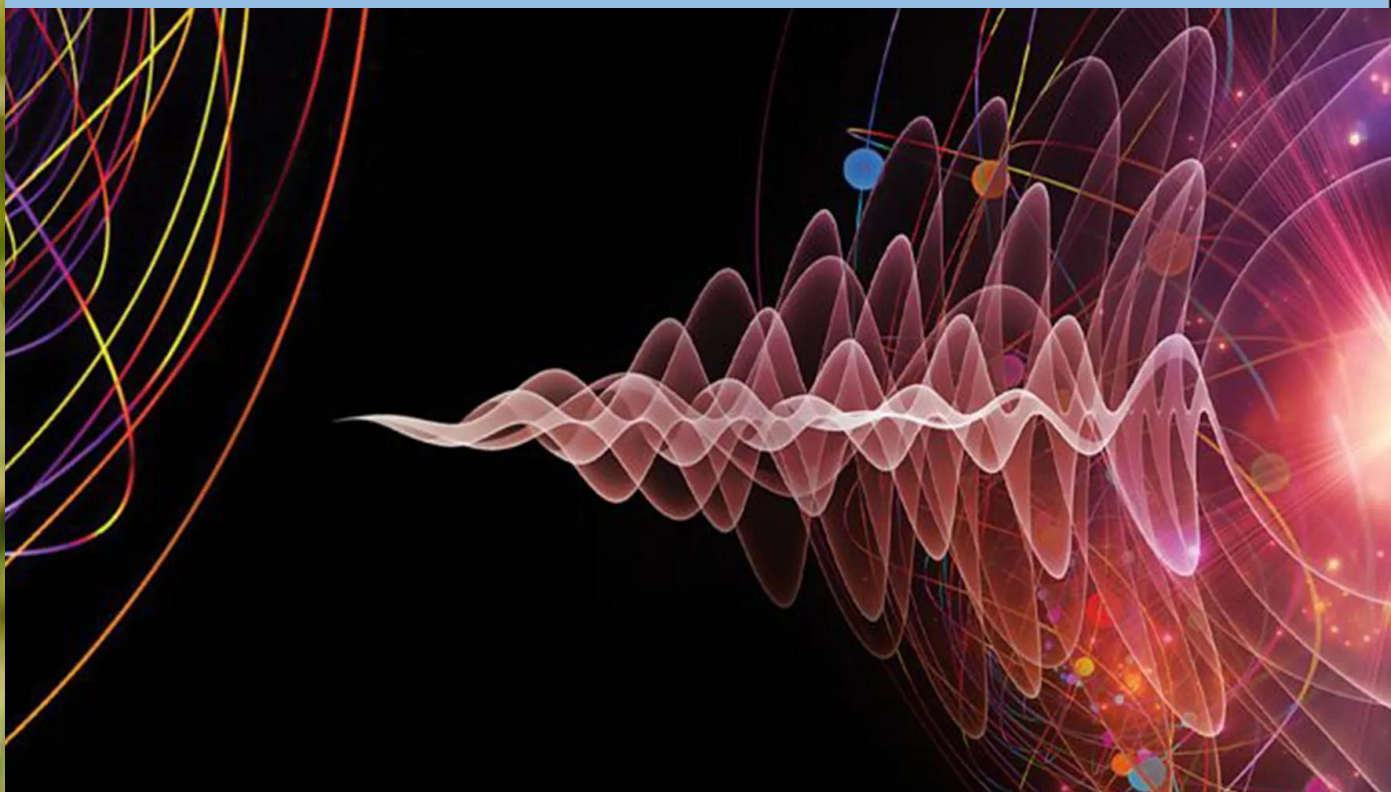
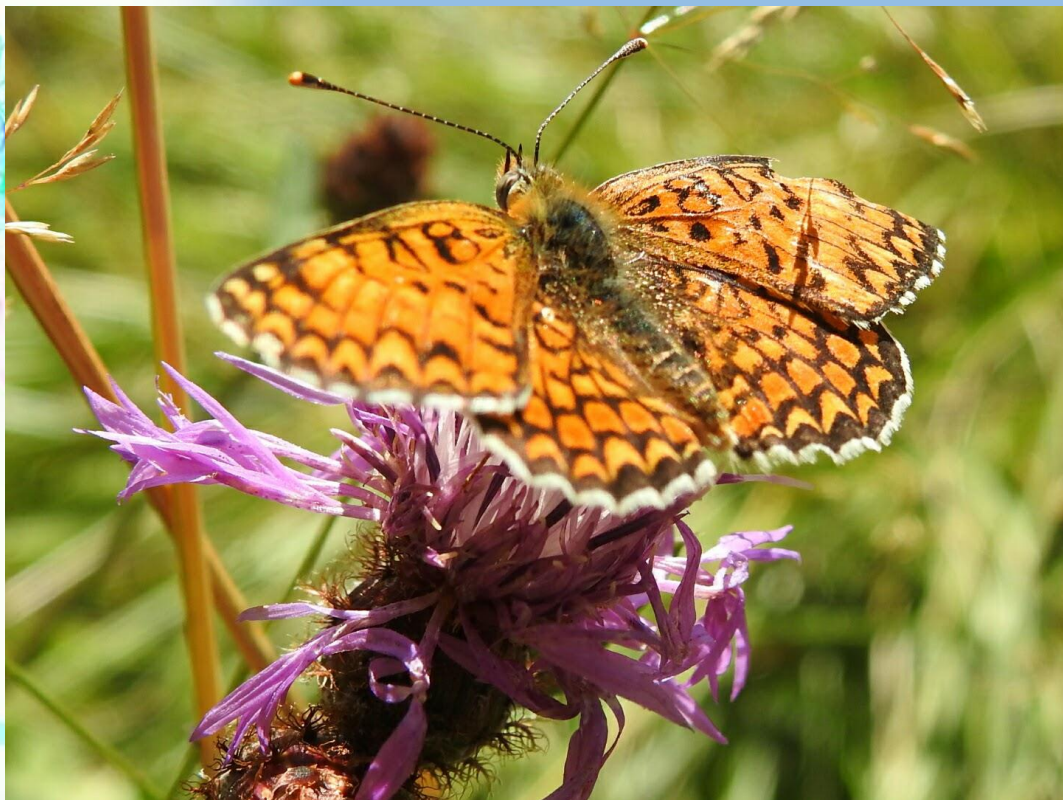




# LA FISICA E IL MISTERO DELLA VITA

Di e con **Oriano Spazzoli** e **Claudio Casali**

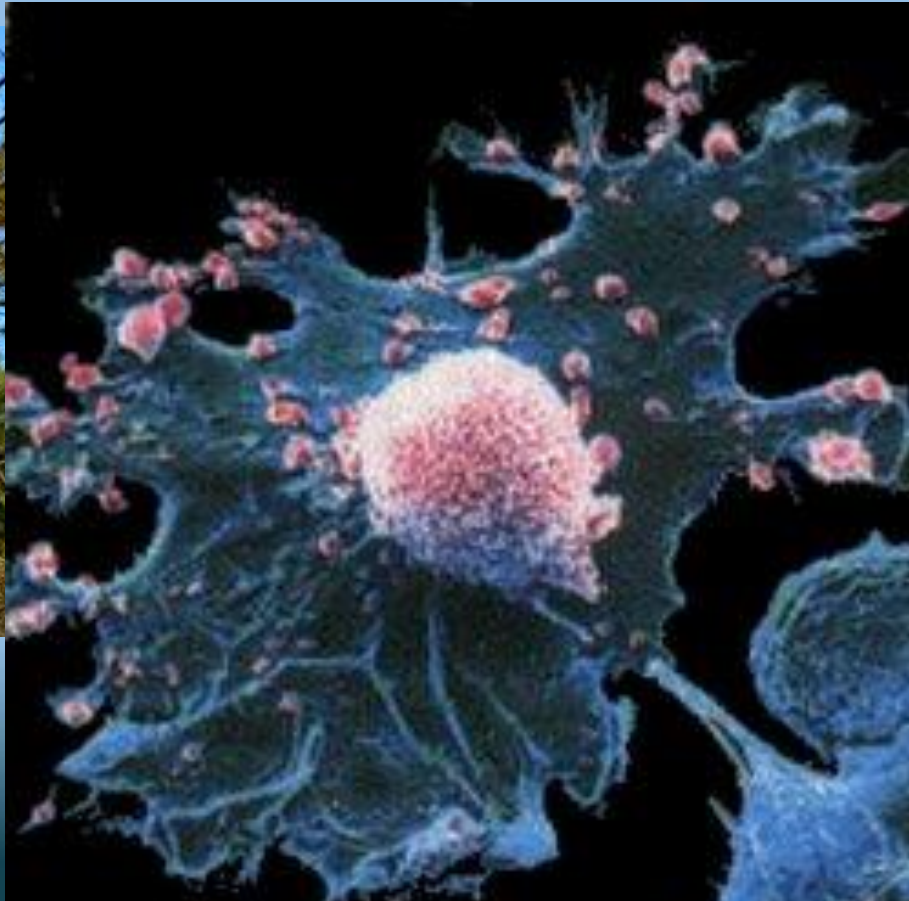
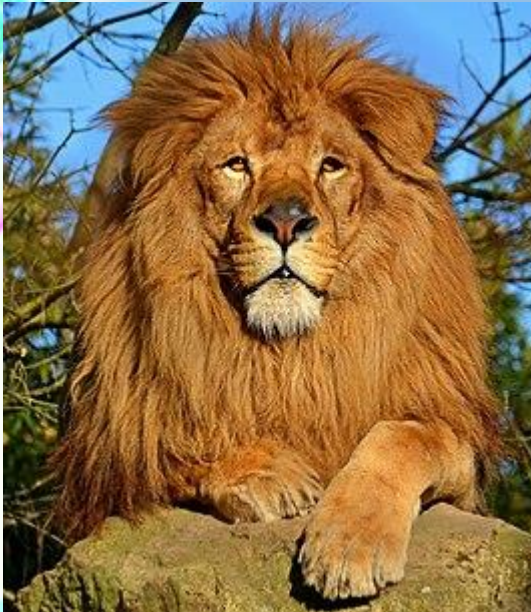


Savignano sul Rubicone 27 luglio 2024



# FISICA QUANTISTICA e BIOLOGIA

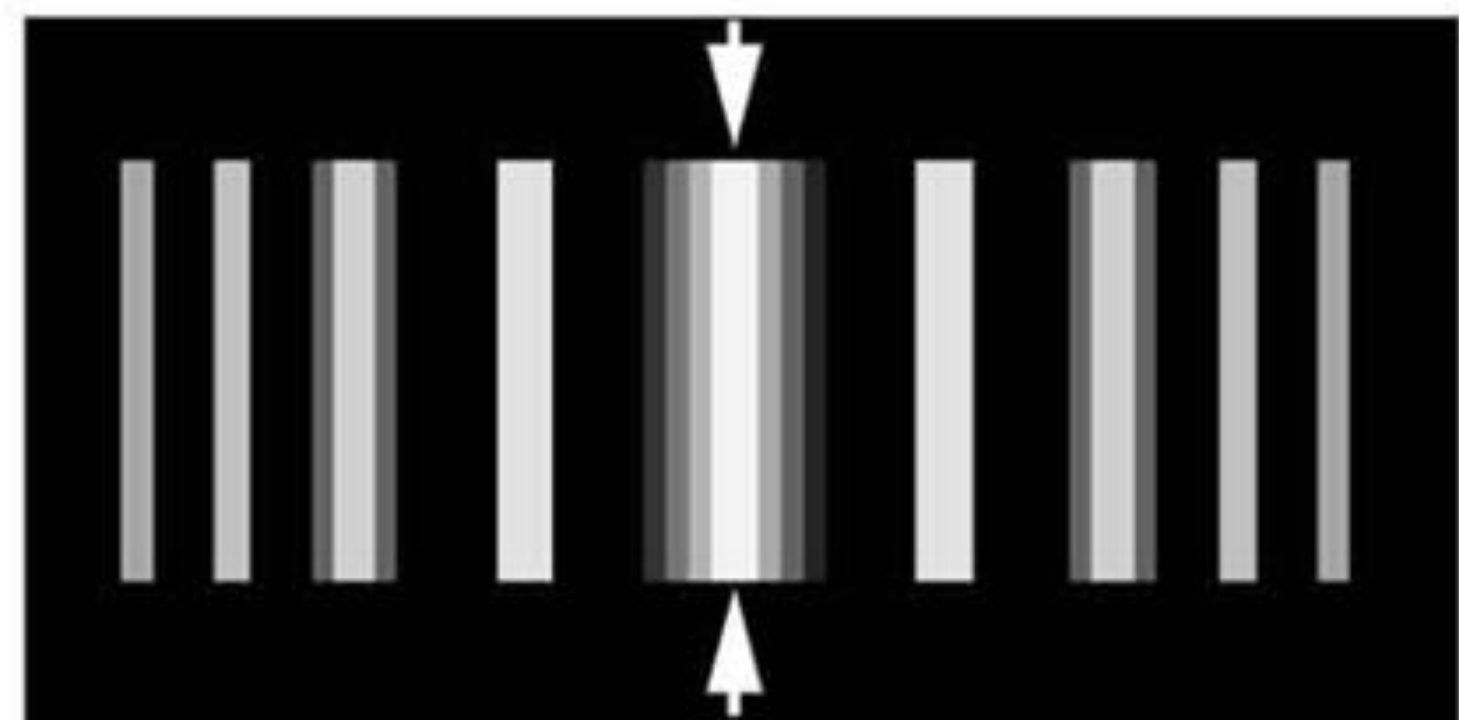
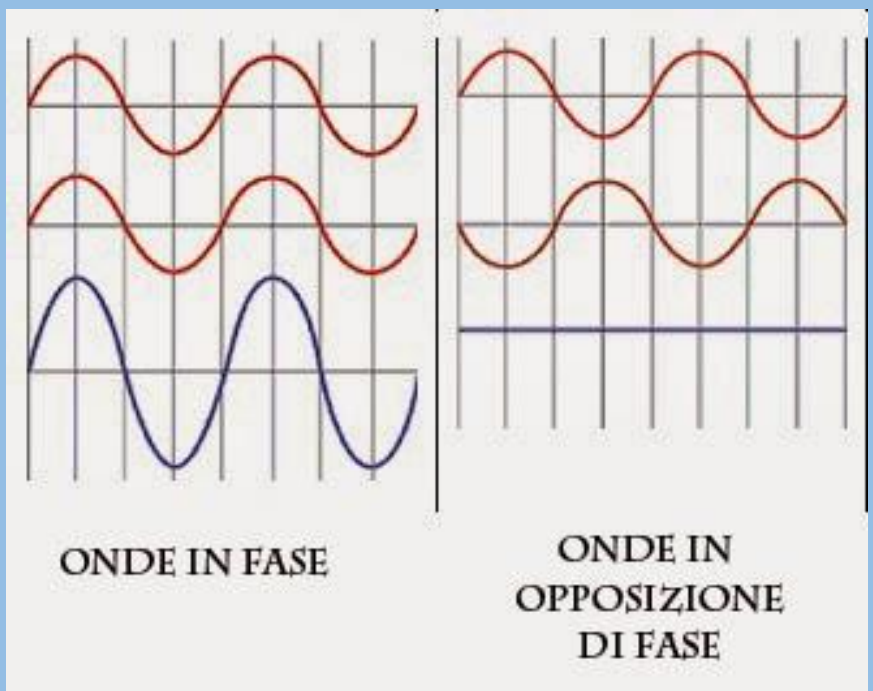
**COS'È LA VITA?**



## Un'idea dell'Idea

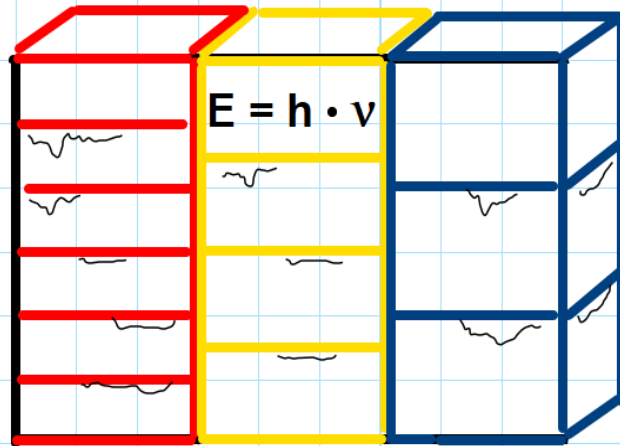


**Mentre alla fine del XIX° secolo la luce elettrica, idea di T. A. Edison comincia ad illuminare il mondo, la Fisica non ha la minima idea di come un filamento incandescente possa emettere luce di colore diverso al variare della sua temperatura (la “catastrofe ultravioletta”).**



# Le basi della Fisica quantistica

La soluzione si chiama "radiazione quantizzata": ogni modo di oscillazione può assorbire e cedere soltanto radiazione in quantità multipla di un valore fondamentale direttamente proporzionale alla frequenza). Nasce la "Legge di Planck" (dicembre 1900).



