, così da diventare trasparenti (figura 11).

Dal punto di vista embriologico i fotofori derivano dall'ectoderma e si formano esattamente come le ghiandole epidermiche, affossandosi secondariamente all'interno del derma.

Il riflettore è ricco di cristalli di guanina immersi in una matrice amorfa (Denton et al, 1969). La parete stessa del riflettore è coperta da uno strato di iridociti di melanina, detto strato pigmentato (figura 12).

Le cellule fotogene e quelle della lente si differenziano tardivamente ed in alcune specie tale differenziazione è minima, mentre in altre appare piuttosto marcata. In talune specie non sussiste un differenziamento della lente e tale deficit è colmato dal foglietto mesodermico che provvede a ricoprire l'organo a spese della scaglia (ciò avviene nel genere *Hygophum*) (Edwards and Herring, 1977). Lo studio comparato sulla struttura di questi organi offre la possibilità di approfondire i fenomeni adattativi di convergenza che portano queste strutture luminose ad avere una morfologia ed una fisiologia simili nonostante esse siano presenti in organismi tra essi lontani nella scala evolutiva. (Cavallaro M. et al. 2004).

1.3. Funzioni della bioluminescenza

Le funzioni attribuite ai fenomeni di bioluminescenza sono molteplici ed ancora oggetto di studio.

La disposizione "topografica" dei fotofori sulla superficie corporea degli animali, diversa da specie a specie, evidenzia una funzione riferita sicuramente al riconoscimento intra ed interspecifico.

La disposizione dei fotofori è come un'impronta digitale per ogni singola specie a garanzia di una efficiente tecnica di predazione (riconoscimento al buio delle prede) e di riproduzione (individuazione di elementi di sesso opposto) (Clarke, 1963; Barnes & Case, 1974; Baguet et al., 1983).

Il mimetismo è un altro fenomeno sicuramente importante conseguente alla bioluminescenza; i pesci lo utilizzano per proteggersi dai predatori presentando sulla superficie ventrale e laterale del corpo la serie di fotofori orientati verso il basso che permettono loro di autoccurrarsi. Infatti l'emissione luminosa ventrale capterebbe i raggi solari sulla faccia dorsale eliminando così la proiezione dell'ombra del pesce (McAllister, 1967).

Un'ulteriore funzione da citare è la predazione. I pesci luminescenti utilizzano, infatti, le radiazioni luminose per rischiarare un ambiente buio alla ricerca di eventuali prede che in seguito abbagliano con la luce emessa, catturandole (Case et al., 1977).

Alcuni fotofori, posti in prossimità dei bulbi oculari, fungono anche da "luci pilota", ovvero emettono luce di intensità minore ma più o meno continua rispetto ad altri organi, per fare in modo che le sensibilissime e molto sviluppate retine dell'animale siano sempre abituate alla luce in un ambiente dove questa luce è sicuramente poca. Ciò per ovviare ad eventuali improvvisi attacchi di predatori che utilizzano le stesse tecniche (Young, 1983).

2. I pesci bioluminescenti presenti nello Stretto di Messina

2.1. Premessa

Intorno alla metà dell'800, si credeva che le profondità del mare fossero azoiche (prive di vita).

I primi dragaggi, effettuati nel Mediterraneo tra i 300 e i 700 metri di profondità non facevano che confermare queste ipotesi, a causa dell'inadeguatezza degli strumenti utilizzati. Ma gli animali "abissali" erano già conosciuti dai pescatori i quali credevano che giungessero da qualche ignoto punto delle grandi profondità del mare, tanto che li chiamavano "pisci diavoli".

Il messinese Anastasio Cocco aveva determinato, già nel 1829, pesci appartenenti ai generi Vinciguerra e *Icthyococcus* descrivendone gli organi luminosi e fornendo così il primo contributo scientifico allo studio della "fauna abissale".

I pesci batifili presenti nello Stretto di Messina conducono vita meso e batipelagica. Essi mostrano stratificazione verticale, con migrazioni giornaliere che li portano dalle quote dove abitualmente vivono, sino alla superficie.

In passato, e per altri aspetti, sui pesci mesopelagici dello Stretto si sono interessati anche Berdar et al., 1977; 1983; Baguet et al., 1983; Cavallaro G., 1987.

2.2. Lo Stretto di Messina

Le caratteristiche oceanografiche ed idrodinamiche dello Stretto di Messina risultano estremamente complesse e ciò ha fornito, da sempre, spunto per molte ricerche.

Lo Stretto, per le sue correnti e per la struttura morfologica dei suoi fondali, porta alla formazione di una vasta provincia oceanografica, i cui parametri ambientali consentono la sopravvivenza di una elevata quantità di specie animali sia vertebrati che invertebrati.

I vortici causati dalla risalita di acque, fredde e ricche di nutrienti, provenienti dal mar Ionio rimescolano le acque superficiali del mar Tirreno. Queste, a loro volta, riversandosi nello Ionio ne mitigano le condizioni, originando fasce intermedie che, con il loro riflusso verso sud, lungo la costa siciliana fino al Canale di Sicilia, si incontrano con i fronti freddi delle acque atlantiche che si dirigono verso oriente, fino al Mediterraneo centrale.

A nord dello Stretto, le correnti, fanno sentire la loro azione su un'ampia fascia tirrenica che si spinge fino a Capo Vaticano ed al Golfo di Policastro verso nord ed a ovest fino a Palermo, per cui il bacino del basso Tirreno è "invaso" da masse d'acqua più fredda e con potenzialità produttive maggiori rispetto a quelle che avrebbe il Tirreno stesso senza i suddetti rimescolamenti.

Anche l'acqua del bacino del Mediterraneo orientale, detta "acqua levantina", presenta caratteristiche particolari poiché le acque calde (con caratteristiche ormai subtropicali) si spingono fino alle coste orientali della Sicilia e trovano ostacolo, per la loro diffusione, nella posizione geografica dell'isola e nei fronti freddi di provenienza atlantica (Mazzarelli, 1909; Genovese et al., 1971).

Viene così a formarsi una vasta regione di acque miste che condiziona la diffusione e la dispersione degli organismi marini, garantendo la sopravvivenza di specie animali del bacino occidentale (con caratteristiche atlantiche) e di quello orientale (con caratteristiche indo-pacifiche).

Tutto questo dimostra la rilevanza della posizione geografica, al centro del Mediterraneo, dello Stretto di Messina. La forma dello Stretto è ad imbuto con l'apertura verso lo Ionio ed il "collo" verso il Tirreno.

La profondità del mar Ionio aumenta rapidamente lungo la direzione nord-sud raggiungendo, quasi all'altezza della città di Catania, la batimetrica dei 2000 metri. Nel Tirreno, il pendio decresce più dolcemente raggiungendo, a Milazzo, la batimetrica dei 1000 metri. Quindi il fondo prende la configurazione di un monte la cui vetta, che si trova lungo la congiungente Punta Pezzo – Ganzirri, arriva fino alla quota batimetrica di 72 metri, la più bassa dell'intero sistema. La curvatura verso est dello Stretto è data dal regime di erosione delle correnti lungo la costa siciliana (Pace – S. Agata) e un conseguente interrimento nel tratto calabro antistante Punta Pezzo (figura 13).

Questa digressione geomorfologica serve solo a dimostrare quanto sia imponente il regime idrodinamico delle correnti di marea che percorrono lo Stretto.

La forma ad imbuto e la natura del fondo accidentata fanno sì che la corrente non abbia decorsi regolari, ma che si vengano a formare delle controcorrenti litorali, detti "refoli" e vortici. Così, mentre nella parte centrale dello Stretto la corrente decorre più o meno come un fiume, cambiando periodicamente (ogni sei ore) direzione nell'epoca sizigiale, le zone della costa sono interessate da correnti di altra natura.

È questo alternarsi periodico delle correnti ("montante" in direzione S⇒N e "scendente" in direzione N⇒S) a causare i fenomeni di risalita di un significativo numero di organismi appartenenti a specie di diversi taxa quali: Briozoi, Celenterati, Molluschi, Crostacei e Pesci che, in seguito a tutta una serie di choc pressori ed osmotici, muoiono e vengono rigettati, dalla risacca, come relitti sul litorale. Si verifica così il ben noto e caratteristico fenomeno dello spiaggiamento. (Bossolasco et al., 1957; 1959; Magazzù & Cavallaro, 1972; Mosetti, 1988; Tomasin, 1980) (figura 14).

L'ittiofauna batifila bioluminescente dello Stretto di Messina comprende numerose specie appartenenti a diverse famiglie elencate nella tabella 3.

Tabella 3. Famiglie e specie appartenenti all'ittiofauna mesopelagica bioluminescente dello Stretto di Messina

Famiglia	Genere	Specie
Gonostomatidae	Gonostoma	Gonostoma denudatum
Gonostomatidae	Cyclothone	Cyclothone pigmaea
Gonostomatidae	Cyclothone	Cyclothone braueri
Gonostomatidae	Vinciguerria	Vinciguerria attenuata
Gonostomatidae	Vinciguerria	Vinciguerria poweriae
Gonostomatidae	Ichthyococcus	Ichthyococcus ovatus
Gonostomatidae	Maurolicus	Maurolicus muelleri
Melanostomiidae	Bathophilus	Bathophilus nigerrimus
Stomiidae	Stomias	Stomias boa
Sternoptychidae	Argyrolepecus	Argyrolepecus hemigymnus
Chauliodontidae	Chauliodus	Chauliodus sloanei
Mictophidae	Ceratoscopelus	Ceratoscopelus maderensis
Mictophidae	Benthoosema	Benthoosema glaciale
Mictophidae	Gonichthys	Gonichthys coccoi
Mictophidae	Lampanictus	Lampanictus pusillus

Mictophidae	Lampanictus	Lampanictus crocodilus
Mictophidae	Lobianchia	<i>Lobianchia dofleini</i>
Mictophidae	Lobianchia	<i>Lobianchia gemellari</i>
Mictophidae	Notoscopelus	<i>Notoscopelus elongatus</i>
Mictophidae	Symbolophorus	<i>Symbolophorus veranyi</i>
Mictophidae	Electrona	<i>Electrona rissoi</i>
Mictophidae	Hygophum	<i>Hygophum benoiti</i>
Mictophidae	Hygophum	<i>Hygophum hygomi</i>
Mictophidae	Myctophum	<i>Myctophum punctatum</i>
Mictophidae	Diaphus	<i>Diaphus rafinesquei</i>
Mictophidae	Diaphus	<i>Diaphus holti</i>
Mictophidae	Aethoprora	<i>Aethoprora metopoclampa</i>

Queste specie possiedono delle caratteristiche biologiche comuni. Le livree sono solitamente molto scure o di colore grigio-argenteo dotato di riflessi metallici; alcuni sono totalmente trasparenti senza pigmenti scuri (melanina) o riflettenti (guanine). Tali pigmenti hanno funzione protettiva; infatti per il loro potere assorbente o per il loro potere riflettente difendono l'animale dall'azione di radiazioni sfavorevoli. Gli occhi sono molto grandi oppure tubulari e telescopici adatti a far pervenire sulla retina la massima quantità di luce. Spesso provvisti di due retine ricche di coni e di bastoncelli (fino a 20.000.000 per ogni millimetro quadrato di superficie retinica) contenenti la porpora retinica e suscettibili di essere impressionate dalla luce debole. Le bocche sono molto grandi, armate di denti lunghi e affilati e le mandibole possono avere la caratteristica di disarticolarsi per permettere all'animale di ingoiare prede molto voluminose.