$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$$

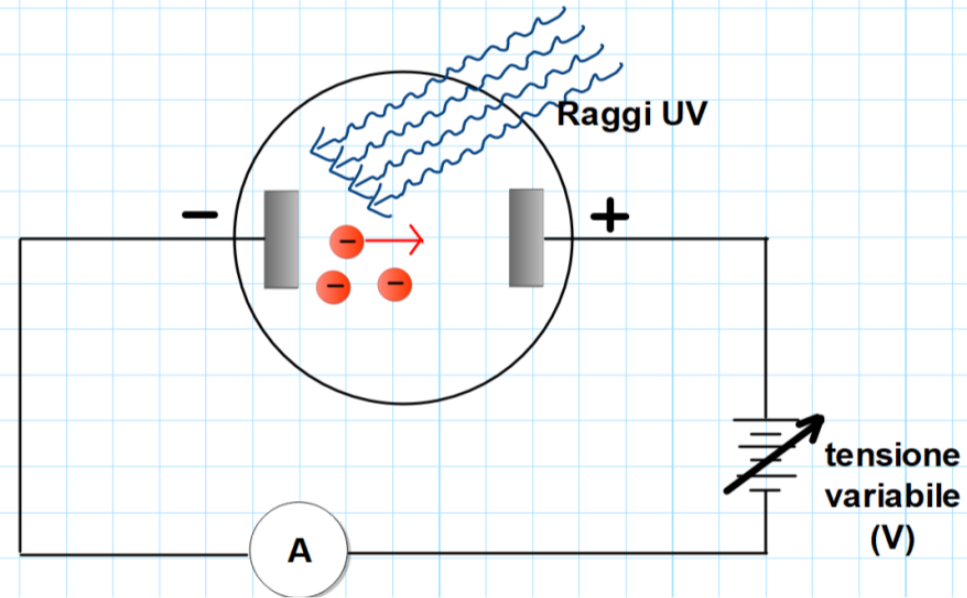


MAX  
PLANCK (1858-1947)

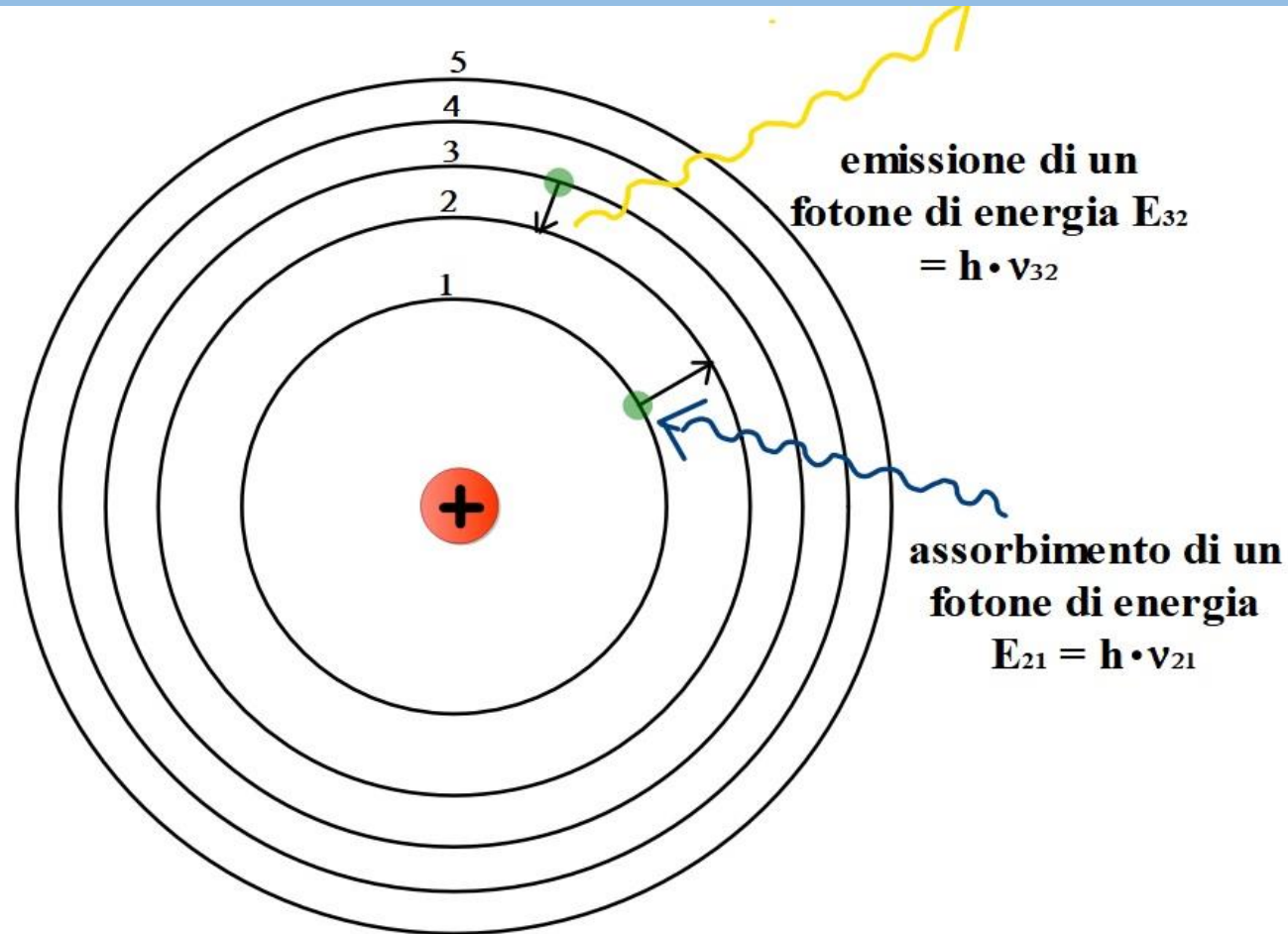
# I fotoni: la luce è onda o corpuscoli?

1905:  
EINSTEIN  
INTERPRETA  
L'EFFETTO  
FOTOELETTRICO

( PREMIO  
NOBEL  
1921  
CON  
P. LENARD )



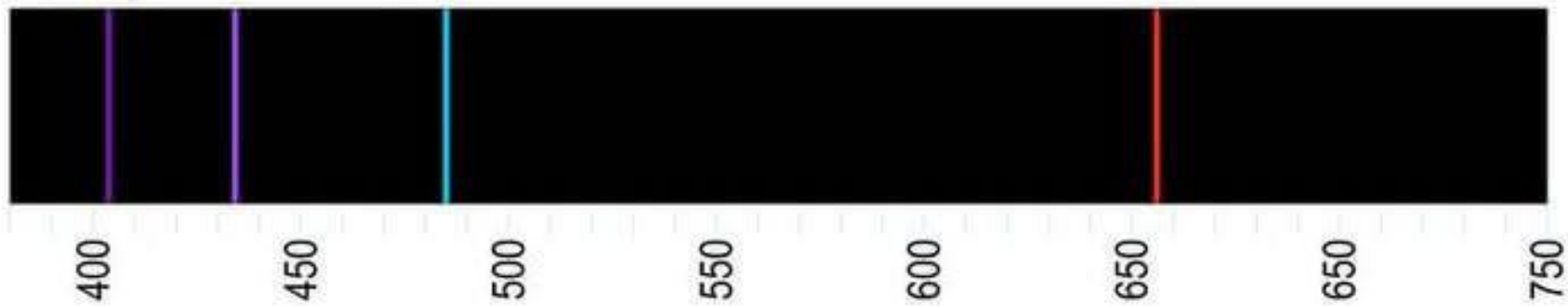
# Dai fotoni alla materia: atomo “quantizzato” e particelle – onde



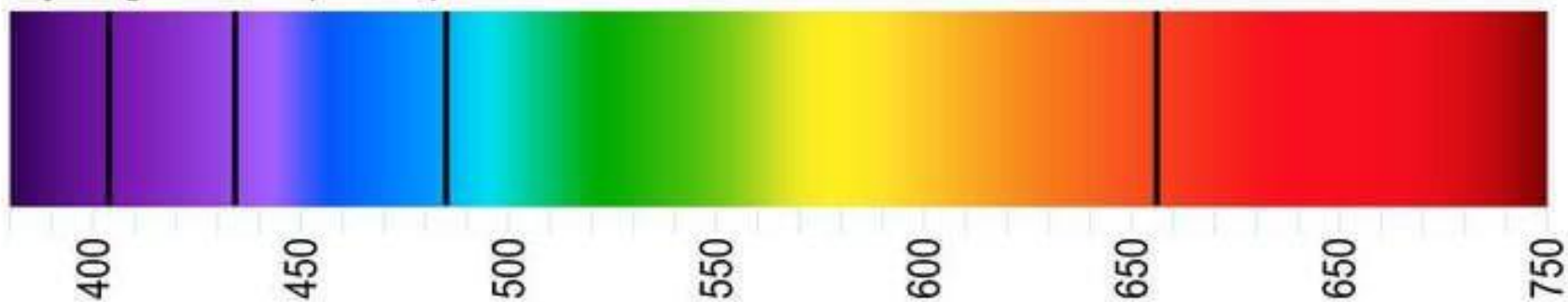
**Così si spiegano:**

- (1) luce a fluorescenza (spettri a righe di emissione)**
- (2) Spettri di assorbimento**

Hydrogen Emission spectrum

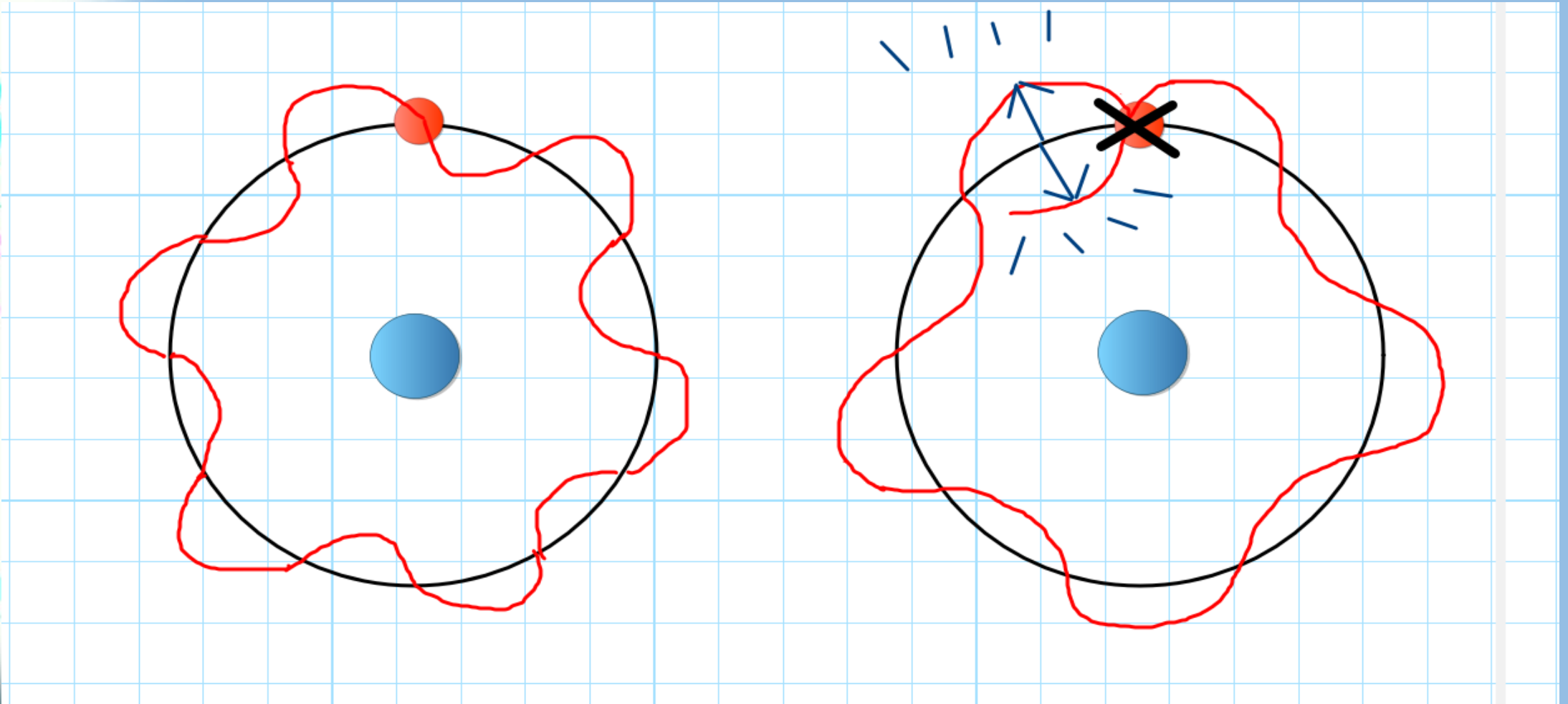


Hydrogen Absorption spectrum

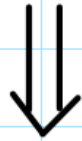




La ragione dell'atomo quantizzato: il comportamento ondulatorio degli elettroni dentro alla "buca di potenziale" del nucleo



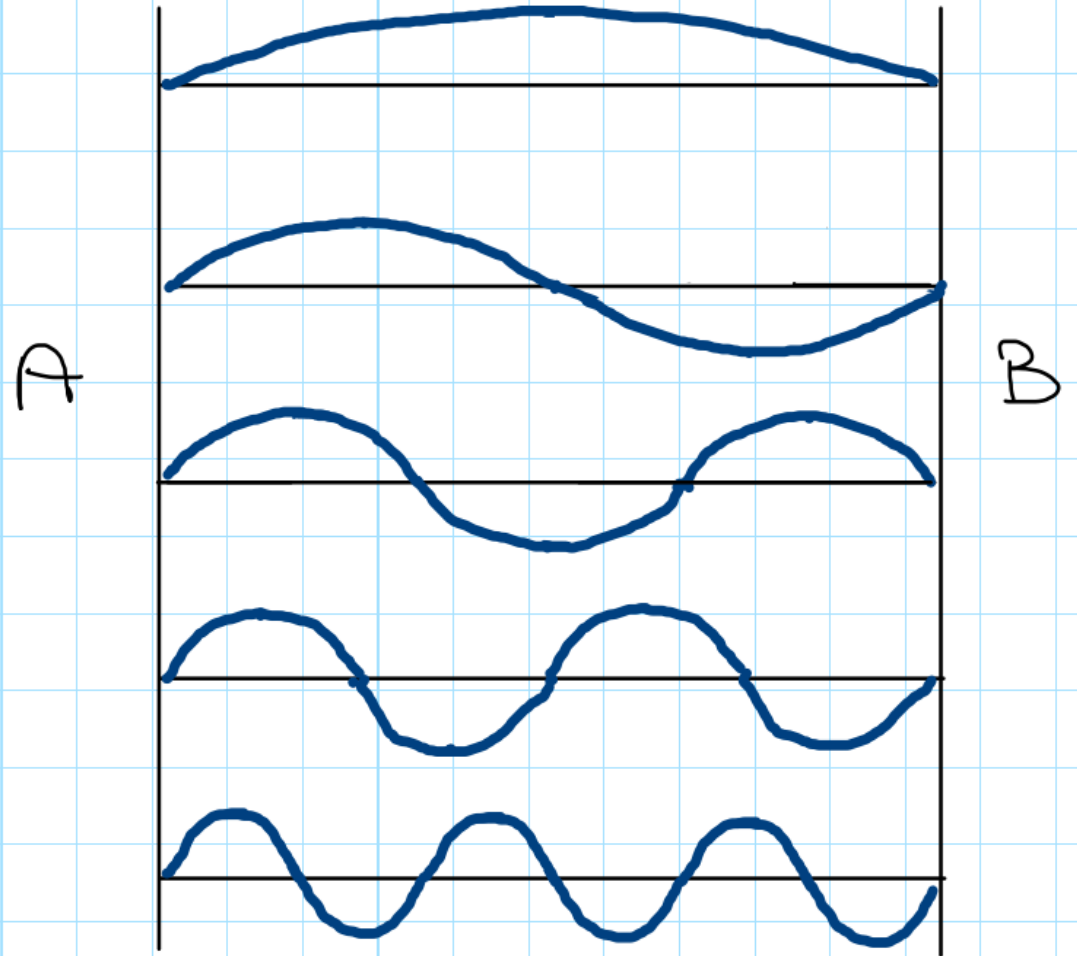
# Particella in una scatola



Onde Stazionarie:  
solo alcuni modi di oscillazione  
riescono a sopravvivere



L'Energia di una particella - onda  
assume valori discreti"



## RELAZIONI DI DE BROGLIE

$$\left( \begin{array}{l} \text{LUNGHEZZA} \\ \text{D'ONDA} \end{array} \right) \lambda = \frac{h}{p}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \left( \begin{array}{l} \text{QUANTITÀ} \\ \text{DI} \\ \text{MOTO} \end{array} \right)$$

$$\left( \text{FREQUENZA} \right) \nu = \frac{E}{h}$$

$$E = h\nu \quad \left( \text{ENERGIA} \right)$$

LE PARTICELLE DIVENTANO  
ONDE.