Il primo reperto di fauna batifila fu studiato nel 1829; si tratta di *Argyrolepecus hemigymnus*, (figura 15) detto comunemente "Ascia d'argento mezzo nudo", così chiamato perché la sua forma ricorda una mannaia, di colore appunto argentata. E' una specie di modeste dimensioni, tanto che può raggiungere massimo i 4-5 cm di lunghezza. Nelle acque dello Stretto è abbondantissimo e vive fino a 3.000 metri di profondità.

Molto comune è il *Maurolucus muelleri*, (figura 16) che vive fino a 500 metri di profondità. Il genere fu stabilito da Cocco nel 1838 e dedicato all'abate Francesco Maurolico. Spiaggia lungo le coste dello Stretto di Messina in tutti i mesi dell'anno.

Chauliodus sloani (letteralmente "Denti sporgenti di Sloani") ritratto in figura 17, e comunemente denominato "Vipera di mare", è una specie batipelagica che vive tra i 300 e i 600 m. di profondità, ma che si spinge anche in superficie nello Stretto di Messina, dove spiaggia regolarmente. Possiede denti potenti ed un raggio filamentoso mobile sulla pinna dorsale che serve ad attirare le prede. Può raggiungere i 35 cm.

In figura 18 è raffigurato il *Myctophum punctatum* (Pesce lanterna puntato) spiaggiato lungo il litorale di capo Peloro a Messina. Si tratta di una specie gregaria che di notte risale in superficie e si raduna anche in vicinanza delle luci delle lampare. Si trova molto frequentemente spiaggiata, anche sulle coste liguri, nei mesi tra aprile e giugno.

Aetoprora metopoclampa (Muso lucente), in figura 19, è una specie che vive più vicina al fondo, rispetto alle altre specie di Mictofidi. Caratteristico è l'organo luminoso frontale estremamente sviluppato.

Lo *Stomias boa* (Drago di mare), raffigurato in figura 20, è una specie batipelagica che vive in profondità variabili tra la superficie e oltre i 1000 metri. Può raggiungere i 30 cm di lunghezza. Caratteristico è il barbiglio presente nel mascellare inferiore.

3. Bibliografia

- Allen, D. G. and Case, J. F. (1990). Luminescent properties of deep-sea fish. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol* vol 144
- Anctil, M. (1972). Luminescent organs of Myctophid fishes: Structural and histochemical aspects. *Canad. J. Zool.* 50, 233-237
- Baguet, F. and Marechal, G. (1974). Bioluminescence of a bathypelagic fish *Argyrolepecus hemigymnus*. *Archs. Int. Physiol. Biochim.* 82, 754-756

- Baguet, F. (1975). Excitation and control of isolated photophores of luminous fish. *Prog. Neurobiol* 5, 95-123
- Baguet, F. and Marechal, G. (1976). Bioluminescence of bathypelagic fish from the Strait of Messina. *Comp. Biochem. Physiol.* 53, 75-82
- Baguet, F. (1977). Les photophores des poissons lumineux. *Rev. Quest. Sci.* 148, 21-41
- Baguet, F. and Piccard, J. (1981). The counterlighting hypothesis: in situ observations on *Argyrops hemigymnus*. *Bioluminescence and Chemiluminescence*, Academic Press, London, 517-523
- Baguet, F., Piccard, J., Christophe, B., Marechal, G. (1983). Bioluminescence and luminescent fish in the Strait of Messina from the mesoscap "Forel". *Mar. Biol.* 74, 222-229
- Baguet, F. and Christophe, B. (1983). Luminescence of isolated photocytes from *Porichthys* photophores: adrenergic stimulation. *J. exp. Biol.* 104, 183 - 192
- Baguet, F. and Christophe, B. (1983). Adrenergic stimulation of isolated photophores of *Maurolicus muelleri* *Comp. Biochem Physiol.* 75, 79-84
- Baguet, F. (1985). Aspects comparatifs de la bioluminescence des poissons lumineux du Détroit de Messine. *Ann. Soc. Zool. Belg* 1, 61-73
- Barnes, A. T. and Case, J. F. (1974). The luminescence of Lanternfish (Myctofidae): spontaneous activity and responses to mechanical, electrical and chemical stimulation *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 15. 203 - 221
- Bassot, J. M. (1960a). Donnée histochimiques et cytologiques sur les photophores due Téléostéen *Maurolicus pennanti*. *Arch. Anat. Morphol. Exp.* 49, 23 - 71
- Bassot, J. M. (1960b). Caractères cytologiques des cellules lumineuses chez quelques Téléostéens. *C. R. hebdom. Séanc Acad. Sci. Paris* 250, 3878 – 3880
- Berdar, A., Cavallaro, G., Giuffrè, G., Potoschi, A. (1977). Contributo alla conoscenza dei pesci spiaggiati lungo il litorale siciliano dello Stretto di Messina. *Mem. Biol. Mar. Oceanogr.* VII
- Berdar, A., Cavaliere, A., Cavallaro, G., Giuffrè, G., Potoschi, A. (1983). Lo studio degli organismi marini spiaggiati nello Stretto di Messina negli ultimi due secoli. *Nat. Sic. S. IV VII (1-4)* 3 – 17
- Bossolasco, M. e Dagnino, I. (1957). Sulla turbolenza delle correnti marine nello Stretto di Messina. *Riv. Geof. Pura Appl.* 37.
- Bossolasco, M. e Dagnino, I. (1959). La diffusione delle acque ioniche nel Tirreno, attraverso lo Stretto di Messina. *Riv. Geof. Pura Appl.* 44.
- Buck, J. (1961). Speculations on the interrelations and evolution of photic organs. In "*Light and Life*". Johns Hopkins University Press, Baltimore
- Case, J. F., Warner, J., Barnes, A. T., and Lowenstine, M. (1977). Bioluminescence of lanternfish Myctophidae in response to changes in light intensity. *Nature* 265, 179 – 181
- Cavallaro, G. (1987). I pesci mictofidi dello Stretto di Messina. *Doc e Trav IGAL n° 11 Paris Church, R. (1970). Bioluminescence: the sea's living light Ocean* 3, 20 – 29
- Cavallaro M, Mammola C. L., Verdiglione R. (2004). Structural and ultrastructural comparison of photophores of two species of bathypelagic teleosts of the Strait of Messina: *Argyrops hemigymnus* Cocco 1829 and *Maurolicus muelleri* (Gmelin) 1789. *Journal of Fish Biology* (2004) 64, 1552–1567
- Clarke, W. D. (1963). Function of bioluminescence in mesopelagic organism. *Nature* 198, 1244 – 1246
- Cormier, M. J. and Trotter, J. R. (1964). Bioluminescence A. *Rev. Biochem.* 33, 431 – 458.
- Cormier, M. J., Kreiss, P. and Prichard, P. M. (1966). Bioluminescence systems of the peroxidase type. in "Bioluminescence in Progress" – Princeton University Press. 381 – 384.

- Cormier, M. J. and Trotter, J. R. (1968). *Bioluminescence* in "Photophysiology". Academic Press N. Y. and London 4, 315 - 353
- Cormier, M. J., Wampler, J. E. and Hori, K. (1973a). *Bioluminescence: chemical aspects*. In "Progress in the Chemistry of Organic Natural Products" Springer – Verlag N. Y. 1 – 60
- Cormier, M. J., Hercules, D. M. and Lee, J. (1973b). "*Chemiluminescence and Bioluminescence*" Plenum Press., N. Y.
- Denton E. J. Gilpin - Brown, J. B. and Roberts, B. L. (1969). On the organization and function of the photophores of *Argyropoecus*. *J. Physiol., London*. 204, 38.
- Edwards, A. S. and Herring, P. J. (1977). Observation on the comparative morphology and operation on the photogenic tissues of Myctophid Fishes. *Mar. Biol.* 41, 59-70
- Genovese, S., Berdar, A., Guglielmo, L. (1971). Spiaggiamenti di fauna abissale nello Stretto di Messina *Atti. Soc. Pel. Sci FF MM NN vol XVII fasc III IV*
- Haneda, Y. (1963). Some observations on photophores, especially a transparent cheek area in the toadfish, *Porichthys*. *Sci. Rep. Yokosuka Cy. Mus* 8, 17 – 22
- Harvey, E. N. (1916). The mechanism of light production in animals. *Science, N. Y.* 44, 208 - 209
- Harvey, E. N. (1917). Studies on bioluminescence. V. The chemistry of light production by the firefly. *Am. J. Physiol.* 42, 342 – 348.
- Harvey, E. N. (1920). "*The Nature of Animal Light*". Philadelphia
- Harvey, E.N. (1952). "*Bioluminescence*". Academic Press, NY.
- Hastings, J. W. (1968). Bioluminescence. *A. Rev. Biochem.* 37, 597 – 630
- Haygood, M. G. and Edwards, A. S., (1994). Bioluminescence of Myctophid fishes is not due to Bacterial luciferase. *J. Exp. Zool.* 270
- Herring, P. J. (1972). Bioluminescence of searsid fishes. *J. mar biol. Ass. U.K.* 52, 879 - 887
- Herring, P. J. (1976). Observations of bioluminescence at sea. *Mar. Obsr.* 46, 176 - 183
- Herring, P. J. (1977). Bioluminescence in marine organism. *Nature, Lond.* 267, 788 – 793.
- Herring, P. J. (1978). *Bioluminescence in action*. Academic Press London
- Kricka, L. J. (1995). *Chemiluminescence and Bioluminescence*. Analytical Chemistry
- Lloyd, J. E. (1971). Bioluminescent communication in insects. *A. Rev. Ent.* 16, 97 - 122
- Magazzù, G. e Cavallaro, G. (1972). Contributo alla conoscenza delle condizioni idrologiche e della produzione primaria delle acque costiere dell'alto Ionio. *Mem. Biol. Mar. Oceanogr.* 2, 99 – 118.
- Mazzarelli, G. (1909). Gli animali abissali e le correnti sottomarine dello Stretto di Messina. *Riv. Mens. Pesca Pavia*, 9 - 12
- McAllister, D. E. (1967). The significance of ventral bioluminescence in fishes. *J. Fish Res. Board. Can* 24, 531 – 554
- McCabra, F. (1973). *The chemitry of bioluminescence*. Endeavour 32, 139 – 145.
- McCabra, F. (1976). Chemical mechanisms in bioluminescence. *Acc. Chem. Res.* 9, 201 – 208.
- McElroy, W. D. (1960) Bioluminescence. *Fed. Proc.* 19, 941 – 950
- McElroy, W. D. and Glass, B. (1961). "*Light and Life*". Johns Hopkins Press, Baltimore
- McElroy, W. D. and Seliger, H. H. (1962). Biological luminescence. *Scient. Am.* 207 n° 6, 76 – 89.

- Mosetti, F. (1988). Some news on the currents in the Strait of Messina. *Boll. Ocean Teor. Appl.* 3, 119-179
- Nicol, J. A. C. (1969). Bioluminescence. *Fish Physiol.* 3, 355 – 400
- Shimonura, O., Inoue, S., Johnson, F. H., Haneda, Y. (1980) Extraction, purification and properties of aequorin, a bioluminescent protein from the luminous hydromedusan Aequorea. *F. Cell. Comp. Physiol.* 59, 223-240
- Tomasin, A. (1980). Nuove conoscenze idrografiche relative allo Stretto di Messina. *C N R – I D G M Venezia*
- Wassink, E. C. (1948). Observations on the luminescence in funghi. *Rec. Trav. Bot. Néerl.* 41, 150 - 212
- Young, R. E. (1983). Oceanic bioluminescence: an overview of general function. *Bull. Mar. Sci.* 33,829 – 845.

Nuove frontiere della fotosintesi clorofilliana: la foglia artificiale

Elisabetta Oddo

Dipartimento di Biologia Ambientale e Biodiversità - Università di Palermo, via Archirafi 38, I-90123 Palermo

elisabetta.oddo@unipa.it

Sommario. Per molti anni la scienza ha tentato di riprodurre il processo fotosintetico delle piante, che permette di utilizzare la luce del sole e l'anidride carbonica dell'atmosfera per produrre gli zuccheri necessari al loro metabolismo. Nella primavera del 2010 sui quotidiani compare la notizia rivoluzionaria della creazione di una foglia artificiale, capace di trasformare la luce in una fonte di energia utilizzabile dall'uomo. Su quali principi si basa questa scoperta? Quanto ha di analogo con i processi che avvengono nelle foglie? E quanto siamo vicini all'applicazione su vasta scala di questa innovazione tecnologica?

Abstract. For many years scientists have tried to mimic plant photosynthesis, a process that uses energy from the sun and carbon dioxide from the atmosphere to produce sugars. In the spring of 2010, newspapers reported the revolutionary creation of an artificial leaf, able to transform light into a source of energy for man. What are the principles on which this discovery is based? How much does it resemble natural processes in the leaf? And how close are we to a large-scale application of this new technology?

In una sola ora il sole fornisce alla terra energia sufficiente per le attività umane di un intero anno.

Mediante il processo biologico della fotosintesi le piante verdi, i cianobatteri ed i batteri fotosintetici convertono l'energia della luce solare in energia di legami chimici dei composti organici. La fotosintesi utilizza l'energia luminosa per accoppiare la formazione di O₂ alla fissazione di CO₂, generando simultaneamente una atmosfera aerobica ed una fonte di carbonio prontamente disponibile, rendendo in questo modo possibile quasi tutta la vita sul nostro pianeta. Piante verdi, alghe e cianobatteri utilizzano la regione visibile delle radiazioni elettromagnetiche della luce, tra i 400 e i 700 nm, ed ogni anno vengono organicate dalla fotosintesi circa 200 miliardi di tonnellate di carbonio, ad opera degli organismi fotosintetici che colonizzano le terre emerse, i laghi, i fiumi, e le acque di oceani e mari (Forti, 2009).

Gli scienziati sono sempre stati incuriositi dallo studio delle foglie ed hanno tentato la ricostruzione di foglie artificiali per vari scopi sperimentali, per meglio comprendere il funzionamento di queste strutture e più recentemente per cercare di riprodurre i processi caratteristici di questi organi vegetali.

I primi studi vedevano la costruzione di foglie artificiali per studiarne aspetti fisici come gli scambi termici, gli effetti sulla condensa, il trasporto di acqua. Ad esempio, tra la fine degli anni '60 ed i primi anni '70 vengono studiati su foglie artificiali in gallerie del vento lo scambio di momento, massa e calore (Thom, 1968) o la quantità di condensa in presenza di nebbia (Merriam, 1973) (con foglie di alluminio e plastica). Ancora nel 2008 su foglie artificiali viene determinata la densità ottimale delle nervature per il rifornimento dell'acqua alla lamina, in relazione al suo spessore (Noblin et al., 2008).

Ma la vera sfida è sempre stata quella di riuscire a ricreare il processo fotosintetico, con la sua immensa potenzialità di conversione dell'energia solare in energia chimica.

Nella primavera del 2010 sui quotidiani compare la notizia della creazione di una foglia artificiale, capace di trasformare la luce in una fonte di energia utilizzabile dall'uomo (La Repubblica, 14 aprile 2010). Gli auto-

ri di questa scoperta sono un gruppo di ricercatori del Massachusetts Institute of Technology (MIT), guidati dal Prof. Daniel Nocera (MIT news web site, 2011).

Anche se non è verde e non si accresce, per certi aspetti la lamina di silicio di Daniel Nocera messa in un bicchiere d'acqua si comporta come una foglia. Per chiarire le analogie tra questa foglia artificiale ed una naturale, possiamo ripercorrere alcuni punti salienti dello studio del processo fotosintetico.

Alla fine degli anni '30, lavori indipendenti di Cornelius van Niel con i solfobatteri e di Robert Hill con cloroplasti isolati dimostrarono che il processo fotosintetico non è un processo di fotolisi della CO₂, ma un processo di ossido-riduzione determinato dalla luce, in cui l'acqua è il donatore di elettroni. Ancora nel 1953 si pensava che per l'organizzazione della CO₂ fosse necessario ATP derivante dalla respirazione mitocondriale. Furono poi Arnon ed i suoi collaboratori nel 1954 a dimostrare la sintesi di ATP luce-dipendente direttamente nei cloroplasti isolati. Sempre Hill nel 1960 spiegò in dettaglio il processo mediante il rivoluzionario 'schema a Z' che spiega come le reazioni della fase luminosa producono ATP e NADPH a partire dalla ossidazione dell'acqua e mediante la cooperazione dei fotosistemi I e II (Allen, 2003).

Il fotosistema II catalizza una delle reazioni più esigenti in biologia dal punto di vista termodinamico: la foto-ossidazione dell'acqua. In questo modo fornisce gli equivalenti riducenti (elettroni e protoni derivati dall'acqua) che, con una ulteriore immissione di energia da parte del fotosistema I, serviranno per convertire l'anidride carbonica in biomassa, cibo e combustibile (Ferreira et al., 2004). Nel contempo con la scissione dell'acqua si forma ossigeno molecolare come prodotto di scarto.

Il meccanismo di evoluzione dell'ossigeno comincia a delinearsi intuitivamente già nel 1937, quando Pirson osservava che piante ed alghe allevate in assenza di manganese perdevano la capacità di sviluppare ossigeno. In effetti il PSII comprende un complesso a 4 atomi di Mn, un elemento che ben si presta a passare attraverso successivi stati di ossidazione. Nel 1970 Kok e collaboratori, partendo da osservazioni compiute da Joliot dieci anni prima, propongono un meccanismo definito di stato S per spiegare l'ossidazione dell'acqua attraverso 5 stadi intermedi. Joliot aveva notato che l'evoluzione di O₂ presentava dei picchi dopo 3, 7, 11 lampi di luce. Kok propose che il complesso per l'evoluzione dell'ossigeno passasse ciclicamente attraverso 5 stati intermedi di ossidazione, grazie a 4 fotoni assorbiti in successione dal centro di reazione del PSII (Yachandra et al., 1996). Negli anni successivi e fino ad oggi numerosi gruppi di ricerca si sono dedicati allo studio delle caratteristiche strutturali e chimiche di questo complesso e delle sue interazioni con le molecole di acqua. Nel 2004, Ferreira et al. hanno pubblicato la struttura cristallina ad alta risoluzione del PSII di un cianobatterio, *Thermosynechococcus elongatus*, concludendo che il complesso per l'evoluzione dell'ossigeno (OEC) è un gruppo Mn₃CaO₄ legato ad un quarto ione Mn, dove possibilmente avviene l'ossidazione dell'acqua. Questo è attualmente il modello più accettato anche per le piante.

In un sistema di fotosintesi artificiale la prima fase di conversione fotochimica è quella che si è cercato prima di tutto di simulare.

Nel processo fotosintetico naturale la scissione delle molecole d'acqua porta alla liberazione di O₂, mentre gli ioni idrogeno vengono utilizzati per formare NADPH e ATP che saranno successivamente utilizzati nelle reazioni di organizzazione del carbonio, per cui l'energia radiante viene convertita alla fine del processo in energia di legame chimico delle molecole degli zuccheri, disponibili come fonte di energia metabolica per le piante ma anche per tutti i consumatori della catena trofica. Nel processo fotosintetico artificiale la scissione delle molecole d'acqua porta alla liberazione sia di O₂ che di H₂, che può essere utilizzato come combustibile.

L'elettrolisi è il processo usato commercialmente per scindere la molecola d'acqua in idrogeno ed ossigeno, utilizzando energia elettrica. L'accoppiamento di sistemi fotovoltaici con sistemi elettrolitici permette di produrre idrogeno utilizzando una fonte di energia rinnovabile (Turner, 2008). Da molti anni esistono celle solari che generano elettricità che attraverso cavi raggiunge degli elettrodi ricoperti da catalizzatori che a loro volta scindono l'acqua formando idrogeno. La produzione di ossigeno molecolare è più complessa di quella dell'idrogeno. Per generare ossigeno dall'acqua bisogna strappare quattro elettroni da due molecole di acqua, rilasciando quattro protoni e lasciando gli atomi di ossigeno abbastanza vicini per combinarsi nel gas biatomico. Questi sistemi utilizzano catalizzatori costosi (come il rutenio, l'iridio o il platino) e le reazioni avvengono in mezzi fortemente acidi o basici che richiedono la protezione della cella solare. All'inizio degli anni '90 viene realizzata una prima 'foglia artificiale' capace di generare una corrente elettrica utilizzando l'energia

solare, un sistema fotovoltaico molecolare per cui vengono riportati dei picchi di efficienza del 90% e la possibilità di realizzare un prototipo con una resa del 7-11% (Grätzel, 1991).

La fotoelettrolisi diretta dell'acqua si può ottenere riunendo tre componenti principali: un semiconduttore per raccogliere l'energia solare, un elettrodo per l'evoluzione dell'idrogeno ed un elettrodo per l'evoluzione dell'ossigeno. Se si tengono separati i due gas, si può raccogliere l'idrogeno ottenuto unicamente con l'apporto energetico della luce solare, senza un flusso elettronico esterno. Con l'avvento delle nanotecnologie si sono aperte nuove frontiere anche per la ricerca in questo campo.

Nel 2003 un gruppo giapponese ha pubblicato risultati sulla produzione di una microcella elettrolitica fotovoltaica, che pur utilizzando catalizzatori poco costosi, tuttavia era stabile per meno di una giornata e funzionava in un mezzo fortemente basico (Yamada et al., 2003).

Nel 2008 il gruppo del MIT ha realizzato un catalizzatore molto più economico di quelli tradizionali, costituito da una pellicola di cobalto e fosfato depositata su un conduttore trasparente formato da ossido di indio e stagno. Gli autori sostengono inoltre che la pellicola catalitica si può ri-depositare *in situ* durante il processo, un'altra analogia con una foglia naturale, dove si ha un continuo ricambio dei componenti dell'apparato fotosintetico.