- Nasce il **dualismo “onda – corpuscolo”**: serve un principio fondamentale per la nuova Fisica delle particelle – onde.
- Il Principio di Indeterminazione di W. Heisenberg

$p$  = QUANTITÀ DI MOTO  
 $q$  = POSIZIONE

$$q \cdot p \neq p \cdot q$$

$$q p - p q = \frac{h}{2\pi i}$$

PRINCIPIO  
 DI  
 INDETERMINAZIONE  
 DI  
 HEISENBERG  
 (1926)

**Significato: il risultato della misura dipende dalla modalità della misura. In pratica la descrizione del mondo elementare dipende dall'osservatore (sorgono dubbi sull'esistenza di una realtà oggettiva).**

# Formulazione ondulatoria del principio di indeterminazione (E. Schroedinger 1927)



Un impulso di lunghezza  $\Delta x$  si può scomporre in un "pacchetto d'onde" continuo con lunghezze d'onde distribuite su di un intervallo  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$

$$\Delta x \cdot \Delta k = 1$$

LEGGI DI  
DE BROGLIE

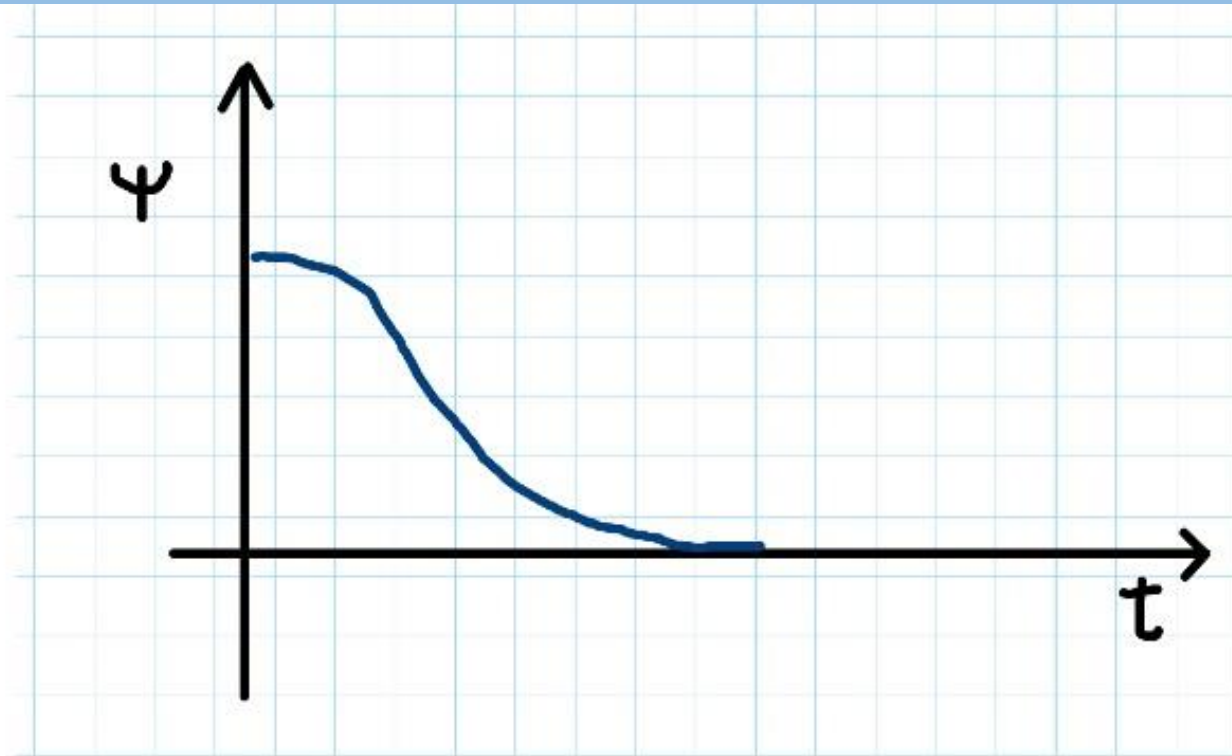
$$p = \frac{h}{\lambda} = h k$$

$$\textcircled{h} \Delta x \cdot \textcircled{\Delta k} = h$$

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

FORMA  
ONDULATORIA  
DEL PRINCIPIO  
DI INDETERMINAZIONE

# Indeterminazione energia – tempo



Allo stesso modo un impulso di lunghezza  $\Delta t$  si può scomporre in un "pacchetto d'onde" continuo con frequenze distribuite su di un intervallo  $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$

$$\Delta t \cdot \Delta \nu = 1$$

LEGGI DI

DE BROGLIE

$$E = h\nu$$

$$\textcircled{h} \Delta t \cdot \textcircled{\Delta \nu} = h$$

$$\Delta t \cdot \Delta E = h$$

FORMA  
ONDULATORIA  
DEL PRINCIPIO  
DI INDETERMINAZIONE  
ENERGIA - TEMPO



## Relazioni di indeterminazione

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \hbar$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \approx \hbar$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \approx \hbar$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$



# Prova sperimentale: la diffrazione di un fascio di elettroni

DAVISSON - GERMER (1927)

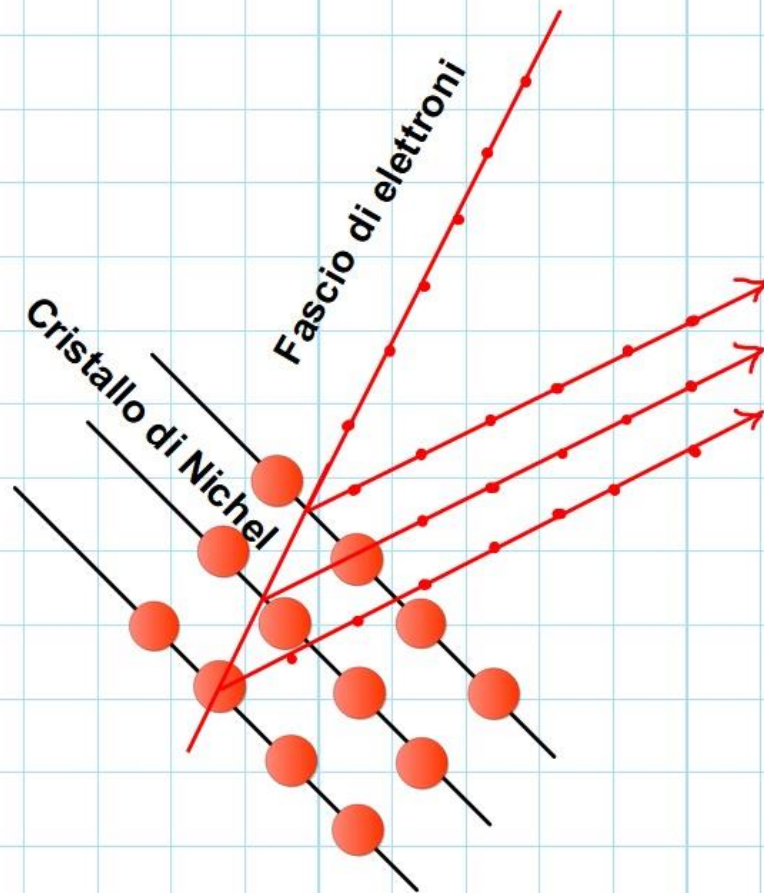


Figura di diffrazione

# Meccanica quantistica e mondo del "probabile" (M. Born)

EQUAZIONE DI  
SCHRÖDINGER

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x) \psi = \hbar i \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

FUNZIONE D'ONDA DI UNA  
PARTICELLA LIBERA

$$\psi(x,t) = A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

$$|\psi|^2 = A^2(x, y, z)$$

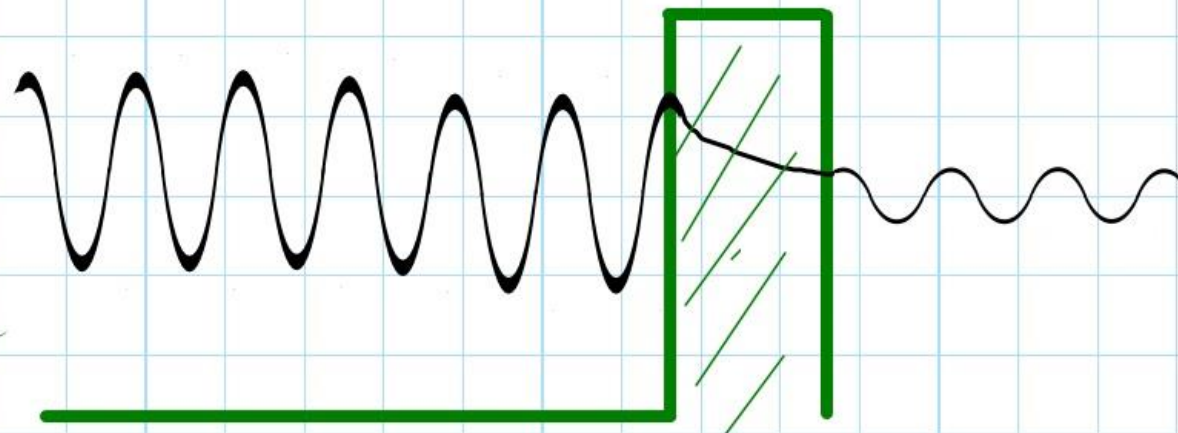
$$\int_V |\psi|^2 dx dy dz = P(V)$$

PROBABILITÀ DI  
TROVARE LA  
PARTICELLA NEL  
VOLUME V

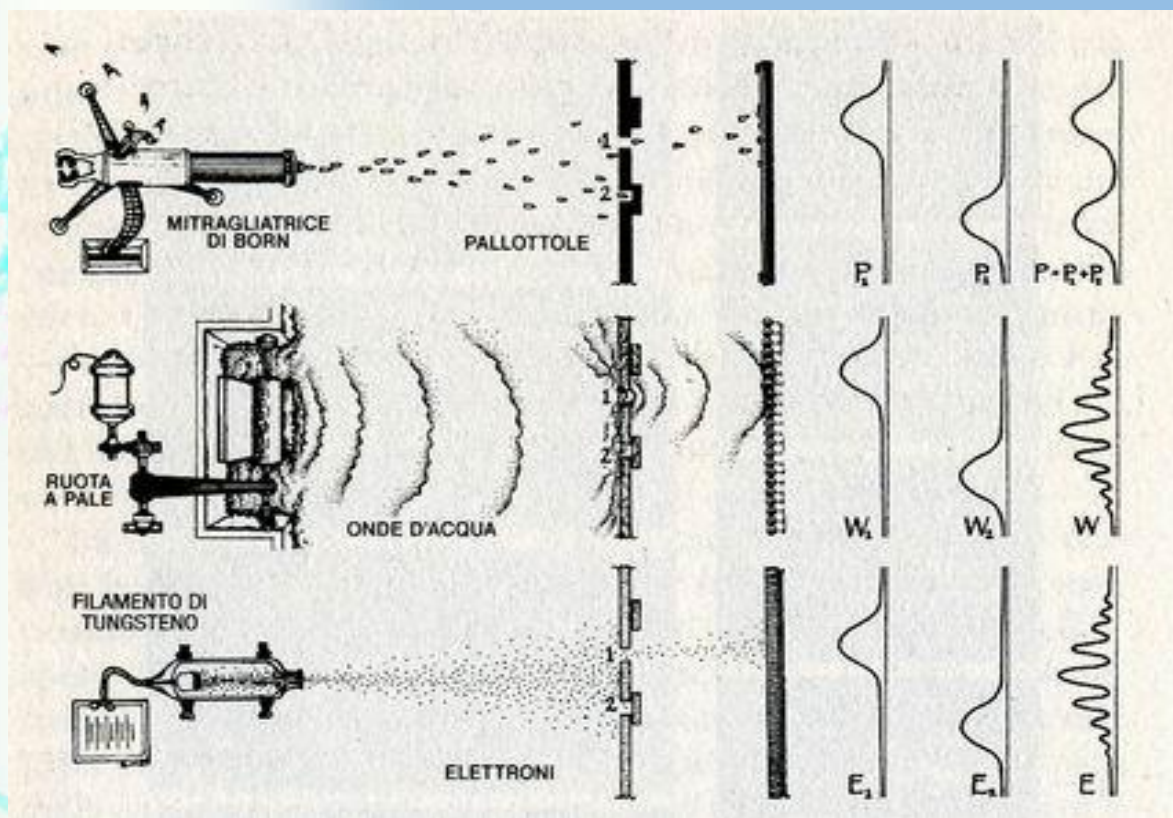
Roba da pazzi? Eppure funziona!

Saltare un ostacolo? No, passarci attraverso! Un'onda può!

**Onda - particella e barriera di potenziale: l'effetto "tunnel"**



# Stranezze quantistiche: l'esperimento delle due fenditure e la "riduzione del pacchetto"



Ogni elettrone traccia un puntino sullo schermo fluorescente.

Se ho un rilevatore che avverte il passaggio di ogni elettrone del fascio in una delle due fenditure, gli elettroni si comportano come proiettili (corpuscoli)

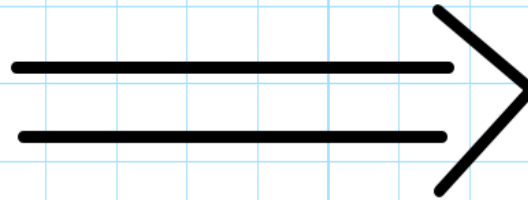
Viceversa se rinuncio a sapere dove passano tutti gli elettroni del fascio, alla fine tutti i puntini formeranno sullo schermo una figura di interferenza!