Dopo avere messo a punto il sistema di catalizzatori, il Prof. Nocera e collaboratori nel 2011 hanno presentato ad una riunione della American Chemical Society questa piccola 'foglia artificiale'. Questa foglia artificiale è la prima a riunire cella solare e catalizzatori in un unico sistema, non connesso da fili elettrici, e che funziona in un mezzo a condizioni neutre e temperatura ambiente, come dimostrato utilizzando per il funzionamento un bicchiere d'acqua prelevato dal fiume Charles che scorre vicino al MIT. Questa struttura, grande quanto una carta da gioco, è formata da una cella solare di silicio ricoperta da catalizzatori abbondanti ed economici: per l'evoluzione dell'ossigeno è stata trovata una formulazione ancora migliore di quella del 2008, con un elettrodo di borato di cobalto e nickel (Reece et al., 2011). In test di laboratorio, questa foglia artificiale ha operato ininterrottamente senza riduzioni di produttività per 45 ore.

Gli obiettivi del team del Prof. Nocera sono quelli di raggiungere una produzione di energia pulita e rinnovabile sotto forma di idrogeno ricavato dall'acqua e dal sole, che potrebbe essere sfruttata inizialmente per applicazioni militari e successivamente con l'abbattimento dei costi anche per la produzione di energia perfino per i paesi più poveri, producendo energia per una unità abitativa con 4 litri di acqua al giorno. Avere prodotto un congegno che funziona in configurazione senza fili apre la possibilità di creare un sistema in cui i due catalizzatori vengono applicati su una perlina di semiconduttore, e potere fare una sospensione di queste micro-foglie (o micro-alghe?!) artificiali in vasche di acqua marina. Come spin-off della ricerca è stata fondata una compagnia, Sun Catalytix, per la commercializzazione di questa foglia artificiale, che ha trovato il supporto di vari sponsor, tra cui la compagnia multinazionale indiana Tata.

Sebbene la chimica di questo processo sia affascinante, non tutti nel mondo scientifico sono concordi nel vedere l'applicabilità su larga scala di questo congegno. L'idrogeno non è necessariamente il combustibile ideale, e comunque un'alternativa più semplice sarebbe l'utilizzo della corrente elettrica generata sempre per fotolisi da celle solari costituite da materiali più costosi ma che hanno una maggiore efficienza.

In effetti il problema della efficienza di questa foglia artificiale è notevole.

L'energia solare che raggiunge la terra è di circa 5×10^{24} Joules all'anno, di cui la fotosintesi conserva circa lo 0,15% sotto forma di sostanza organica (Rascher & Nedbal, 2006). Se si considera la fotossidazione di una molecola di clorofilla da parte di un fotone, l'efficienza della conservazione di energia è altissima, tra il 92 ed il 99%. Per quanto riguarda il processo fotosintetico nel suo complesso, in condizioni sperimentali ottimali il rendimento della trasformazione fotosintetica, che richiede 10 fotoni/ CO_2 assimilata è di circa il 22,5%, ma in condizioni naturali si osserva generalmente un rendimento di circa il 10%, dato che parte della luce assorbita viene dissipata sotto forma di fluorescenza e calore. Ma se si valuta la resa effettiva della conversione della luce assorbita in sostanza organica durante tutto il ciclo di crescita delle piante, anche le più produttive come la canna da zucchero, essa supera di poco il 2%. Le celle solari fotovoltaiche oggi in commercio hanno una resa intorno al 15-20% e le fotocelle di più recente concezione arrivano anche al 40-45% (Forti, 2009).

La foglia artificiale del MIT ha una efficienza del 2,5% nella configurazione 'wireless', e del 4,7% nella configurazione provvista di cavi.

La produzione industriale di idrogeno come combustibile utilizzando luce solare ed acqua è senz'altro fattibile e si può già applicare utilizzando sistemi elettrolitici alimentati da energia fotovoltaica rinnovabile. Ma la fotosintesi artificiale, la scissione diretta dell'acqua usando l'energia solare è senz'altro un metodo migliore. Sappiamo che può funzionare, perché la natura lo fa da un paio di miliardi di anni, ma l'uomo ha priorità diverse da quelle della natura: ha bisogno di sistemi ad alta efficienza e basso costo, proseguendo sulla via della ricerca dei migliori sistemi per la cattura della luce e dei catalizzatori più economici.

In effetti la ricerca sulla fotosintesi artificiale per la produzione di idrogeno rimane un settore promettente, con gruppi in Europa, Stati Uniti e Cina, per fare degli esempi.

In Gran Bretagna il gruppo di Jim Barber all'Imperial College di Londra, in Cina il gruppo di Tongxiang Fan alla Shanghai Jiao Tong University, negli Stati Uniti il gruppo di Daniel Nocera al Massachusetts Institute of Technology e di Nate Lewis al Joint Center for Artificial Photosynthesis in California, che proprio nel 2011 ha ricevuto un finanziamento di 122 milioni di dollari dal Dipartimento di Energia per un progetto quinquennale per la produzione di una cella fotoelettrica capace di produrre idrogeno con una efficienza dieci volte maggiore di quella della fotosintesi naturale. Gli obiettivi di questo progetto comprendono tra l'altro l'identificazione dei migliori semiconduttori per l'assorbimento della luce, delle molecole più abbondanti ed efficienti per costituire i catalizzatori, dei materiali e delle tecniche migliori per fabbricare le membrane multifunzionali delle celle fotoelettrochimiche.

Bibliografia

- Allen, J.F. (2003). Cyclic, pseudocyclic and noncyclic photophosphorylation: new links in the chain. *Trends in Plant Science*, 8, 15-19.
- Ferreira, K.N., Iverson, T.M., Maghlaoui, K., Barber, J., Iwata, S. (2004). Architecture of the photosynthetic oxygen-evolving center. *Science*, 303, 1831-1838.
- Forti, G. (2009). La fotosintesi, fonte di energia per i viventi. In B.A. Melandri & P. Pupillo (Ed.) *L'energia e i Vegetali. Attualità delle ricerche di Assunta Baccharini* (pp. 61-80). Società Torricelliana di Scienze e Lettere, Faenza.
- Grätzel, M. (1991). The artificial leaf, molecular photovoltaics achieve efficient generation of electricity from sunlight. *Coordination Chemistry Reviews*, 111, 167-174.
- Merriam, R.A. (1973). Fog drip from artificial leaves in a fog wind tunnel. *Water Resources Research*, 9, 1591-1598.
- MIT news web site. <http://web.mit.edu/newsoffice/2011/artificial-leaf-0930.html>. Accessed 12/12/2011
- Noblin, X., Mahadevan, L., Coomaraswamy, I.A., Weitz, D.A., Holbrook, N.M., Zwienecki, M.A. (2008). Optimal vein density in artificial and real leaves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 9140-9144.
- Rascher, U. & Nedbal, L. (2006). Dynamics of photosynthesis in fluctuating light. *Current Opinion in Plant Biology*, 9, 671-678.
- Reece, S.Y., Hamel, J.A., Sung, K., Jarvi, T.D., Esswein, A.J., Pijpers, J.J.H., Nocera, D.G. (2011). Wireless solar water splitting using silicon-based semiconductors and earth-abundant catalysts. *Science*. doi: 10.1126/science.1209816.
- Thom, A.S. (1968). The exchange of momentum, mass and heat between an artificial leaf and the airflow in a wind-tunnel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 94, 44-55.
- Turner, J. (2008). Oxygen catalysis: the other half of the question. *Nature Materials*, 7, 770-771
- Yachandra, V.K., Sauer, K., Klein, M.P. (1996). Manganese cluster in photosynthesis: where plants oxidize water to dioxygen. *Chemical Reviews*, 96, 2927-2950.

Yamada, Y., Matsuki, N., Ohmori, T., Mametsuka, H., Kondo, M, Matsuda, A., Suzuki, E. (2003). One chip photovoltaic water electrolysis device. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 1167-1169.

Metodi non distruttivi per la diagnosi di beni culturali

Delia Chillura Martino

Dipartimento di Chimica "S. Cannizzaro", Università degli Studi di Palermo
Viale delle Scienze, P.co d'Orleans II, Pad. 17, 90128 Palermo

E-mail: delia.chilluramartino@unipa.it

Abstract. La conoscenza dei materiali, in termini di composizione, di morfologia e di struttura, costituenti manufatti di varia natura è, oggi, di grande importanza in vari settori scientifici e tecnologici. La comprensione dei processi che possiamo, genericamente, raggruppare secondo la definizione "interazione radiazione-materia" ha portato allo sviluppo di una serie di tecniche di caratterizzazione spettroscopica e strutturale della materia che trovano applicazione nello studio di materiali dai più nuovi e innovativi a quelli archeologici. Negli ultimi decenni, l'approfondimento delle problematiche legate alla comprensione dei processi di sviluppo delle conoscenze ha promosso un connubio sempre più stretto tra gli studi archeologici e quelli scientifici. Gli studi interdisciplinari si sono sviluppati così tanto da coniare il termine archeometria per descriverli. In questo contributo, viene introdotta la spettrofotometria di emissione di fluorescenza. Nell'ambito delle sue applicazioni, viene proposta una panoramica di specifici casi studio in ambito archeometrico. In particolare, sono presentati i risultati ottenuti da ceramiche tricromiche neolitiche siciliane e da intonaci dipinti dalla Catacomba di Villagrazia di Carini. Viene discusso come l'utilizzo sinergico di tale tecnica spettroscopica e di tecniche di indagine strutturale e morfologica quali la diffrazione di raggi-X e le microscopie ottica e elettronica contribuisca a meglio definire il livello di conoscenza su tali reperti. Le informazioni ottenute sono di ausilio all'archeologo al fine di stabilire il livello di tecnologia acquisito da popolazioni antiche.

1. Introduzione

L'archeometria, secondo la definizione a cura di Emanuela Sibilia[1] *"si occupa dello studio scientifico dei materiali di cui il patrimonio artistico è costituito e dei contesti naturali in cui i beni sono stati ritrovati nel tempo. ... Ampliandosi rispetto al primario legame con l'Archeologia, da cui il termine ha avuto origine, l'Archeometria comprende oggi le discipline, le tecniche ed i metodi atti ad estrarre dai reperti, dai manufatti e dai contesti molte informazioni necessarie per gli storici, per i conservatori, per i restauratori, per una più completa lettura storica dell'oggetto e del monumento, per migliorarne la conservazione, per progettare il restauro."*

Sebbene tale definizione sia, apparentemente, lontana dagli interessi e dagli obiettivi della gente comune, lo sviluppo di musei di arte moderna e contemporanea, dell'archeologia industriale, dei musei etnografici ha notevolmente avvicinato il pubblico a problematiche specifiche nell'ambito dei Beni Culturali, quali, ad esempio, cosa rappresentava l'arte in tempi antichi, come venivano realizzati i manufatti, come venivano scambiati tra i popoli, quando, dove e come sono apparse, sviluppate e scomparse delle tecnologie.