# Schema del processo di misurazione

$$A |\psi_1\rangle + B |\psi_2\rangle$$

**non so per dove  
passa il fotone**

**misurazione  
posizionale**



$$|\psi_1\rangle$$

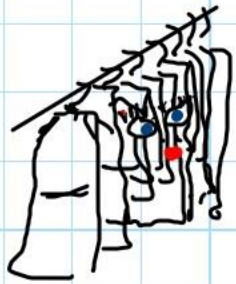
(passa per 1)

$$|\psi_2\rangle$$

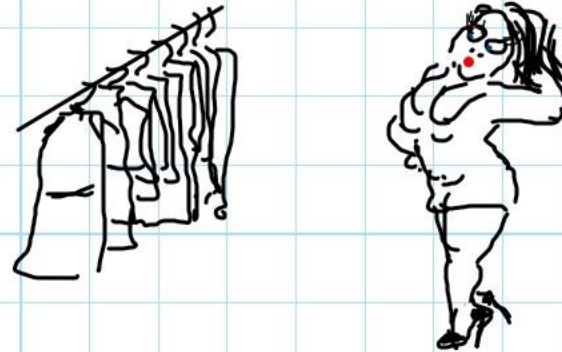
(passa per 2)

misura = scelta

"RIDUZIONE DEL PACCHETTO"



PRIMA

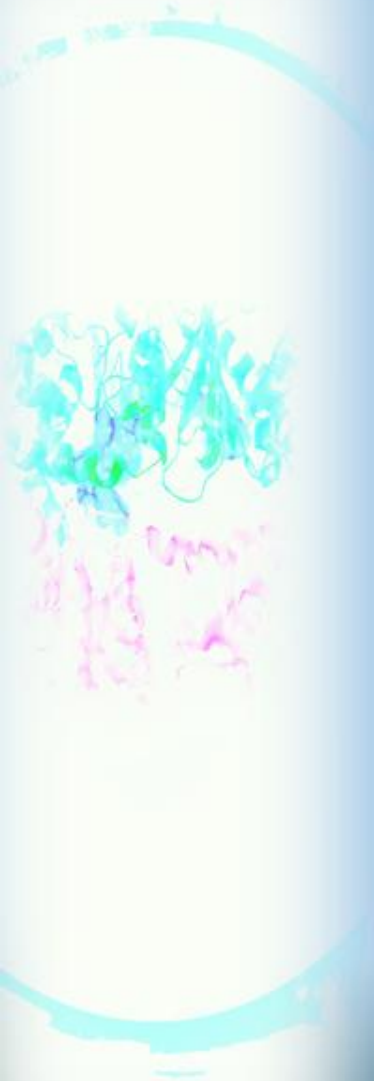


DOPO



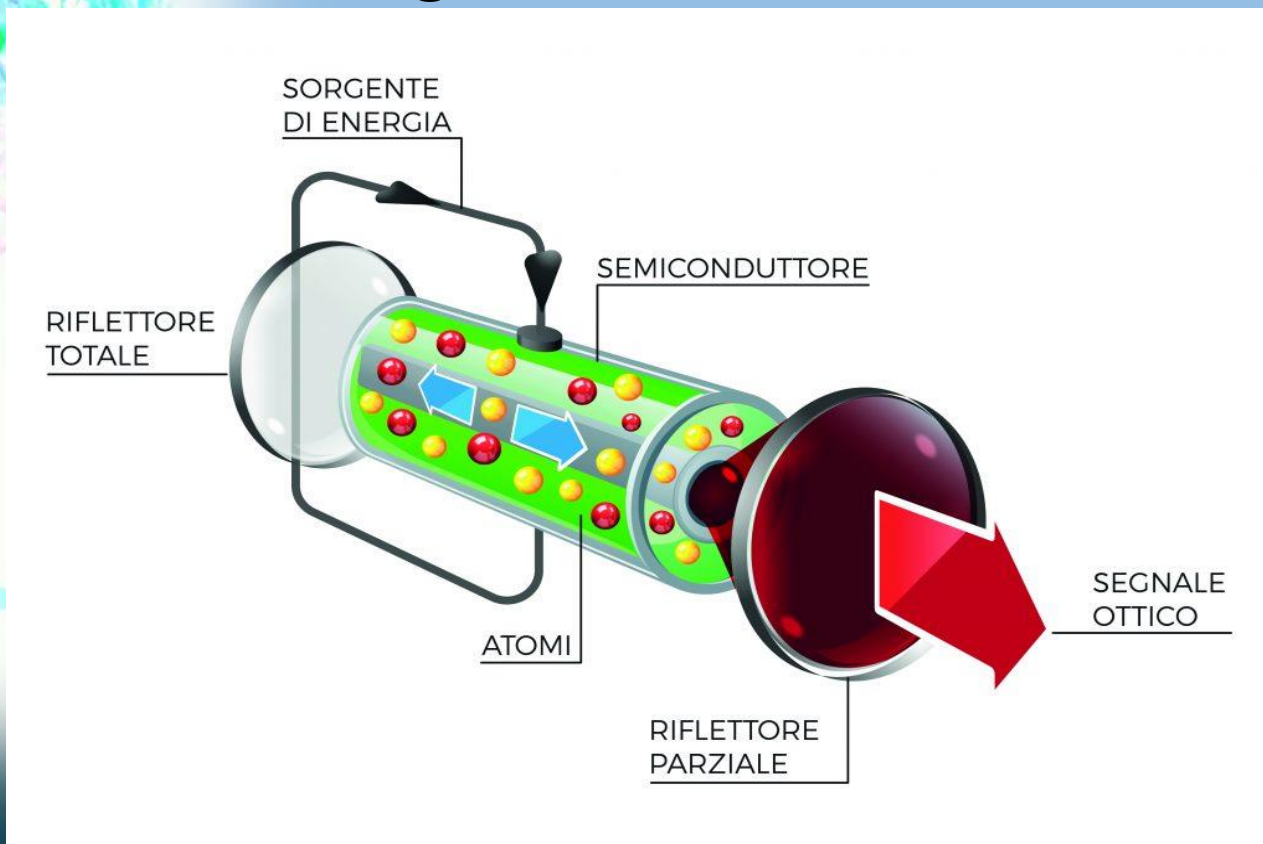
## Ma che cos'è una misura quantistica?

- Qualsiasi interazione di può considerare una misura quantistica.
- In un sistema fisico soggetto a interazioni da un ambiente “agitato” e caotico, ogni sua parte risponde alle sollecitazioni esterne in modo caoticamente disorganizzato (incoerenza)
- In un sistema fisico però può rispondere alle sollecitazioni esterne in modo ordinato: ciò succede se le parti del sistema sono legate tra di loro da qualche forma di organizzazione interna (**coerenza**)

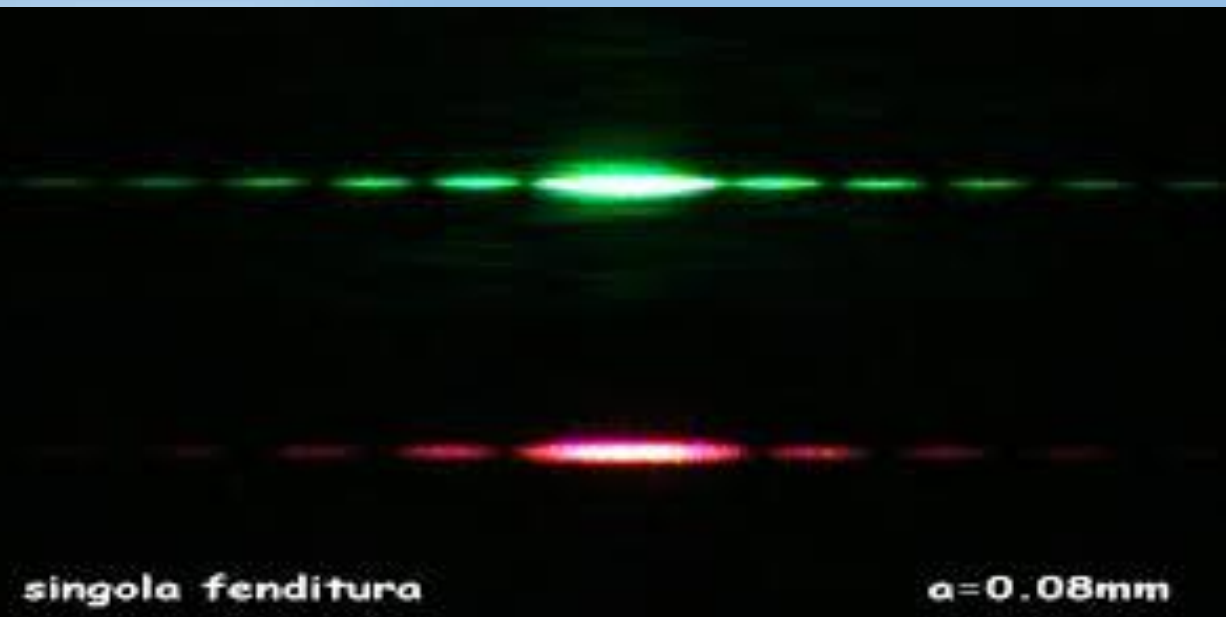


Esempio di coerenza:  
il laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

**L'emissione stimolata (LASER, luce, e MASER, microonde):  
emissione di radiazione di una data frequenza da parte di una  
sorgente materiale eccitata alla stessa frequenza**



**Un sistema di rifornimento di energia (pompaggio) produce uno stato eccitato negli atomi di un mezzo di guadagno” (gas o cristallo); gli atomi, diseccitandosi, emettono fotoni. Le riflessioni ripetute ricolpiscono gli atomi eccitati con la stessa frequenza di diseccitazione ...**



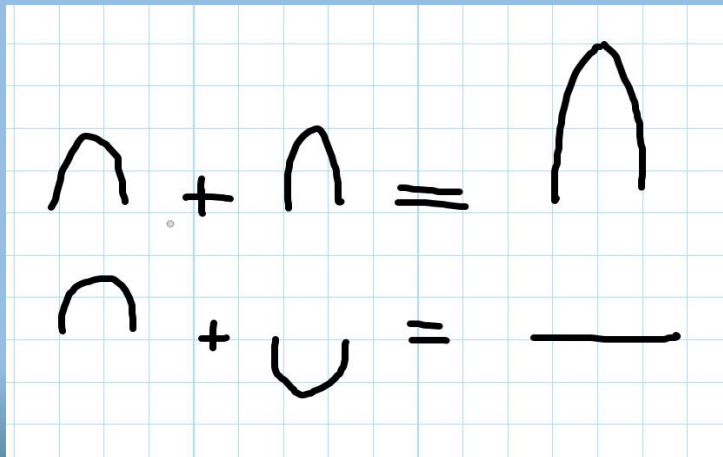
Il laser mostra un comportamento perfettamente ondulatorio (ordinato): la sua luce si comporta come quella di una singola onda prodotta da un unico oscillatore fatto di miliardi di miliardi di atomi. Perché?

Il mezzo di guadagno del laser è una sostanza omogenea e per questo la risposta è ordinata.

Ma una biomolecola è fatta da atomi diversi, legati insieme da legami diversi. Non dovrebbe avere risposta ordinata a una stimolazione energetica esterna.

**Eppure ce l'ha! Come mai?**

Le onde si sommano vettorialmente: “interferenza costruttiva e distruttiva”



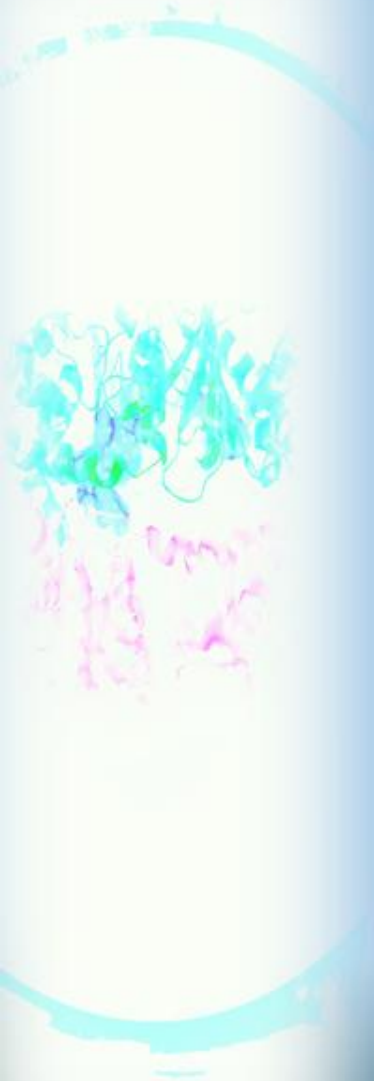
**Coerenza:** relazione di fase costante tra sorgenti di onde  
(è necessaria per la formazione delle figure di  
diffrazione e interferenza tra onde)

La *coerenza* di una molecola: lo stato di tutte le sue parti è  
definita da una sola equazione d'onda

In meccanica quantistica si dice che *un sistema è coerente  
se la sua funzione d'onda è autofunzione dell'operatore  
di annichilazione*


Ciò significa che se si elimina una particella qualunque lo  
stato non cambia.

L'orchestra suona la stessa sinfonia anche se si elimina  
uno strumento



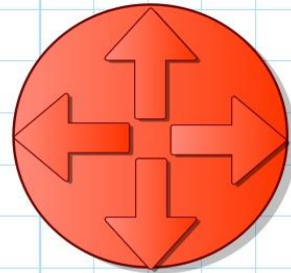
- Come fa una biomolecola costituita da parte parti diverse e immersa in un ambiente umido e caldo (con moti termici caotici) ad essere un sistema “coerente”?
- Una felice combinazione di particelle e legami tra di loro che è il risultato di una lunga serie di tentativi andati a vuoto finché non si è ottenuta una molecola in grado di ... **autoreplicarsi!**

# La vita come lotta tra ordine e disordine ("l'ordine dall'ordine" di E. Schroedinger)

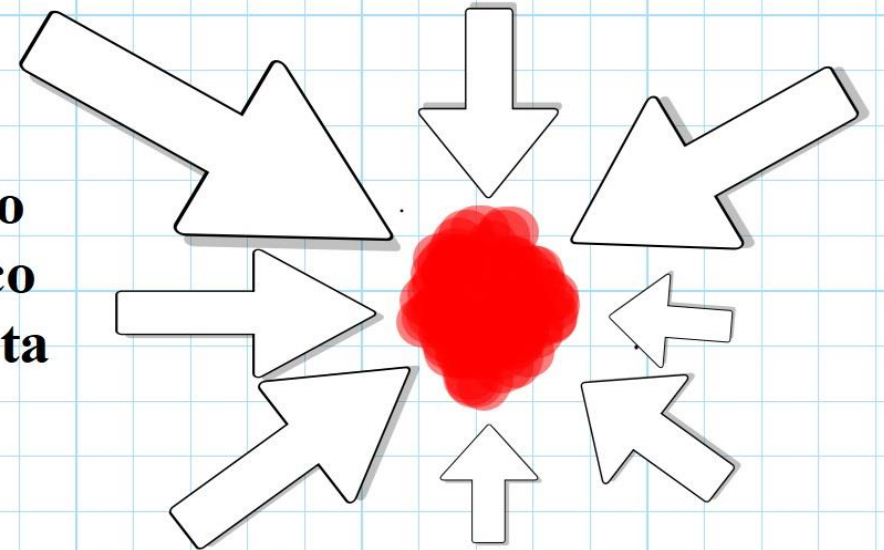


**biomolecola  
(sistema coerente)**

**Rumore colorato  
(rumore della rete  
di interazioni  
interne coerenti  
che tende a  
mantenere  
l'ordine)**



**Rumore bianco  
(rumore termico  
esterno che porta  
disordine)**





# METAMORFOSI

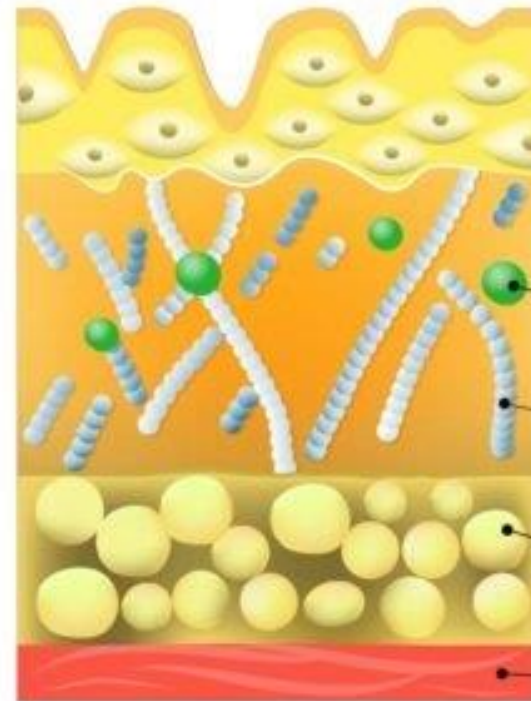
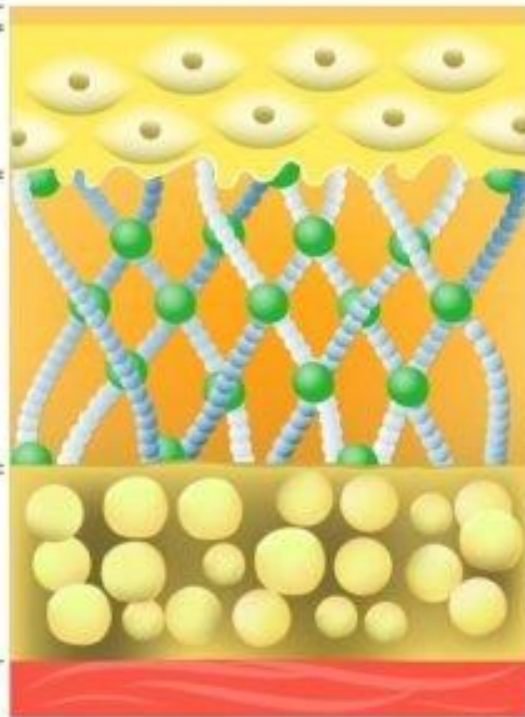


# COLLAGENE e COLLEGANASI

PELLE GIOVANE

PELLE VECCHIA

cuticola  
epidermide  
derma  
ipoderma



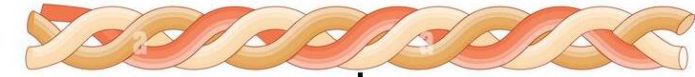
elastina

collagene

lipociti

muscoli

Collagen fibre





**ENZIMA** = *CATALIZZATORE biologico*

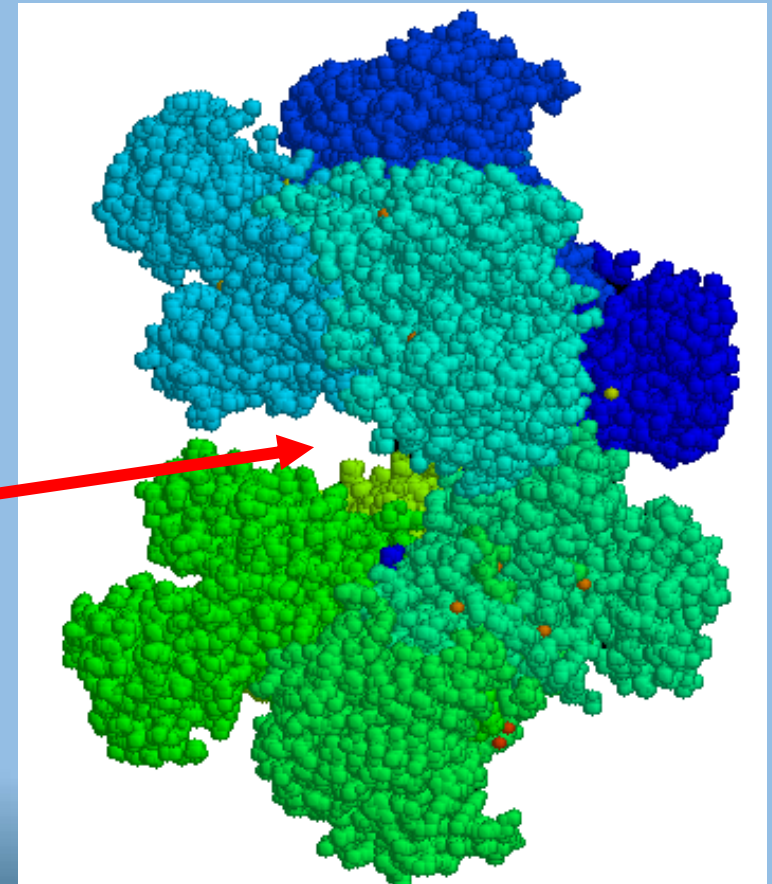
**CATALIZZATORE**

sostanza che interviene durante lo svolgimento di una reazione chimica e ne aumenta la **velocità** rimanendo inalterato al termine della stessa

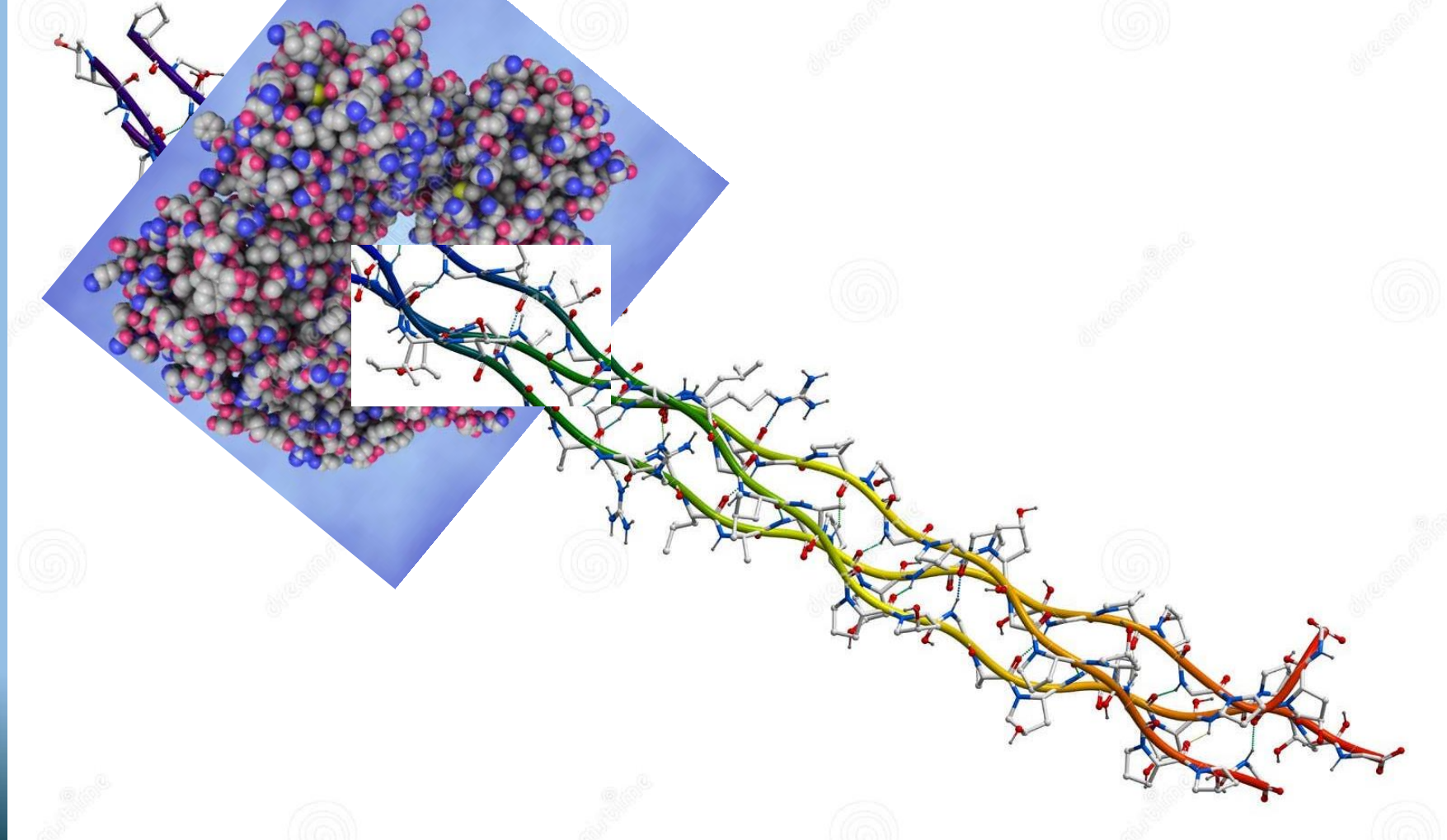
Presentano una (o più) cavità

**SITO ATTIVO**

Normalmente sono **grosse proteine** ad alto peso molecolare molto complesse come struttura



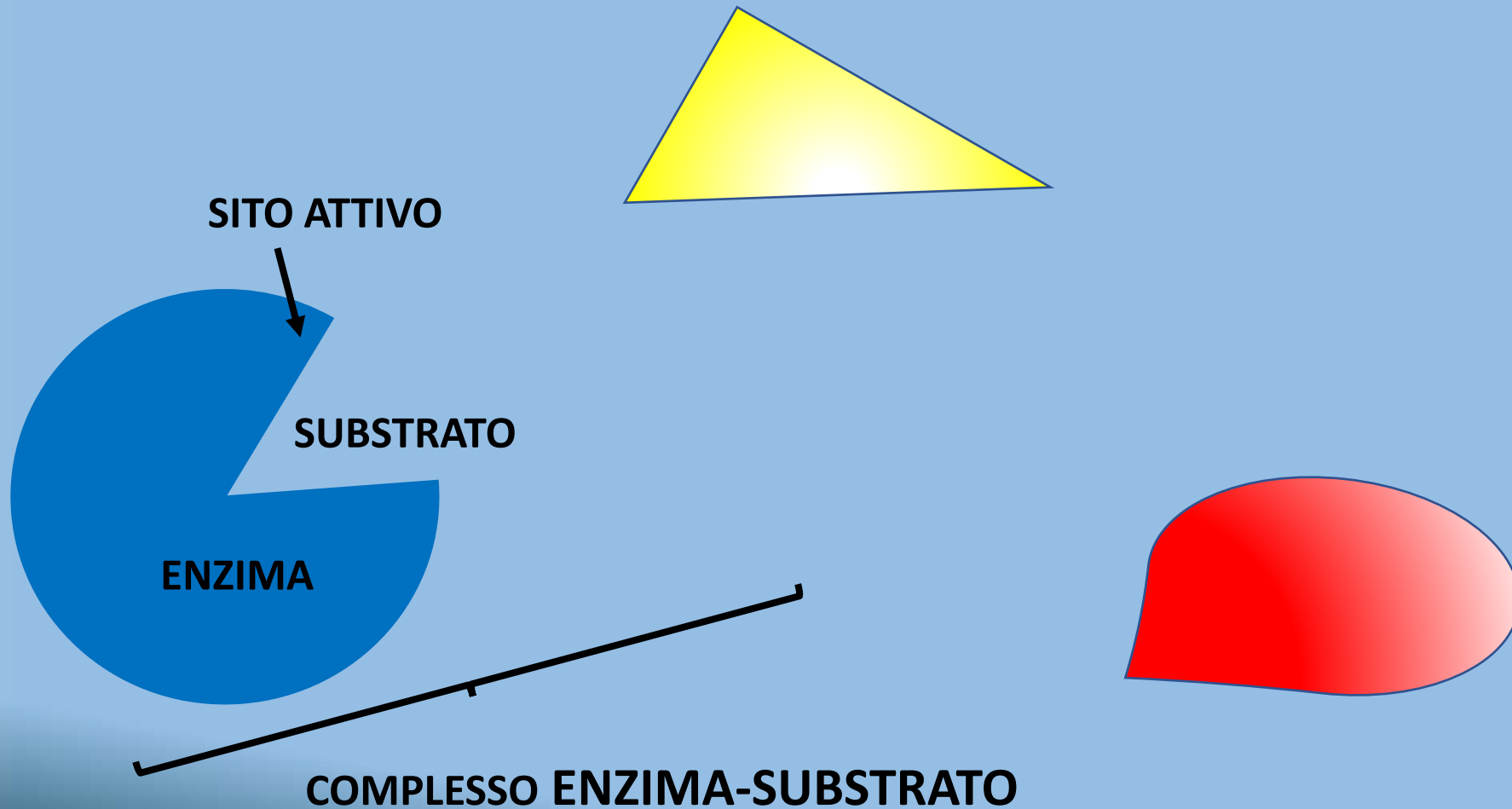
# COLLAGENE e COLLEGANASI



Gli enzimi sono **SPECIFICI** cioè in grado di legarsi ad un solo *substrato*



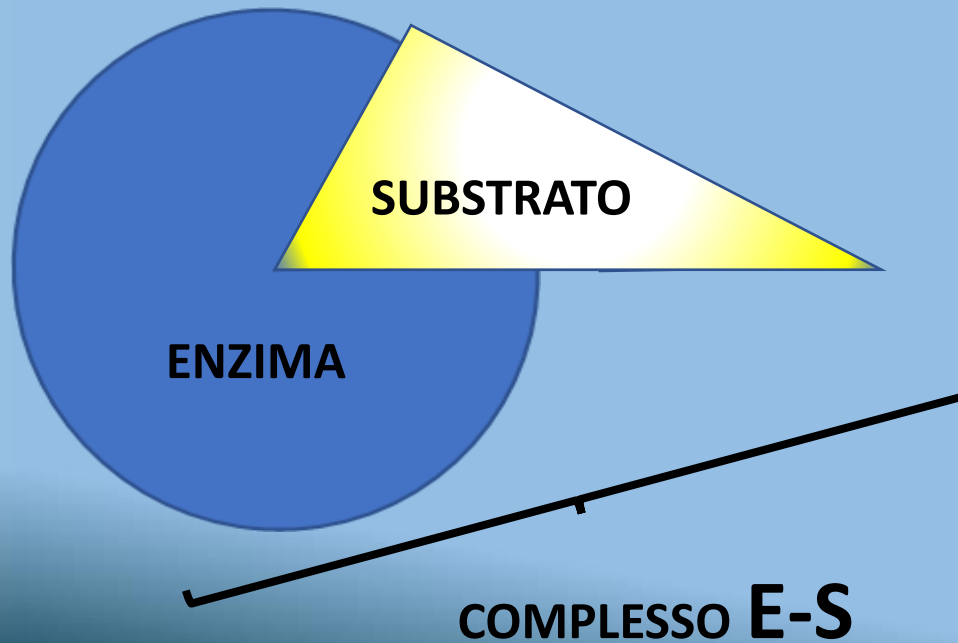
modello *CHIAVE-SERRATURA*



# REAZIONE di DECOMPOSIZIONE

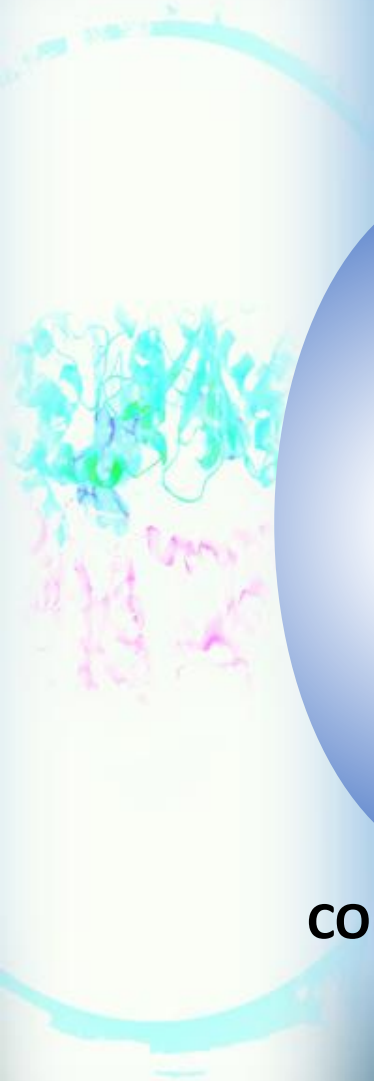


P<sub>1</sub>

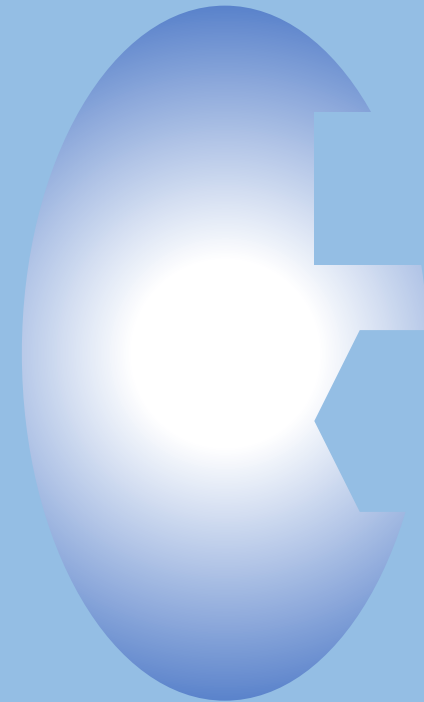
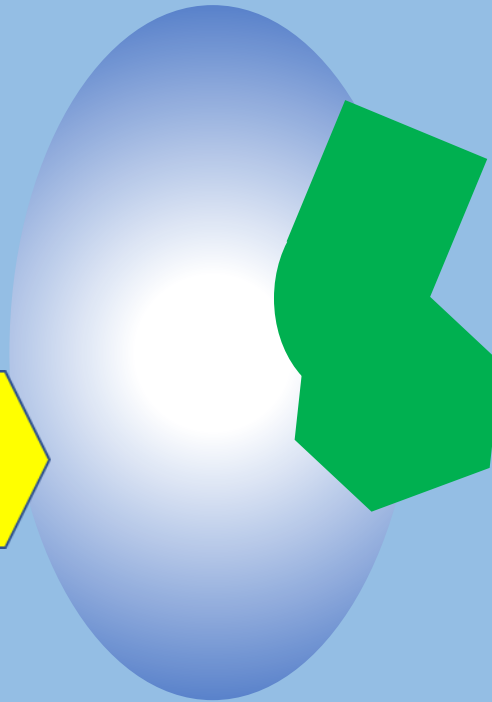
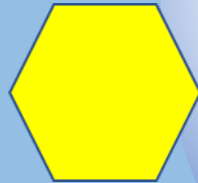
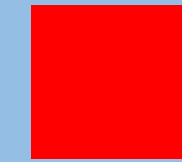