Per l'esame, la caratterizzazione e l'analisi di manufatti di interesse nei Beni Culturali e dei loro materiali costituenti, è necessaria l'accessibilità a una serie di tecniche non-distruttive e non-invasive. Questo consente di poter ripetere le analisi nel tempo ai fini, non soltanto della comprensione della manifattura dell'oggetto, ma della sua evoluzione e/o degrado. Tale comprensione fornisce una base razionale per il restauro, la conservazione e la fruizione del bene.

I materiali di interesse nei Beni Culturali sono i più svariati, dalle rocce, gemme, ceramiche, terrecotte, smalti, vetri, legno, carta, tessuti, ossa, metalli, etc., fino materiali sintetici prodotti negli ultimi due secoli.

All'enorme varietà dei materiali si aggiunge la composizione dei manufatti spesso complicata e indeterminata o almeno incerta. Di conseguenza è, generalmente, utile combinare i risultati ottenuti mediante varie tecniche analitiche per ottenere informazioni pertinenti. Inoltre, data l'unicità e/o la rarità dei reperti, è necessario che le tecniche siano ben consolidate e prevedano l'utilizzo di metodi non-distruttivi e non-di-contatto evitando il campionamento.

In questo contesto, la spettrofotometria di fluorescenza a raggi-X (XRF) è una tecnica elementare, non consente la determinazione della composizione in termini di composti, che viene largamente applicata grazie alla semplicità di utilizzo e di interpretazione dei risultati, alla rapidità di acquisizione, affidabilità e riproducibilità del metodo. Inoltre, lo sviluppo di moderna strumentazione ne permette l'uso non-invasivo e non-distruttivo. Tuttavia, le informazioni quantitative sono difficili da acquisire a causa dei limiti intrinseci e/o strumentali nella determinazione degli elementi a più basso numero atomico e dall'effetto matrice.

In questo contributo vengono illustrati i principi teorici alla base della tecnica XRF e presentate alcune applicazioni in campo archeologico. In particolare, sono presentati alcuni risultati ottenuti da ceramiche tri-cromiche neolitiche siciliane e da intonaci dipinti dalla Catacomba di Villagrazia di Carini evidenziando come la combinazione di tecniche complementari, composizionali, strutturali e morfologiche contribuisca a meglio definire il livello di tecnologia acquisito da popolazioni in vari contesti storici.

2. La fluorescenza a raggi-X: principi teorici.

La spettrofotometria XRF è una tecnica non distruttiva in grado di fornire informazioni sulla composizione elementare dei materiali. Essa viene applicata allo studio di materiali sotto forma di solidi, polveri, liquidi, film sottili e permette di determinare simultaneamente gli elementi presenti in un campione in un intervallo di concentrazione che va da qualche parte per milione (ppm) fino a vari percento.

L'analisi XRF consiste semplicemente nell'irradiazione di un campione con elettroni, raggi X o raggi γ e nel rivelare la radiazione secondaria emessa dal campione.[2]

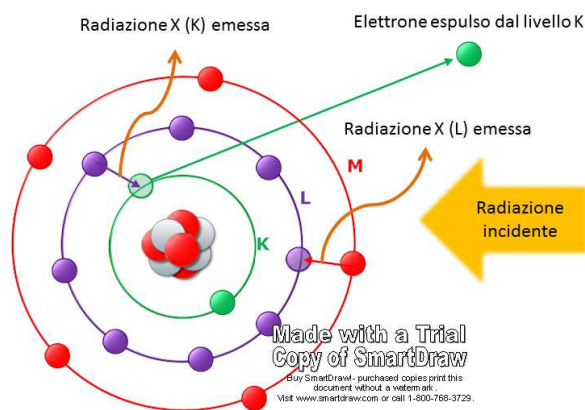


Figura 1. Rappresentazione schematica del processo di emissione di fluorescenza X

La radiazione incidente, di energia appropriata, causa l'espulsione di un elettrone da un livello energetico interno (effetto fotoelettrico) causando la formazione di uno ione eccitato. La successiva redistribuzione degli elettroni genera la formazione di uno ione a più bassa energia. Durante questo processo, schematicamente rappresentato in figura 1, l'atomo emette radiazione X con un'energia pari alla differenza tra le energie dei livelli energetici coinvolti, *radiazione caratteristica*. Questa differenza è caratteristica dell'atomo coinvolto nel processo in conseguenza dell'aumento progressivo delle differenze di energia tra i livelli con il numero atomico. In funzione dell'elettrone di *core* coinvolto nel processo e dell'elettrone che decade nel livello dove

è stata generata la lacuna, si producono serie di righe caratteristiche (K, L e M). I processi sono schematicamente rappresentati in figura 2.

Le diverse linee appartenenti ad una serie sono prodotte da transizioni di elettroni che provengono dai diversi orbitali appartenenti allo stesso livello energetico.

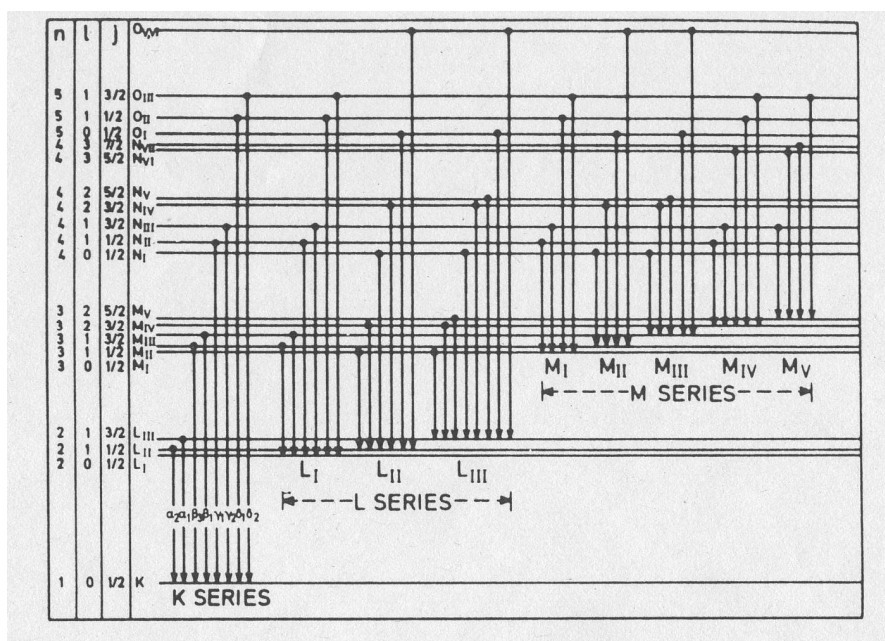


Figura 2: Diagramma parziale dei livelli energetici raffigurante le transizioni che originano la radiazione X.

È importante sottolineare che per tutti gli elementi, eccetto i più leggeri, le lunghezze d'onda delle righe X caratteristiche sono indipendenti dallo stato chimico e fisico dell'elemento dato che le transizioni responsabili di queste righe coinvolgono elettroni che non prendono parte ai legami. Così, ad esempio, la posizione delle righe K α per il molibdeno è la stessa indipendentemente dal fatto che il bersaglio sia il metallo puro, il suo ossido o il suo solfuro.[3]

Lo spettro di emissione è, quindi, costituito (almeno in teoria) da tante serie di linee quanti sono gli elementi costituenti il campione. Il primo elemento che dà emissione di fluorescenza è il Li, anche se gli elementi più leggeri hanno bassa probabilità di emissione di fluorescenza e spesso non sono rivelati.

Lo spettro a linee è sovrapposto a uno spettro continuo (Bremsstrahlung) causato dalla decelerazione degli elettroni in un campo di forze generato dagli atomi costituenti il campione.

Il campione diffonde anche la radiazione incidente coerentemente, quando esiste una relazione di fase tra la radiazione incidente e quella diffusa, e incoerentemente, quando non esiste alcuna relazione di fase tra la radiazione incidente e diffusa, generando anche linee dovute alla diffusione Rayleigh (coerente) e Compton (diffusione anelastica) causando nello spettro anche la comparsa di tali contributi.

L'intensità di ciascuna linea di fluorescenza è proporzionale, entro certi limiti, alla concentrazione dell'elemento. Infatti, è necessario tenere in considerazione l'efficienza dell'emissione di fluorescenza e l'effetto matrice. Questi fattori complicano l'elaborazione degli spettri ai fini di determinazioni quantitative.

3. La fluorescenza a raggi-X: applicazioni a materiali di interesse nei Beni Culturali.

La tecnica XRF, come detto in precedenza, permette di determinare la composizione elementare di una varietà di materiali.

I due casi studio, di seguito riportati, nascono da collaborazioni con il Dott. Massimo Cultraro, archeologo dell'Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali del CNR di Catania e con la Prof. Rosa Maria Bonacasa Carra, del Dipartimento di Beni Archeologici dell'Università di Palermo.

3.1 Indagine composizionale sui pigmenti di ceramica policroma preistorica siciliana.

Le ceramiche, tra i materiali di interesse nei Beni Culturali, suscitano particolare interesse perché, in conseguenza della loro elevata inerzia chimica, si preservano in buone condizioni per lunghi periodi di tempo. E' infatti lo studio delle ceramiche che ha contribuito a stabilire livelli tecnologici acquisiti da popolazioni antiche, di ipotizzare vie di scambio sia dei materiali grezzi sia dei manufatti, e di conoscere usi e costumi di popolazioni per le quali sono carenti o assenti fonti documentali.

La collocazione temporale di svariati frammenti ceramici provenienti dall'area del Mediterraneo Orientale è relativamente recente, infatti è grazie agli studi di Bernabò-Brea (1961) condotti a Lipari che è stato possibile ricostruire una sicura e precisa griglia diacronica correlabile con le principali manifestazioni pre- e proto-storiche del bacino del Mediterraneo.[4]

Gli archeologi hanno proposto vari modelli che tengono in considerazione sia la diffusione delle conoscenze dall'Oriente verso l'Occidente sia le peculiarità locali. Le più antiche testimonianze di insediamenti neolitici sono quelle dell'area sudorientale della penisola, caratterizzate dalla cultura della Ceramica Impressa (prima metà del VI millennio). In Sicilia le testimonianze di questo periodo sono riconducibili alla ceramica impressa denominata Kronio (dal monte omonimo). Il diffondersi della ceramica dipinta a partire dal Neolitico Medio ha determinato la formazione di diversi stili decorativi i quali, a causa di incomplete sequenze stratigrafiche, non sempre possono essere classificati all'interno di una sequenza diacronica [5].

Sebbene le conoscenze relative ai materiali e alle tecnologie utilizzate per la produzione dei manufatti ceramici siano ben consolidate[6], ad oggi, le informazioni relative alla composizione degli strati dipinti sono assolutamente carenti. In questo contesto si inserisce la caratterizzazione di alcuni frammenti dipinti di ceramiche neolitiche provenienti dall'area Orientale della Sicilia.

I campioni provengono da raccolte di superficie: - nell'area dell'insediamento di località Fogliuta, a circa 1 Km ad Est della moderna cittadina di Adrano, sulle falde occidentali dell'Etna; - nel villaggio localizzato in località Muglia lungo il corso del fiume Gornalunga (territorio di Catenanuova, Enna); - nel sito di Trefontane, presso Paternò (Catania). I campioni sono collocabili in un periodo che va dal 5500 al 4500 a.C.

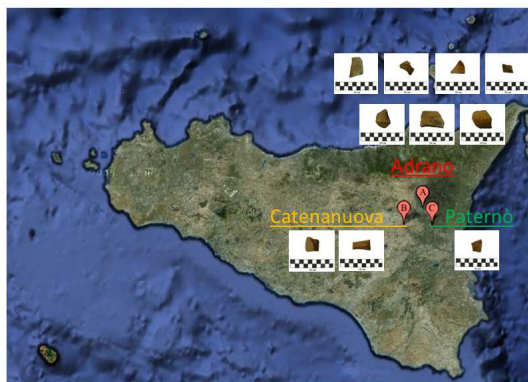


Figura 3: Inquadramento topografico dei siti da cui provengono i campioni analizzati

I frammenti presentano sulla superficie esterna decori realizzati con pigmenti in varie tonalità di ocre, rosso e nero. Gli spettri XRF acquisiti sulle aree di diverso colore, in maniera non distruttiva e senza alcuna preliminare preparazione del campione, hanno evidenziato la presenza di Si, Ca, Mn, Fe e Sr. La presenza di Si e Ca è da attribuire alla matrice ceramica o eventualmente alla presenza di depositi alluvionali. La presenza di Sr si accompagna spesso al Ca. La presenza di Fe e Mn è da attribuire allo specifico pigmento utilizzato. Dal rapporto tra le intensità delle linee di fluorescenza di tali elementi è emerso che nella maggior parte dei casi la scelta del vasaio si è orientata verso l'utilizzo di minerali quali l'ematite e ossidi di manganese per ragioni stilistico-decorative. Solo in due casi è emerso l'uso di pigmenti neri di origine vegetale. Questo, assieme alla collocazione topologica e archeologica, suggerisce che i due frammenti siano provenienti da oggetti di importazione.

3.2 Caratterizzazione di intonaci dipinti della Catacomba di Villagrazia di Carini.

Negli ultimi anni un particolare interesse archeologico ed artistico è stato riscontrato nello studio degli intonaci e delle pitture murali provenienti non solo dalle domus ma anche dalle altre tipologie di complessi monumentali di età romana. Fino a questo momento ben poco è presente in letteratura riguardo ai materiali e alle tecniche impiegate per ottenere gli intonaci. Informazioni su tali aspetti possono contribuire ad affinare le conoscenze relative alle metodiche di produzione e a scoprire il segreto della loro durata straordinaria.[7-11]. In questo contesto si inserisce lo studio condotto su alcuni frammenti di intonaco provenienti dalla Catacomba di Villagrazia di Carini (PA) con lo scopo di acquisire informazioni sulla composizione dei materiali e sulle metodiche di produzione nell'ottica di ampliare le conoscenze necessarie a completare il quadro etno-antropologico e fornire informazioni utili riguardo le metodiche di intervento conservativo. La scelta di studiare gli intonaci deriva dal fatto che tale tipologia di materiale, a differenza degli altri reperti riportati alla luce nella catacomba, essendo a diretto contatto con l'ambiente, costituisce sicuramente un indicatore sensibile e attendibile delle condizioni climatiche e eventualmente della tipologia e dei meccanismi di degrado in atto.

Il complesso catacombale di Villagrazia di Carini sorge in un vasto territorio che negli ultimi decenni ha subito numerosi sconvolgimenti edilizi. Esso si estende per circa 4 Km andando dalla costa verso l'interno e, grazie alla sua posizione geografica interessante, nell'antichità è stato al centro di numerose dinamiche di popolamento. La convergenza fra i dati archeologici e le fonti itinerarie unite alla persistenza della rete viaria sia interna che costiera indicano la presenza e lo sviluppo in questa piana di un nucleo tardo romano, bizantino e medievale che precede la fondazione normanna. Per una completa descrizione della topografia dell'area catacombale, dei risultati delle campagne di scavo e della storia del sito si rimanda alla letteratura specifica.[12-15]

Dalla campagna di scavi condotta nel 2006 sono stati riportati alla luce due arcosoli per bambini (X.10.9 e X.10.A4) situati nello stesso cubicolo (X. 10) e ritenuti interessanti per i motivi stilistici e iconografici dei dipinti presenti sulle loro pareti.[16, 17] I dipinti murali presenti nei due arcosoli si collocano in un intervallo temporale che va dalla seconda metà del IV secolo agli inizi del V e l'iconografia rappresentata nell'arcosolio X. 10 A4 appare precedente rispetto all'altra come dedotto dalla sua posizione nel cubicolo oltre che dalla maggiore ricchezza decorativa di scena.

I frammenti di intonaco, mostrati in figura 4, provenienti dai due arcosoli sono stati studiati utilizzando alcune tecniche tra di loro complementari.

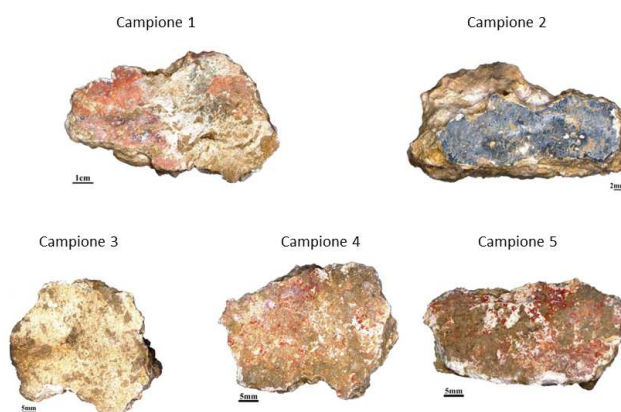


Figura 4: I campioni analizzati: i campioni 1 e 2 provengono dall'arcosolio X.10.9, i campioni 3, 4 e 5 provengono dall'arcosolio X.10.A4.

Lo studio mediante la spettrometria XRF, in maniera non-distruttiva e senza alcuna preliminare preparazione del campione, ha permesso di ricavare informazione sulla presenza di elementi caratteristici

nelle regioni a diverso colore. In particolare, la contemporanea presenza di Fe e Pb nelle zone di colore rosso suggerisce che il pigmento utilizzato in queste aree è una miscela di ematite e minio, la presenza di Fe, Mg e Al nelle zone di colore verde indica la presenza di alluminosilicati. Questo risultato è stato supportato dalle analisi di spettroscopia micro-Raman e di diffrazione di raggi-X che hanno confermato la presenza di glauconite e di celadonite. Più interessante è risultata l'area di colore blu, nella quale è stata riscontrata la presenza di Cu. I risultati delle analisi di spettroscopia micro-Raman e di diffrazione di raggi-X evidenziano, in questo caso, la presenza di quarzo e calcite indicando che il pigmento utilizzato è un pigmento di sintesi: il blu egizio. Le aree di colore bianco sono caratterizzate dall'esclusiva presenza di calcite.

4. Conclusioni.

L'utilizzo della spettrometria di fluorescenza X, così come di tutte le tecniche spettroscopiche, è in costante aumento per svariati tipi di analisi, composizionali e strutturali. Lo sviluppo di nuova strumentazione, anche portatile, ne consente l'utilizzo sia in-situ che ex-situ su svariate tipologie di materiali anche in maniera non-distruttiva.

In campo archeometrico le applicazioni delle tecniche spettroscopiche consentono di ricavare informazioni indispensabili per una corretta collocazione archeologica, per stabilire l'autenticità dei reperti e per progettare e realizzare correttamente protocolli di intervento conservativo o di restauro in grado di prolungare la fruibilità del bene.

In questo contributo sono stati riportati alcuni risultati ottenuti dall'analisi di pigmenti da ceramiche tri-cromiche neolitiche e da frammenti di intonaco provenienti dalla Catacomba di Villagrazia di Carini. I risultati hanno messo in evidenza l'utilizzo di minerali del Mn per l'ottenimento del colore bruno-nero nelle ceramiche neolitiche. Questa costituisce una prima evidenza dell'acquisizione di un livello tecnologico avanzato da parte di popolazioni di quel periodo. Tale tecnologia, tuttavia, non sembra essere comune a tutte le maestranze artigianali della Sicilia neolitica, permettendo di avanzare l'ipotesi che fosse un presidio di popolazioni locali.

I pigmenti riscontrati nei frammenti di intonaco della catacomba di Villagrazia di Carini hanno evidenziato l'uso di materiali diversi per l'ottenimento di tonalità e di sfumature particolari che contribuiscono al pregio estetico dei dipinti. La conoscenza della composizione dei pigmenti si rivela particolarmente importante per la definizione di corretti protocolli di intervento sul Bene in esame.

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento è dovuto al Dott. Massimo Cultraro dell'Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali del CNR di Catania per le preziose lezioni sull'archeologia preistorica.

Grazie alla Prof. Rosa Maria Bonacasa Carra, del Dipartimento di Beni Archeologici dell'Università di Palermo, che con grande pazienza ed entusiasmo mi ha introdotto agli aspetti topografici, storici e archeologici della Catacomba di Villagrazia di Carini.

Un doveroso ringraziamento anche alla Dott.ssa Barbara Mazzei, restauratrice della Pontificia Commissione di Archeologia Sacra. Le discussioni estive nella fresca penombra della catacomba sono state preziose. Senza il contributo critico dei colleghi il lavoro, qui parzialmente riportato, non sarebbe stato possibile.

Bibliografia

- [1] <http://www.associazioneaiar.it/archeometria.pdf>
- [2] Cesareo, R. (1988) Photon Induced X-ray Emission. In R. Cesareo (Ed.) *Nuclear Analytical Techniques in Medicine* (pp. 19–121) Amsterdam: Elsevier.
- [3] Skoog, A. D., Leary, J. J. (2000) *Chimica analitica strumentale* Napoli: EDISES (pp.518-519)
- [4] Bernabò Brea, L. (1961) *La Sicilia prima dei Greci* Milano: Il Saggiatore.
- [5] Tusa, S. (1999) *La Sicilia nella Preistoria* Palermo: Sellerio.

- [6] Vidale, M. (2007) *Ceramica e Archeologia* Roma: Carocci - Le Bussole.
- [7] Augusti, S. (1998) *I colori Pompeiani* Roma: De Luca.
- [8] Barbet, A. (1998) *Romana Pictura* Milano: Electa.
- [9] Fagnano, C., Tinti, A., Taddei, P., Baraldi, P. (2003) In *Ricordo di A. Bertoluzza* Bologna: Clueb. (p. 125)
- [10] Mazzocchin, G. A., Agnoli, F., Salvadori, M. Colpo, I. (2003) Analysis of pigments from Roman wall paintings found in Vicenza. *Talanta*, 61, 565-572.
- [11] Pavià, S., Caro, S. (2008) An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. *Construction and Building Materials*, 22, 1807–1811.
- [12] Carra Bonacasa, R.M. (2003) La catacomba di Villagrazia di Carini: una scoperta recente. *Scavi e Restauri* (p. 33).
- [13] Giuffrida, A. (1789) La produzione dello zucchero in un opificio della piana di Carini nella seconda metà del sec. XV. *Quaderni del circolo Semiologico Siciliano*, 12-13, 141-155.
- [14] Carra, R.M. (2006) La catacomba di Villagrazia di Carini e il problema della ecclesia carinensis. I risultati delle recenti esplorazioni. *Scavi e Restauri* (pp 5-11).
- [15] Vitale, E. (2006) La catacomba di Villagrazia di Carini e il problema della ecclesia. I risultati delle recenti esplorazioni. *Scavi e restauri* (pp 24-35).
- [16] Carra Bonacasa, R.M. (2006) L'adozione dei Magi in due arcosoli della catacomba di Villagrazia di Carini. *Rivista di Archeologia Cristiana*, 82, 55-74.
- [17] Carra, R.M. (2008) La catacomba di Villagrazia di Carini. Un esempio di architettura funeraria paleocristiana in Sicilia.