P<sub>2</sub>

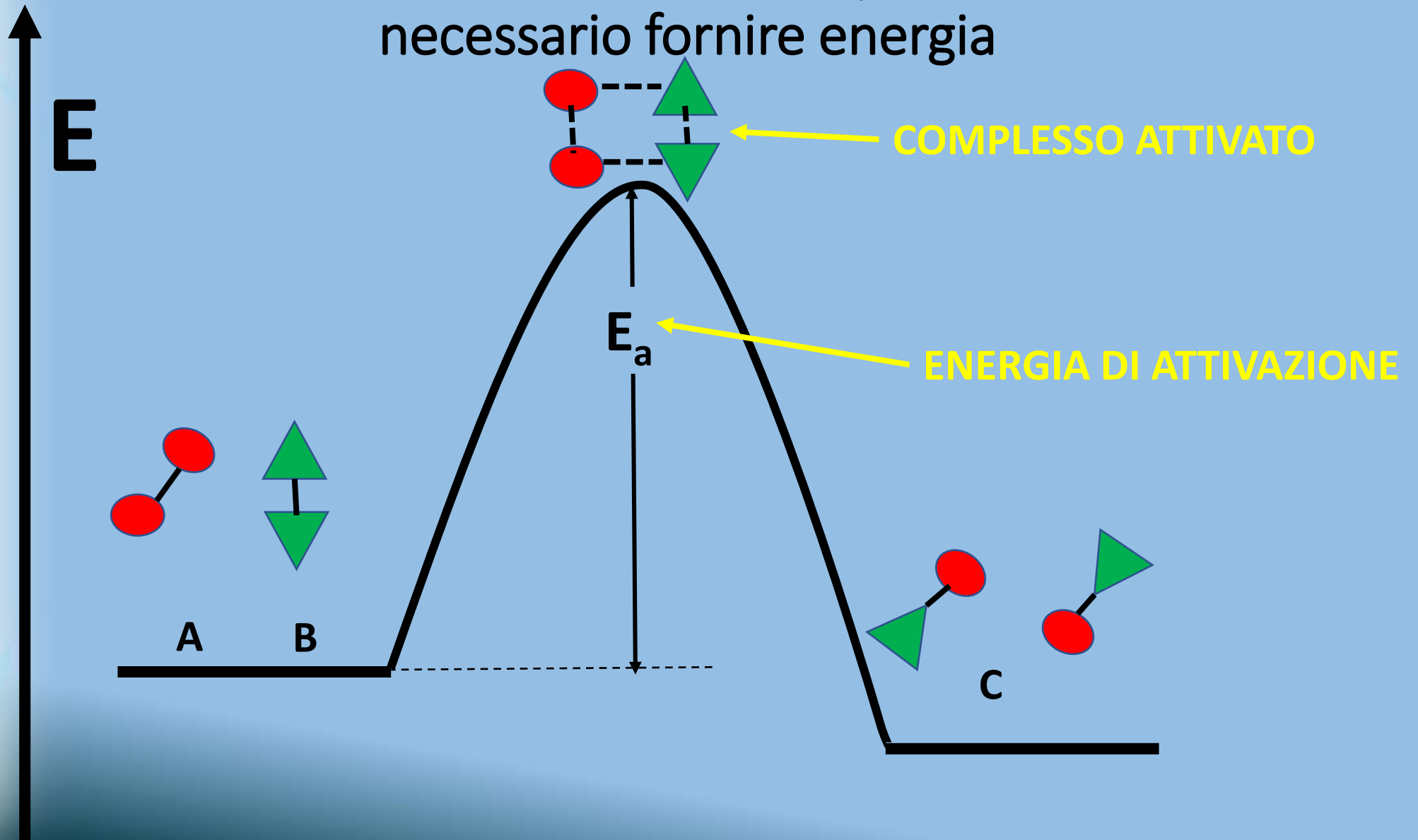
# REAZIONE di SINTESI



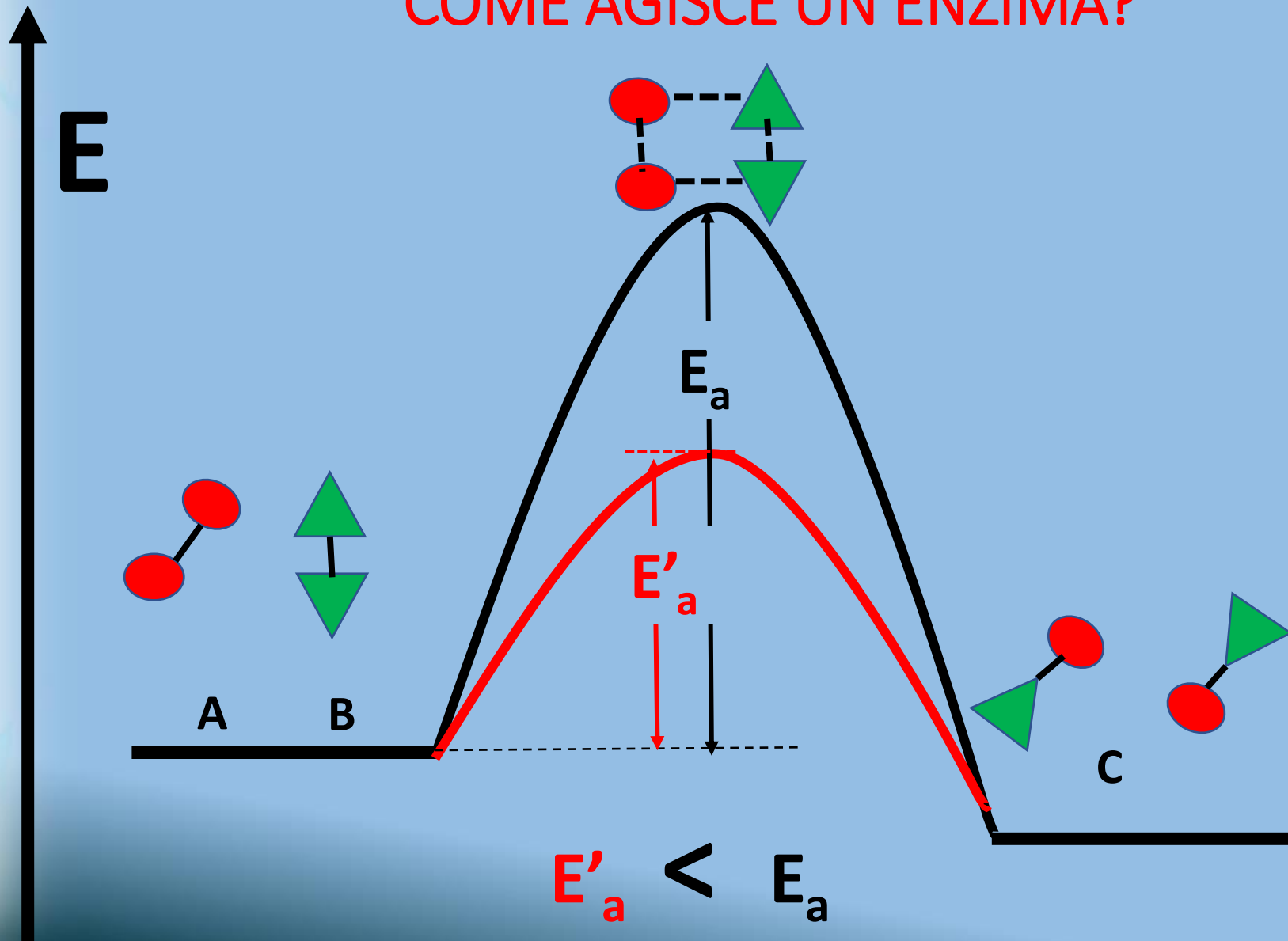
COMPLESSO E-S

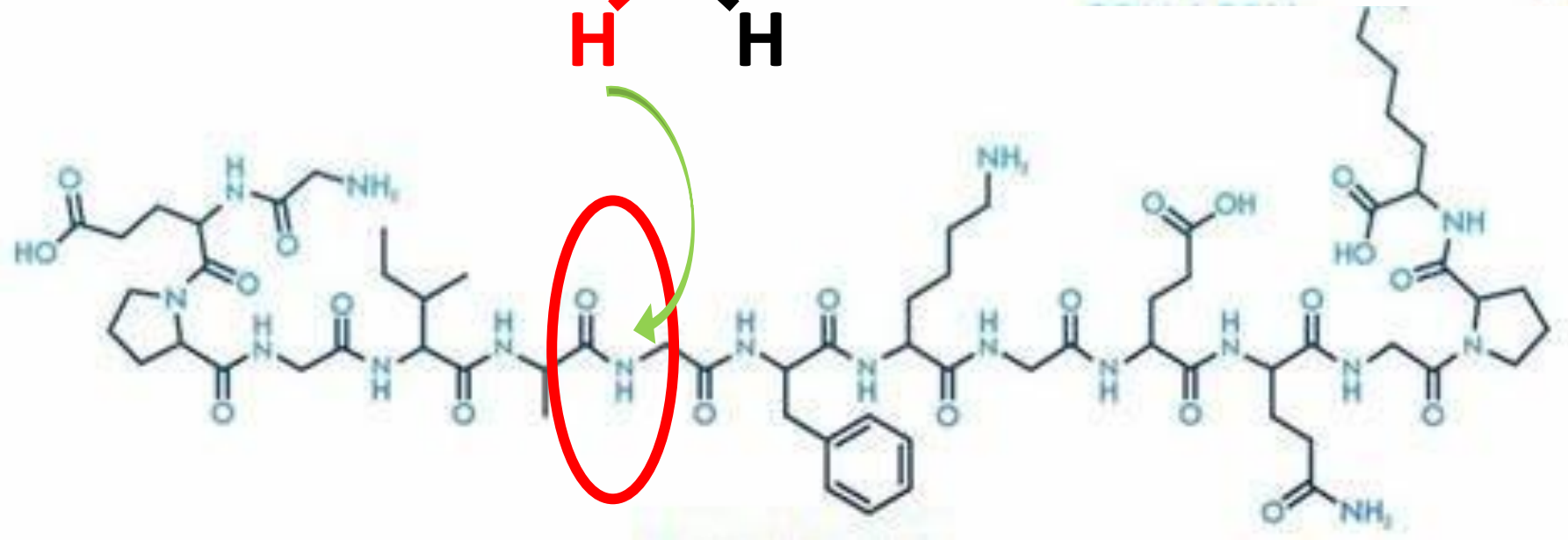
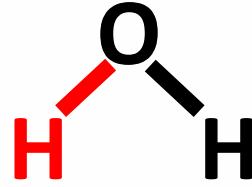
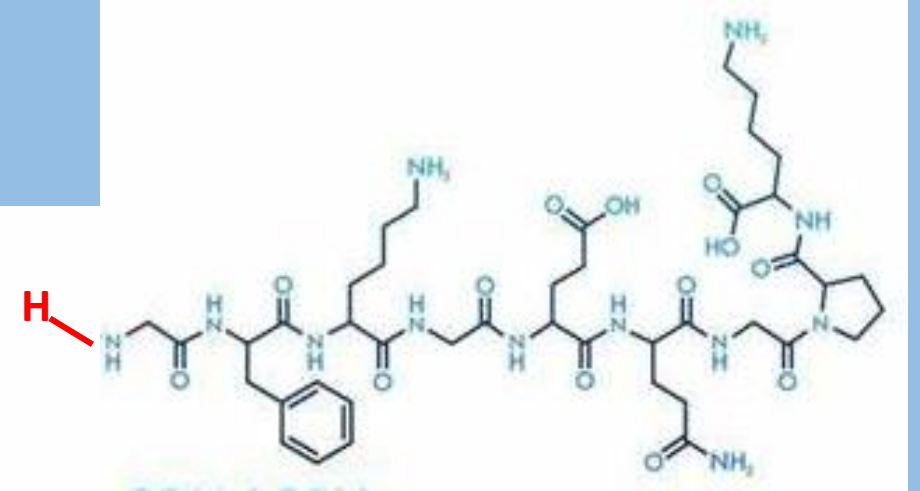
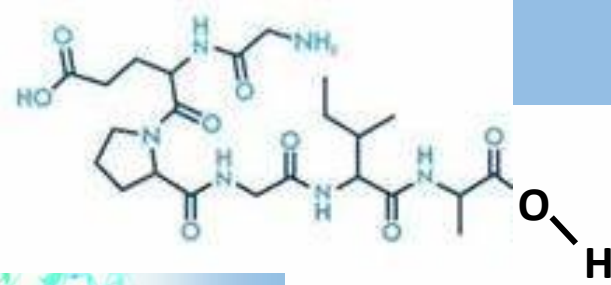


Affinché una reazione chimica possa avvenire è necessario fornire energia



# COME AGISCE UN ENZIMA?









I BIOLOGI PARLANO DI **ATOMI** E DI LEGAMI, CIOÈ DI  
**ELETTRONI**, CHE SI SPOSTANO.....

**MA...**

....LA **FISICA QUANTISTICA** CI DICE CHE GLI  
ATOMI E GLI ELETTRONI SONO ALTRE COSE.....

# Le prove sperimentali

L'EFFETTO ISOTOPICO CINE

Chi dei due fa più fatica a passare sotto al reticolato?