Lavori di gruppo - 1

Anna Caronia	Docente di Chimica ITG "F: Parlatore" - Palermo
Angela Damiani	Docente di Laboratorio di Tecnica Microbiologia IIS "Orfini" – Foligno (PG)
Teresa D'Andrea	Docente di Fisica Istituto Tecnico Economico Statale "A.M.Jaci" – Messina
Roberta Maniaci	Docente di Chimica ITG "F: Parlatore" - Palermo
Patrizia Puri	Docente di Scienze - Microbiologia IIS "Orfini" – Foligno (PG)
Antonio Rindone	Docente di Scienze Naturali Liceo Scientifico Statale "Archimede" - Messina
Adele Rosalba Ruggeri	Docente di Scienze Matematiche, Chimiche, Fisiche e Naturali I.C. di Roccalumera – Roccalumera (ME)
Emanuela Tringali	Docente di Matematica e Fisica ISS "P.L. Nervi" Lentini (SR)

Finalità del lavoro di gruppo è stata identificare un argomento, normalmente inserito nella programmazione didattica delle singole discipline, per un breve percorso interdisciplinare stimolato dalle relazioni ascoltate durante il seminario

"M'ILLUMINO DI SCIENZA"

Discipline coinvolte: Biologia – Chimica – Fisica – Scienze della Terra

Classi interessate: biennio della Scuola Secondaria di Secondo Grado

DISCIPLINE	MODULO	ARGOMENTO
Biologia	Riproduzione	Bioluminescenza nelle relazioni tra organismi
Chimica	Dai saggi alla fiamma alla bioluminescenza	Fluorescenza e Luminescenza
Fisica	Onde Elettromagnetiche	Dualismo onda/particella Eccitazione dell'atomo
Scienze della Terra	Atmosfera	Interazione Luce/Materia Colore del cielo, arcobaleno, aurora boreale

Attività di laboratorio.

Scelta del materiale: povero e facilmente reperibile

- Lavagna luminosa
- Detersivo

- Zucchero
- Acqua tonica
- Carta crespata di vari colori
- Cd-rom
- Rotolo di cartone lampada di Wood (UV)

Si propone una attività coinvolgente a partire dalla visione di un noto cartone animato, Nemo, dove viene rappresentato un pesce predatore degli abissi che usa la bioluminescenza per attirare le prede; partendo dal cartone animato si mette in evidenza la reale esistenza di queste specie animali, della loro caratteristica biologica e dei differenti usi della stessa. Si evidenziano i territori dove sono diffuse tali specie. Si pone il quesito della luce e si cerca di arrivare insieme ad una definizione scientifica. Si effettuano poi esperienze con la calceina, albumina e altre sostanze fluorescenti osservando come i cambiamenti strutturali, ad esempio il legame con un chelante, modificano le caratteristiche chimiche delle sostanze. Si evidenzia la differenza di comportamento tra l'eccitazione a livello atomico e a livello molecolare, differenza saggi alla fiamma ed esperienza di fluorescenza- salto energetico tra orbitali atomici e molecolari.

Competenze:

- Saper leggere ed interpretare la realtà superando settorialità e specificità disciplinari;
- Applicare tale competenza in contesti diversi da quelli in cui è stata acquisita.

Lavori di gruppo - 2

Teresa Cipriano	Docente di Scienze Naturali Liceo Tecnologico "Vaccharini" - Catania
Luciana Coniglione	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico Statale "E. Boggio Lera" - Catania
Francesca Margarone	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Classico "M. Cutelli" - Catania
Concetta Morreale	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico Statale "E. Boggio Lera" - Catania
Mariella Nicastro	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico Statale "E. Boggio Lera" - Catania
Angelo Rapisarda	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico Statale "E. Boggio Lera" - Catania
Grazia Rosano M.	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Classico "M. Cutelli" Catania
Raffaella Torrisi	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico Statale "E. Boggio Lera" - Catania

Il tema scelto è "Nuove frontiere della fotosintesi clorofilliana: la foglia artificiale".

Titolo dell'unità: "Vecchio processo per nuova energia"

Questa unità viene svolta nelle classi del liceo, tra il terzo e il quarto anno, e si presta ad un lavoro interdisciplinare tra chimica, fisica e biologia. Nelle classi interessate dalla riforma Gelmini, dovrebbe essere affrontato al quinto anno dove è previsto lo studio della biochimica.

Il percorso didattico prevede l'accertamento dei prerequisiti:

- 1) la cellula vegetale
- 2) spettro elettromagnetico
- 3) reazioni redox; reazioni endo-esoergoniche;
- 4) coenzimi.

Gli argomenti da approfondire prevedono una prima parte dove viene trattato il tema della fotosintesi naturale e una seconda dove si dà spazio all'innovativo processo per ottenere nuova energia tramite la foglia artificiale; il tutto in collaborazione con il docente di fisica per introdurre le nanotecnologie collegate con lo studio delle celle fotovoltaiche.

I contenuti:

- 1) fotosintesi con particolare attenzione alla struttura dei foto sistemi;
- 2) confronto tra fotosintesi naturale ed artificiale svolta dalla foglia artificiale;
- 3) celle fotovoltaiche.

Le attività:

- 1) produzione di O₂ dall'elodea;
- 2) valutazione della biomassa a partire dal seme;
- 3) costruzione di una foglia artificiale.

Le competenze:

- 1) sviluppare uno spirito critico;
- 2) far comprendere come lo studio dei processi naturali possa essere preso a modello per lo sviluppo di nuove tecnologie

Lavori di gruppo - 3

Giuseppina Bartolone	Docente di Scienze Matematiche, Chimiche, Fisiche e Naturali S.M.S. "C. Scianna" – Bagheria (PA)
Maria Grazia Carollo	Docente di Scienze Naturali ITC "Sturzo"- Bagheria (PA)
Maria Concetta Consentino	Docente di Scienze Naturali ITG "F. Parlatore" - Palermo
Emanuela Fenizia	Docente a tempo determinato di Scienze Naturali - Catania
Concetta Ignoti	Docente a tempo determinato Scienze Agrarie - Palermo
Salvatore Stira	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico "B. Croce"- Palermo
Francesca Vaccina	Docente a tempo determinato I.P.S.S.A."G. Salvemini" - Palermo
Concetta Giuseppina Zimbilli	Docente di Scienze Matematiche, Chimiche, Fisiche e Naturali I.C. "Padre Pio da Pietralcina" - Misterbianco (CT)

Scelta del tema:

"L'uomo a lezione dalla natura: fotosintesi naturale ed artificiale"

Discussione generale: verifica dei requisiti di specificità e coerenza con le tematiche presentate nelle relazioni, dei temi proposti e approvazione del tema selezionato

Il tema prescelto risulta coerente con le tematiche presentate nelle seguenti relazioni:

- a) *M. Venanzi* "Luce e molecole"
- b) *P. Quatrini* "Procarioti dalle mille risorse: nuove scoperte sui metabolismi batterici che utilizzano la luce"
- c) *E. Oddo* "Nuove frontiere della fotosintesi clorofilliana"
- d) *A. Rindone* "Solfobatteri fotosintetici nei laghetti di Ganzirri"

Correlate alla tematica selezionata sono anche le esperienze sperimentali sull'interazione materia-luce proposte dal prof. Venanzi.

Elaborazione del percorso didattico.

Destinatari: studenti delle scuole medie, del biennio degli Istituti Tecnici e Professionali, dei Licei (con percorsi differenziati)

Prerequisiti:

- a) conoscenza e comprensione dei concetti di materia e luce
- b) conoscenza e comprensione dei concetti di atomo e molecola
- c) conoscenza della struttura della cellula vegetale, con particolare riferimento al cloroplasto
- d) conoscenza e comprensione delle reazioni di ossidoriduzione (solo Istituti superiori)

Contenuti:

- 1) Struttura e fisiologia della foglia. Attività sperimentale: osservazione macroscopica e microscopica delle foglie
- 2) Attività sperimentale: estrazione e successiva cromatografia dei pigmenti contenuti nelle foglie verdi, colorate (ad es. radicchio) e in altre parti della pianta (es. carote)
- 3) Analisi dei risultati dell'esperienza sperimentale e discussione guidata sulle clorofille e sui pigmenti accessori (con studio delle strutture molecolari nei Licei) contenuti nelle piante, nelle alghe e nei batteri (cfr. relazione prof.ssa Quatrini)
- 4) Studio sperimentale dell'assorbimento della luce attraverso esperienze simili a quelle realizzate dal prof. Venanzi (studio dell'interazione luce-materia con la lavagna luminosa e materiali facilmente reperibili)
- 5) Equazione generale della fotosintesi
- 6) Fasi della fotosintesi (solo Licei)
- 7) Approfondimento (solo Licei): confronto tra i diversi tipi di fototrofismo (cfr. relazioni prof.ssa Quatrini e prof. Rindone)
- 8) Ruolo ecologico della fotosintesi negli ecosistemi terrestri, lacustri e marini. (cfr. relazioni prof.ssa Quatrini e prof. Rindone). Attività sperimentale: colonna di Vinogradsky
- 9) Approfondimento: la foglia artificiale (cfr. relazione prof. Oddo). Visione dei filmati disponibili su YouTube

Competenze da sviluppare:

- a) applicare le conoscenze acquisite sulla luce e sulla materia nello studio dei processi biologici, con particolare riferimento all'interazione tra fattori abiotici e biotici;
- b) acquisire la consapevolezza del ruolo fondamentale svolto dai microrganismi negli equilibri della biosfera;
- c) ampliare e approfondire il concetto di biodiversità;
- d) comprendere l'importanza ecologica della fotosintesi;
- e) utilizzare le conoscenze sui processi fotosintetici per una piena comprensione delle problematiche ambientali ed energetiche;