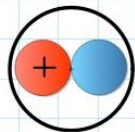
"Slim"



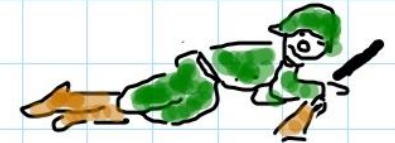
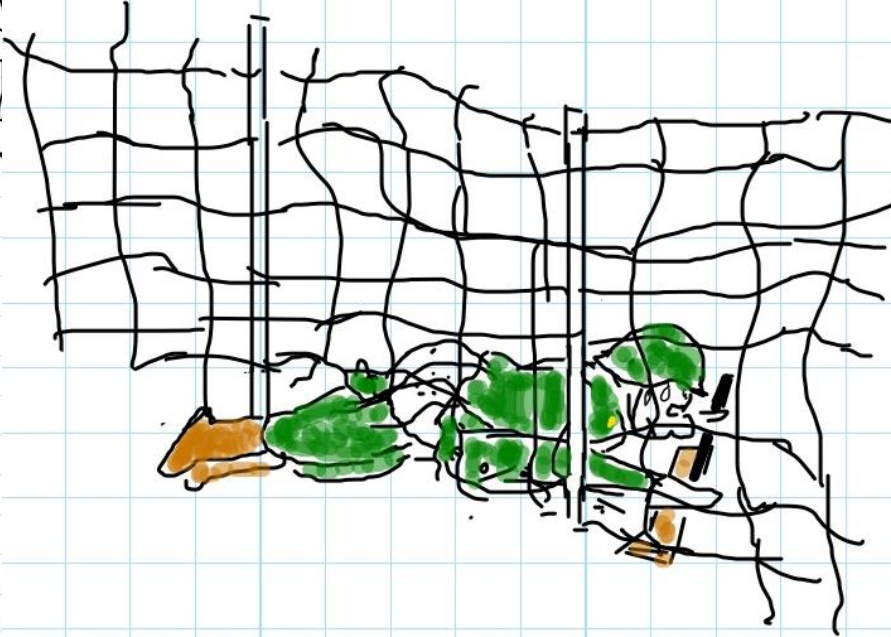
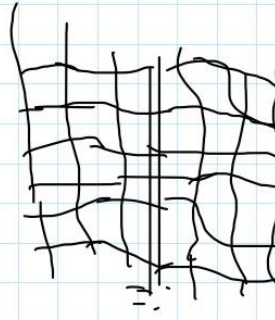
Nucleo di idrogeno  
(protone)



"Butterball"



Nucleo di deuterio  
(deutone)

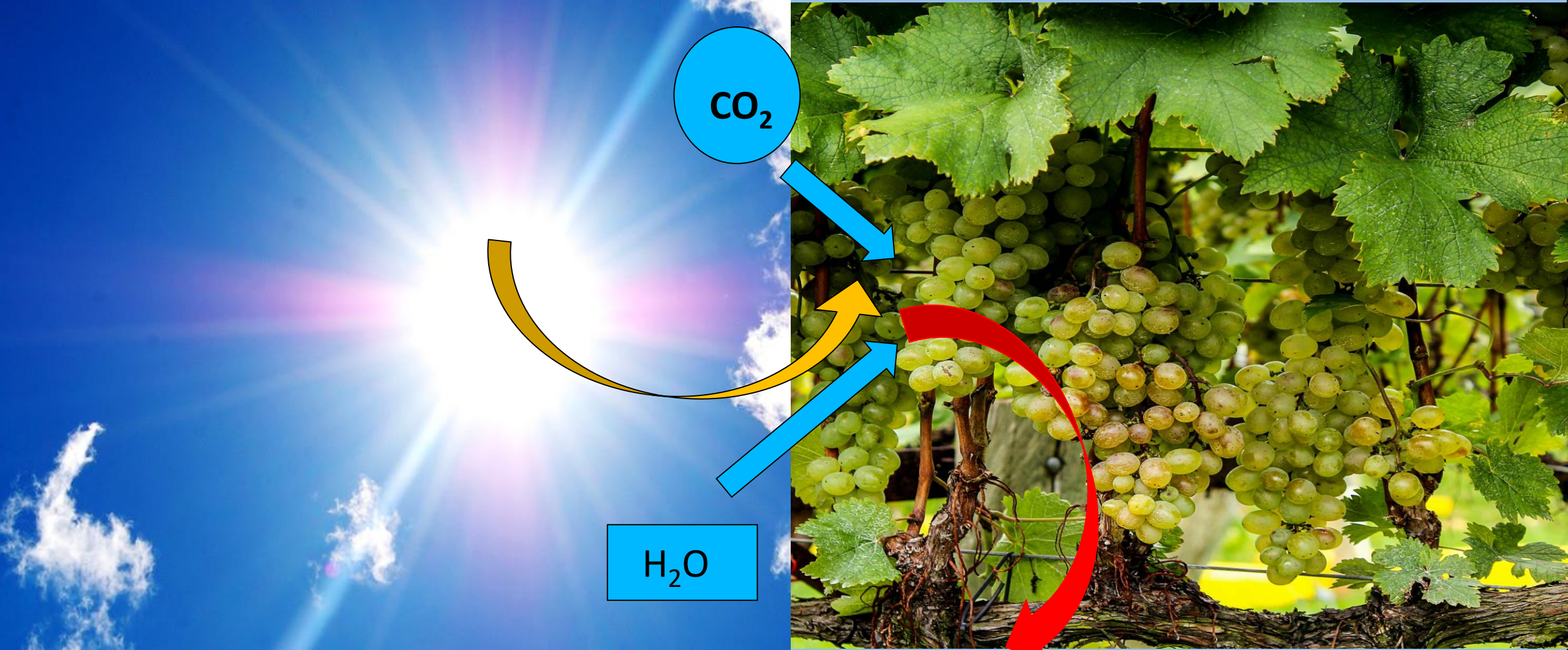


Due indizi fanno una prova?

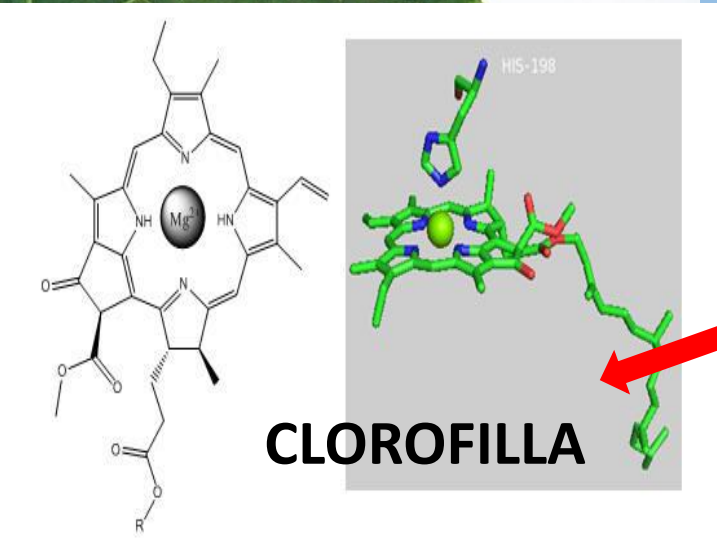
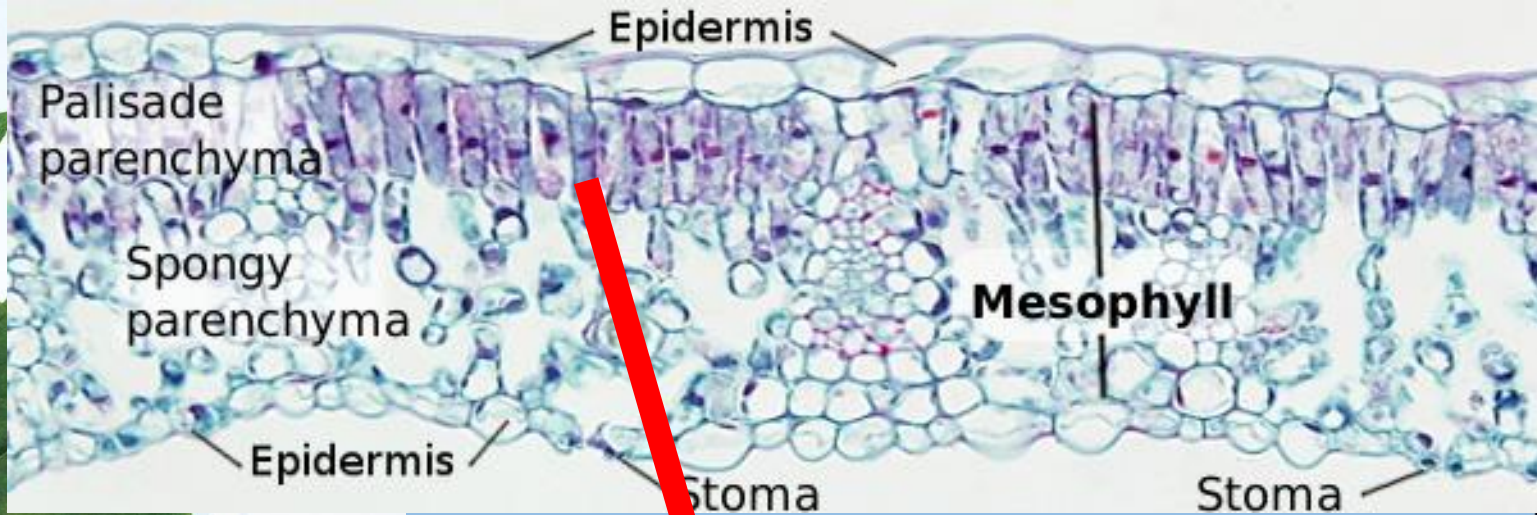
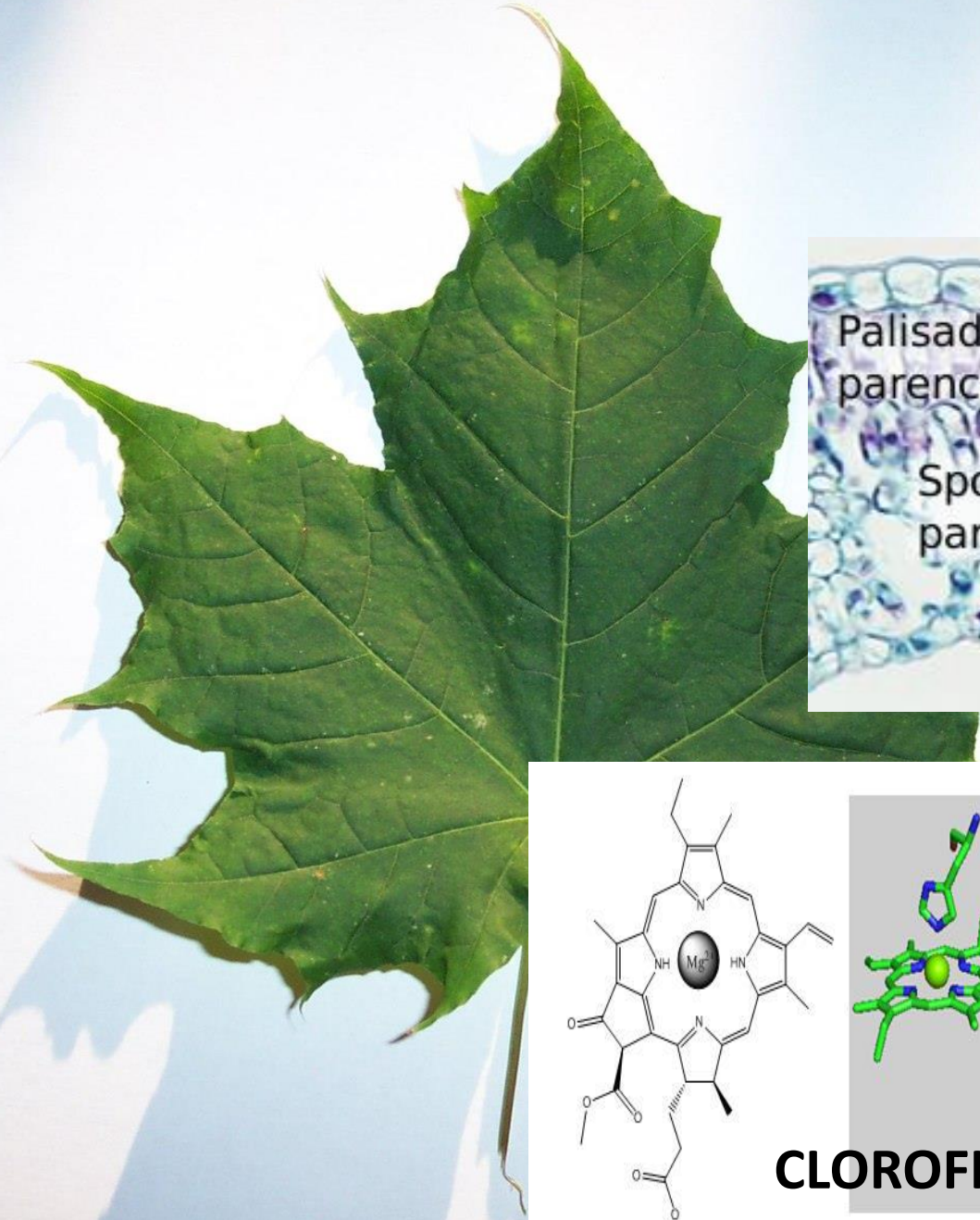
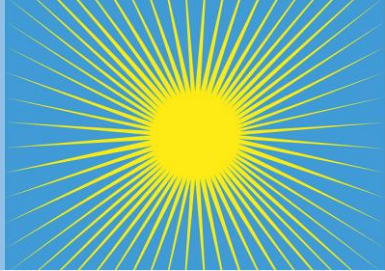
# Esperimenti chiave

**Don De Vault, Britton Chance (1967):** il trasferimento degli elettroni dall'enzima respiratorio "citocromo" all'ossigeno nel batterio *Chromatium vinosium* avveniva anche a temperature di  $-190^{\circ}\text{C}$ . La velocità restava costante fino a  $-238^{\circ}\text{C}$ .

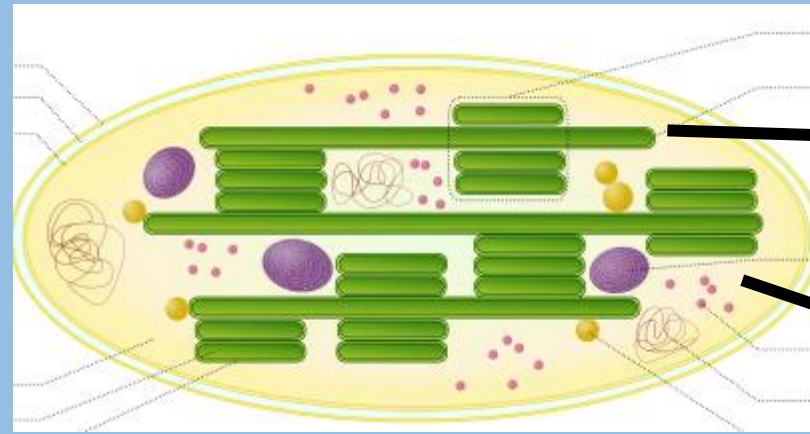
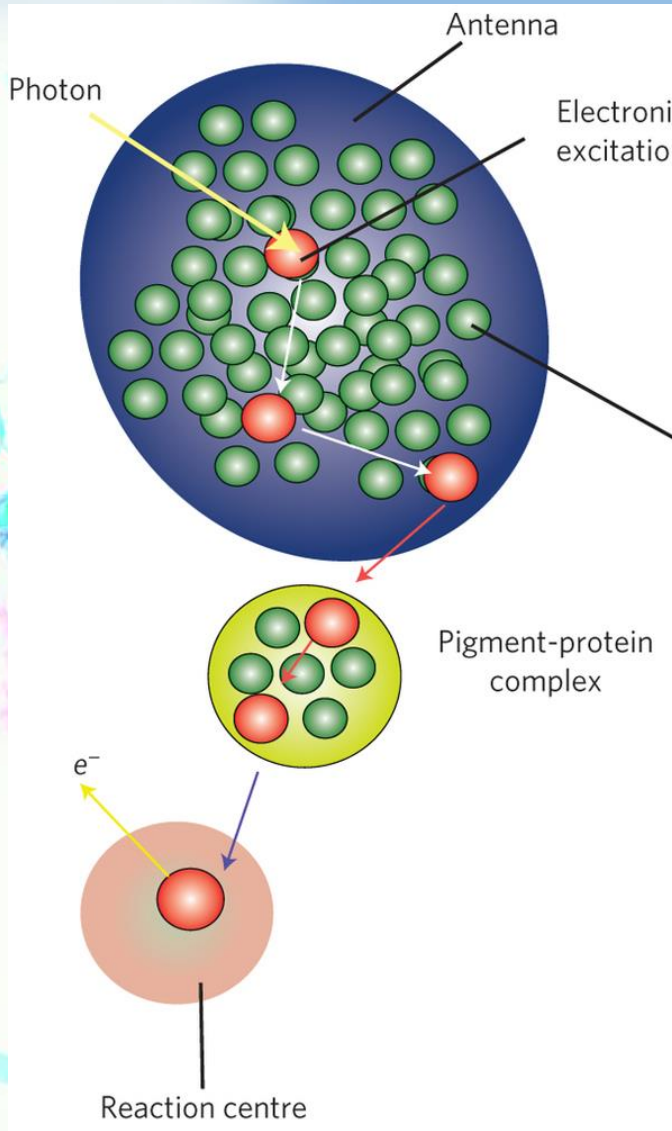
**Judith Klinman (1989):** esperimento sull'effetto isotopico cinetico nel trasferimento di protoni (dal ADH al  $\text{NAD}^+$  per formare NADH)



**FOTOSINESI CLOROFILLIANA**

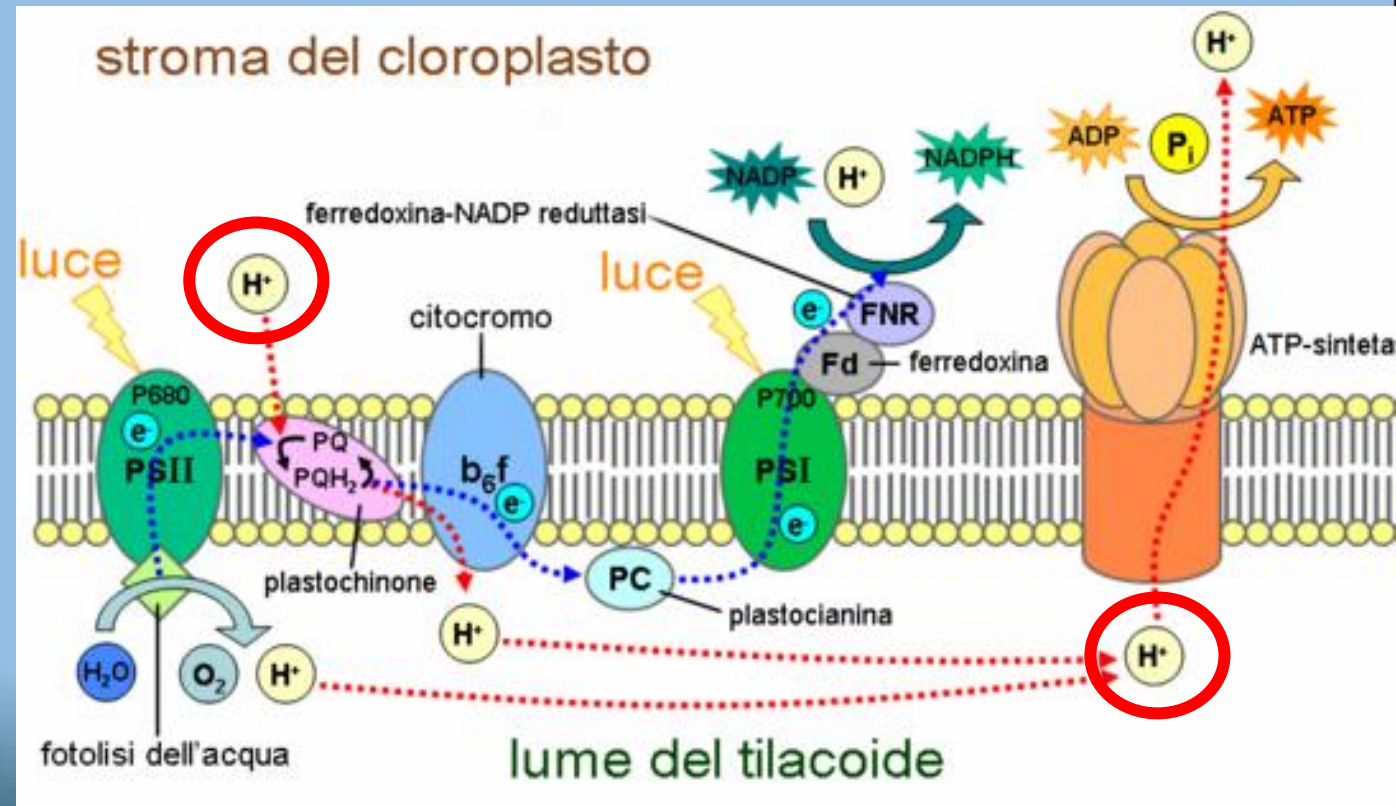



**CLOROPLASTI**



TILACOIDE

STROMA



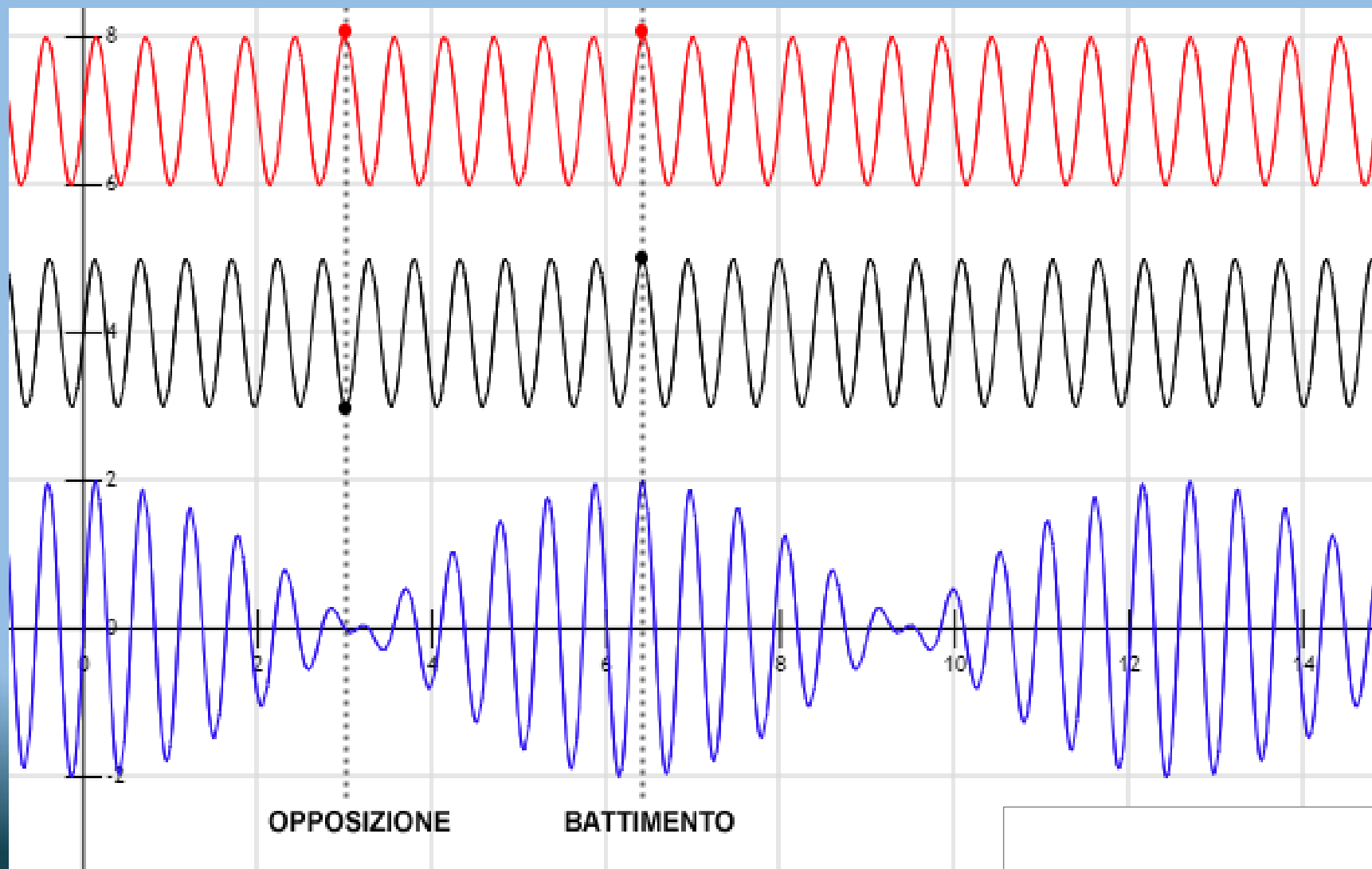


**L'eccitone raggiunge il centro di reazione  
risolvendo l'algoritmo del commesso viaggiatore:  
qual è il percorso più breve?**

**la molecola di clorofilla si comporta come un unico  
oscillatore che l'eccitone percorre come un'onda.**

**L'onda trova il percorso più breve!**

# Somma di onde di frequenza leggermente diversa: i “battimenti”





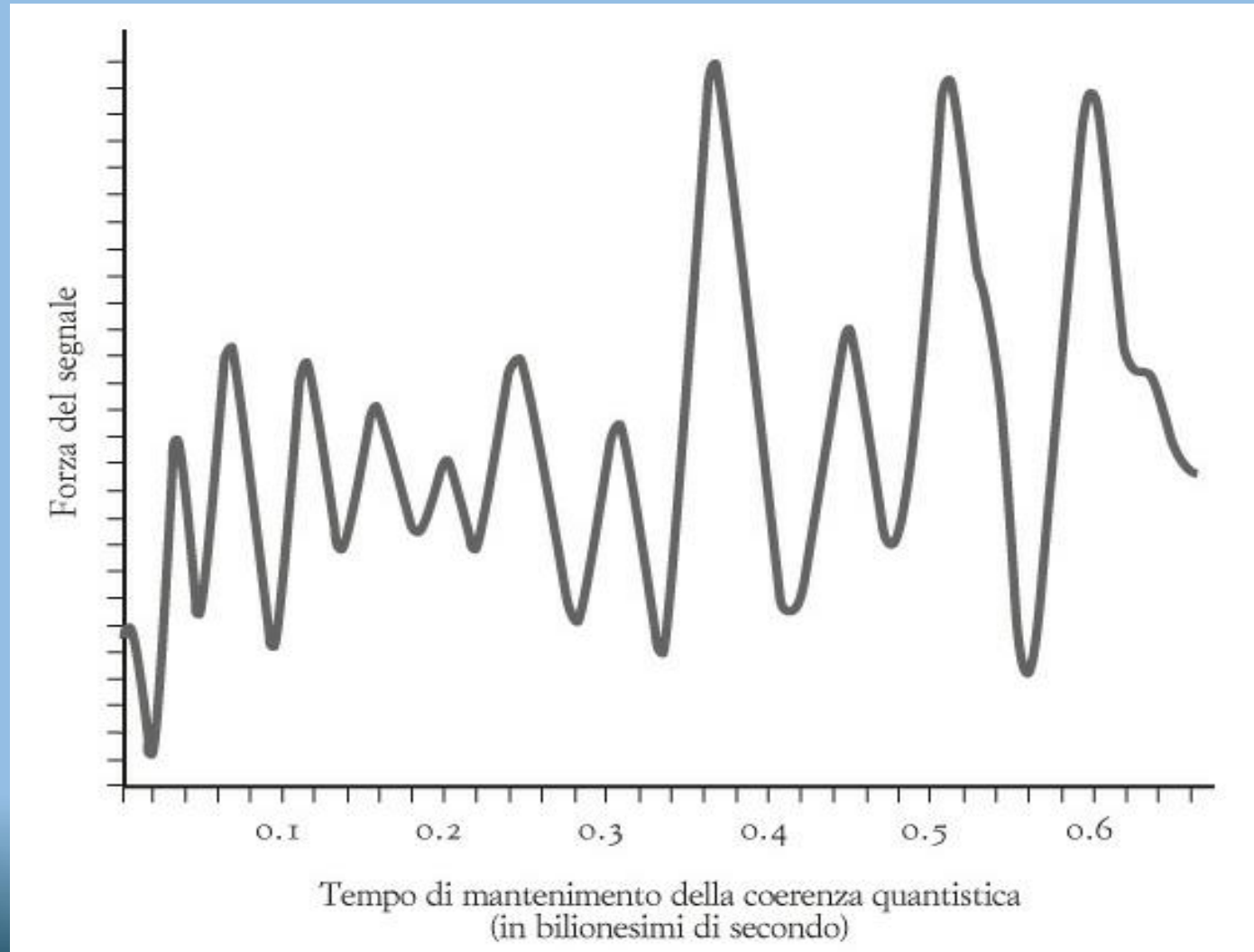
# Esperimenti chiave

**Graham Fleming (1975) e Greg Engel (2008):** *spettroscopia elettronica bidimensionale a trasformata di Fourier* (impulsi laser brevi e a brevissimo periodo) applicata a un composto fotosintetico chiamato FMO. I segnali di risposta del preparato mostravano battimenti

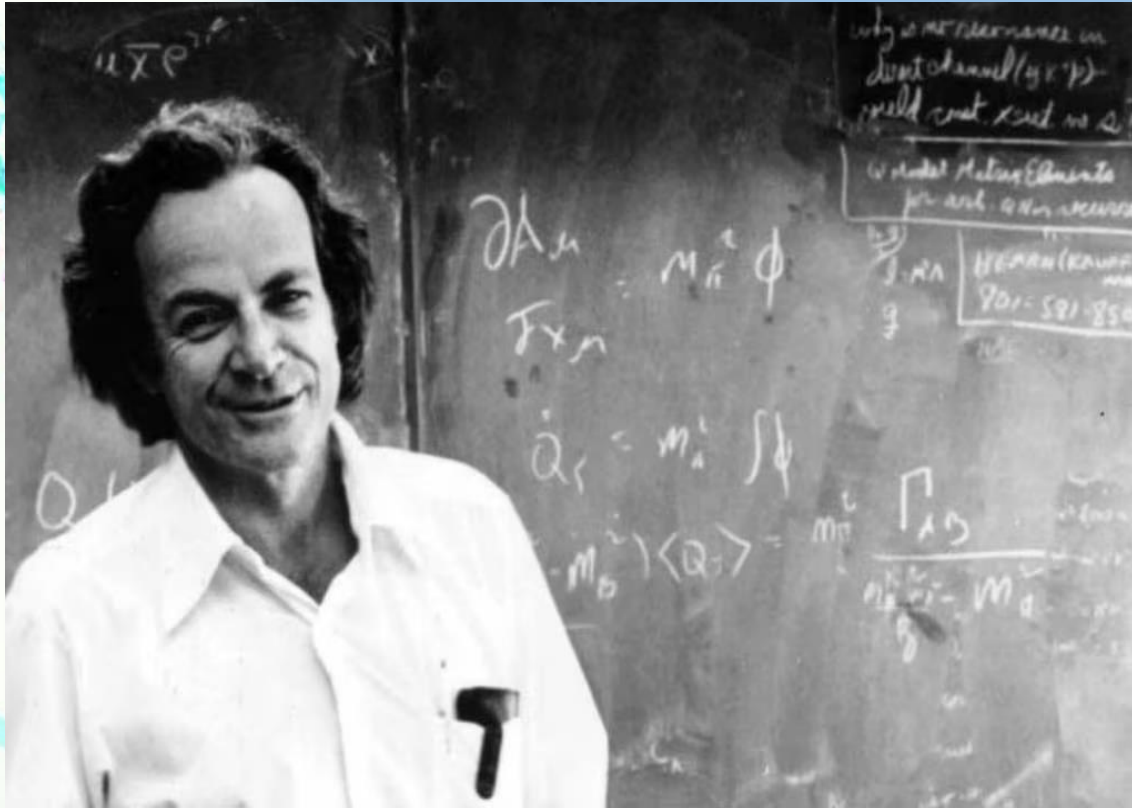
Esperimenti ripetuti in seguito hanno mostrato battimenti in organismi vegetali non solo a basse temperature ma anche a temperature tipiche dell'ambiente terrestre

**Le biomolecole vegetali sono sistemi quantistici “coerenti”**

# Battimenti quantistici di biomolecole vegetali



**"Quello che non posso creare, non lo saprò mai capire" (R. Feynman)**



**La biologia quantistica per ora è solo un tentativo di comprendere il mistero della vita nei suoi meccanismi principali. Vero o no, un fatto è certo: se non siamo in grado di generare la vita è perché non l'abbiamo capita veramente fino in fondo. Questo deve essere il motivo principale per continuare a provarci in ogni modo.**



# GRAZIE!!