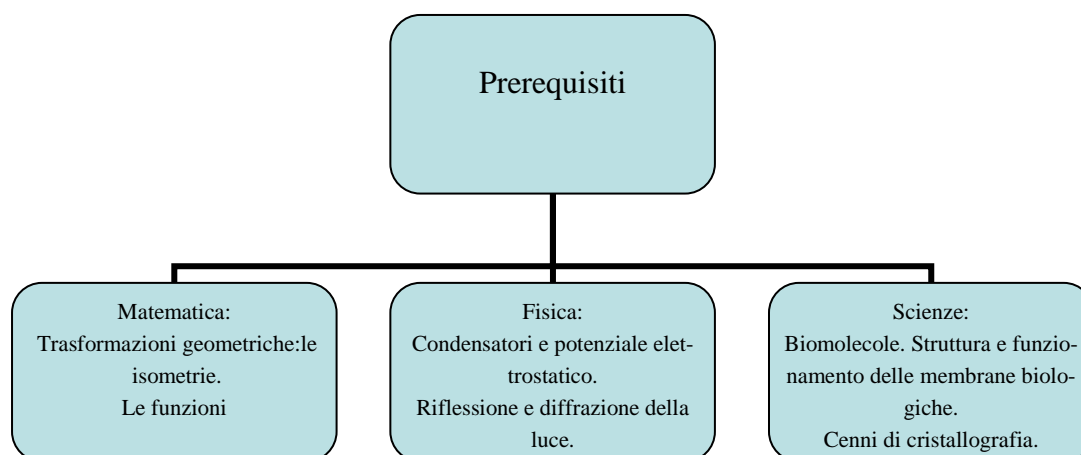
potenziare la cognizione della ricaduta in ambito tecnologico delle conoscenze scientifiche

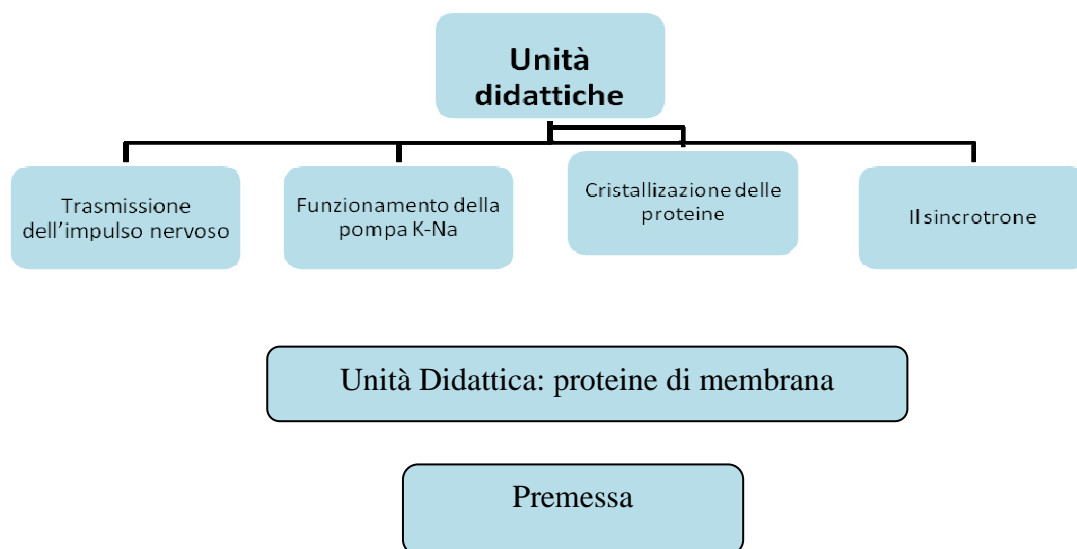
Lavori di gruppo - 4

Maria Agricola	Docente di Scienze Naturali ISS "M. Carnilivari" Noto (SR)
Corrada Floridia	Docente di Scienze Naturali ISS "M. Carnilivari" Noto (SR)
Giuseppina Giallongo	Docente di Scienze Naturali ISS "M. Carnilivari" Noto (SR)
Maria Luisa Di Pietro	Docente di Matematica e Fisica ISS "Matteo Raeli" Noto (SR)
Michelina Rametta	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia ITAS "G. Di Savoia" Noto (SR)
Ignazia Serrentino	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Classico Statale "A. Di Rudini" Noto (SR)

QUESTIONI DI SCELTA

Modulo : Biocristallografia a raggi X





La cristallografia a raggi X è il metodo principale per determinare le conformazioni molecolari delle macromolecole biologiche, particolarmente delle proteine e degli acidi nucleici

La conoscenza della struttura 3D di una macromolecola consente di capire i processi biologici e di eseguire studi funzionali a risoluzione atomica (Å) interazioni fra macromolecole, interazioni fra macromolecole e piccole molecole, studi struttura-funzione su enzimi, sviluppo di farmaci, applicazioni biotecnologiche

Le proteine giocano un ruolo cruciale in tutti i processi biologici :

-reazioni catalitiche: molte proteine sono enzimi che catalizzano le reazioni biochimiche e sono vitali per il metabolismo.

-trasporto molecolare: molte piccole molecole e/o ioni sono trasportati da proteine.

-trasporto attraverso la membrana:alcune proteine (proteine di membrana) formano canali e controllano il passaggio di ioni attraverso le membrane delle cellule.

Le prime strutture proteiche sono state risolte negli anni '50 oggi il numero di strutture cristallografiche proteiche é cresciuto notevolmente e sono disponibili presso il Protein Data Bank

La banca dati delle proteine (Protein Data Bank, o PDB) è un database di strutture di proteine e altre macromolecole biologiche, liberamente accessibile al sito <http://www.rcsb.org>.

La conoscenza dell'esatta forma di una molecola proteica e di ciò che vi si può legare e come essa si può modificare è importante non solo per comprendere la biologia di base, ma anche in cambi alternativi come la medicina.

DESTINATARI:

La presente unità didattica si rivolge a studenti di età compresa tra i 16 (2° Istituto Tecnico) e i 17 anni (4° Liceo Scientifico), che posseggano i prerequisiti idonei. Considerati i diversi livelli di approfondimento, si ritiene che essa possa essere adattabile alle diverse esigenze dettate dai diversi livelli cognitivi degli studenti.

DURATA DELL'INTERVENTO DIDATTICO

A seconda del livello di approfondimento la trattazione dell'argomento necessita dalle 10 alle 15 ore considerando le unità didattiche da sviluppare e il lavoro interdisciplinare.

PREREQUISITI:

I prerequisiti necessari per poter affrontare la trattazione dell'argomento in maniera significativa richiedono conoscenze matematiche, fisiche, chimiche e biologiche. E' inoltre richiesta una valida padronanza del linguaggio scientifico di base.

Finalità	<p>Riconoscere la specificità biologica della funzione di proteina dipende da due proprietà generali della proteina stessa: la sua forma e la chimica dei gruppi esposti in superficie.</p> <p>Acquisire le conoscenze tecnologiche indispensabili per lo sviluppo di molecole biologicamente attive da utilizzare in diagnostica e terapia sperimentale di patologie umane.</p> <p>Acquisire le nuove tecnologie post-genomiche (dall'analisi e modellistica proteica alle tecniche cellulari ed immunologiche) che sono alla base dei nuovi prodotti biotecnologici diagnostici e terapeutici.</p>
Obiettivi	<p>Comprendere come ha origine la complessa struttura tridimensionale di una proteina e la sua importanza in campo medico.</p> <p>Descrivere il modello a mosaico fluido della struttura della membrana plasmatica.</p> <p>Conoscere i meccanismi di trasporto cellulare, le relazioni che si stabiliscono e i meccanismi di traduzione del segnale.</p>

Lavori di gruppo - 5

Gabriella Ansaldo	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico "S. Cannizzaro"- Palermo
Patrizia Gasparro	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico "S. Cannizzaro"- Palermo
Mario Gottuso	Docente di Chimica ITIS "Vittorio Emanuele III" – Palermo
Maria Monte	Docente di Scienze, Chimica, Geografia e Microbiologia Liceo Scientifico "S. Cannizzaro"- Palermo
Giuliano Ottaviano	Docente di Scienze della Terra, Geografia, Biologia Istituto "F. Besta" - Ragusa

Obiettivo del lavoro di gruppo è identificare non più di un argomento, normalmente inserito nella programmazione didattica di chimica, fisica e biologia, che può essere oggetto di un breve percorso didattico (3-4h) prendendo spunto da una delle relazioni fin qui ascoltate.

SPETTROSCOPIA COME "INTERAZIONE TRA MATERIALE E IMMATERIALE"

Discussione generale: verifica dei requisiti di specificità e coerenza con le tematiche presentate nelle relazioni, dei temi proposti e approvazione del tema selezionato

Perché la spettroscopia:

1. È trasversale a chimica, fisica e biologia
2. Sviluppa concetti fondamentali di base: struttura dell'atomo, caratteristiche delle onde elettromagnetiche, natura duale della luce, ecc..
3. Ha molte applicazioni tecnologiche in vari ambiti

Elaborazione del percorso basato sul tema selezionato, evidenziando le attività, gli argomenti e le competenze da sviluppare, da presentare in forma schematica in questa scheda

Percorso da realizzare in una quarta e quinta classe di un liceo scientifico.

Discipline coinvolte: FISICA e SCIENZE NATURALI

Ore previste: circa 8 - 4h fisica e 4h scienze (escluso la visita guidata)

ARGOMENTI E ATTIVITA'

ARTICOLAZIONI DELLE LEZIONI	ATTIVITÀ PREVISTE
1^ ora di lezione Individuazione dei prerequisiti	Concetti base: Struttura atomica - Natura della luce e onde elettromagnetiche
2^ ora di lezione Lezione frontale interattiva	Gli spettri – Come si ottengono gli spettri – La spettroscopia come interazione tra materiale (atomo) e immateriale (luce)
3^ ora di lezione Lezione laboratoriale	Laboratorio: saggi alla fiamma Semplici esercitazioni sulla fluorescenza Attività di ricerca e documentazione (lavori di gruppo)
4^ ora di lezione Lezione interattiva	Lezione in PowerPoint e/o con la LIM sull'applicazioni di tecniche spettroscopiche (fluorescenza di raggi X, diffrazione raggi X per lo studio dei cristalli e delle biomolecole, ecc.) in diversi ambiti, ad esempio nelle biotecnologie, nei beni culturali, in astronomia e nella comprensione dei meccanismi chimici e biochimici.
Attività fuori dalla scuola	Visita guidata, presso università, istituti di ricerca, laboratori per osservare il funzionamento di uno spettrofotometro
VERIFICHE	Prove strutturate e relazioni di laboratorio

COMPETENZE CHE SI INTENDONO RAGGIUNGERE

- Saper fare riferimento a modelli e concetti per spiegare fenomeni relativi all'interazione tra la materia e le radiazioni
- Saper individuare e riflettere sulle principali applicazioni tecnologiche in ambito spettroscopico
- Costruire mappe concettuali, poster scientifico e redigere relazioni sul lavoro svolto per creare un prodotto informatico e/o cartaceo
- **Presentare dati in gruppo, utilizzando le tecnologie per la comunicazione**

VALUTAZIONE

- Prove di valutazione aperte, come discussione e riflessioni in "itinerare"
- Preparazione del materiale, raccolta dati e documentazione
- Esposizione dei risultati del lavoro svolto in una conferenza/mostra conclusiva

Discussione generale dei lavori dei gruppi. Il lavoro elaborato nel pomeriggio sarà presentato da uno dei componenti come da programma.

*Atti della Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze
"Materia & Luce", Catania, 4-8 novembre 2011
Quaderni di Ricerca in Didattica (Science)", n. speciale 3, 2013*

Quaderni di Ricerca in Didattica (Science), Numero speciale 3

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

Editorial Director: Benedetto di Paola - University of Palermo, Italy

ISBN 978-88-907460-1-7

First edition, January 2013