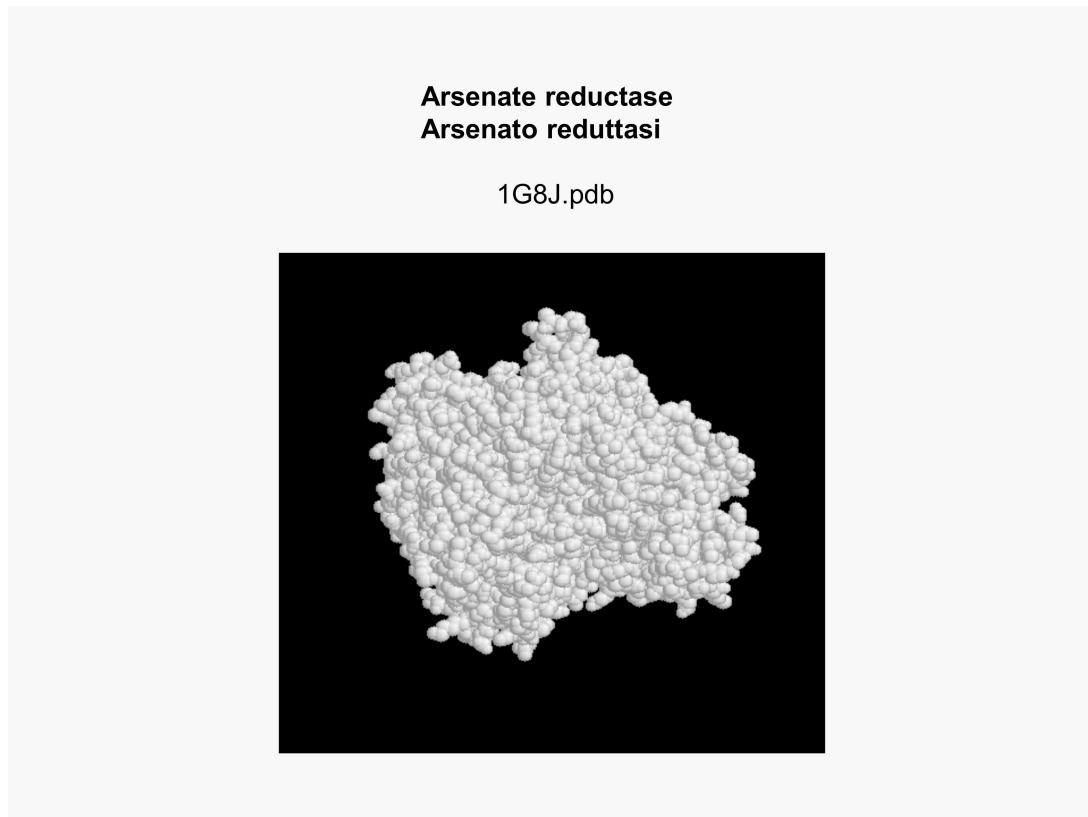


# Biofisica

## Arsenate Reductase e la sua importanza nella Biofisica Cellulare e Molecolare



La **arsenate reductase** è un enzima che gioca un ruolo fondamentale nella **biofisica cellulare e molecolare**. Questo enzima è responsabile della riduzione dell'arsenato in arsenito, una reazione fondamentale per il metabolismo delle cellule.

### Struttura e Funzione della Arsenate Reductase

La arsenate reductase è un enzima costituito da due subunità, una grande e una piccola. La subunità grande contiene il **sito attivo** dell'enzima, dove avviene la reazione di riduzione dell'arsenato. La

subunità piccola, invece, ha un ruolo **regolatorio** nell'attività dell'enzima.

L'arsenato reduttasi è in grado di convertire l'arsenato in arsenito utilizzando l'energia generata dalla **conversione del NADH in NAD+**. Questa reazione è fondamentale per il metabolismo cellulare, in quanto l'arsenato può essere tossico per le cellule se non viene convertito in arsenito.

## **Importanza della Arsenate Reductase nella Biofisica Cellulare e Molecolare**

La arsenate reductase è un enzima fondamentale per il metabolismo cellulare, in quanto è coinvolta nella **regolazione dei livelli di arsenato** all'interno delle cellule. L'arsenato è presente nell'ambiente e può accumularsi all'interno delle cellule, causando danni al DNA e alle proteine se non viene convertito in arsenito.

Inoltre, la arsenate reductase è coinvolta nella **produzione di energia cellulare attraverso la respirazione anaerobica**. Questa reazione è fondamentale per le cellule che vivono in ambienti poveri di ossigeno, come i batteri anaerobi.

## **Conclusione**

In conclusione, la arsenate reductase è un enzima fondamentale per la regolazione dei livelli di arsenato all'interno delle cellule e per la produzione di energia cellulare. La sua struttura e funzione sono importanti per la comprensione della biofisica cellulare e molecolare.

# Proprietà fisiche di una proteina globulare con massa 100 kDa

## Proprietà fisiche di una proteina globulare con massa 100 kDa

1 Dalton=1/12 la massa di un atomo  $^{12}\text{C}$  =  $1.66 \times 10^{-27}$  Kg

Massa (M)	$166 \times 10^{-24}$ Kg	massa di 1 mole/Numero di Avogadro
Densità ( $\rho$ )	$1.38 \times 10^3$ Kg/m <sup>3</sup>	1.38 volte la densità dell'acqua
Volume (V)	$120 \text{ nm}^3$	$V=M/\rho$
Raggio (r)	3 nm	assumendo che sia sferica ( $V=4\pi/3 r^3$ )
Coeff. di resistenza viscosa ( $\gamma$ ) (in acqua a 20°C)	60 pNs/m	dalla legge di Stokes ( $\gamma=6\pi r\eta$ ; $\eta=10^{-3}$ Pa·s)
Coeff. di diffusione (D)	$67 \mu\text{m}^2/\text{s}$	dalla relazione di Einstein ( $D=K_B T/\gamma$ ; $K_B=1.38 \times 10^{-16}$ J/K)
Velocità termica Media	8.6 m/s	dal principio di equipartizione dell'energia ( $1/2 mv^2 = 3/2 K_B T$ )

è la velocità fra un urto e un altro, quindi la velocità  
è questo ma lo potremo risalire fatta per via degli urti

La conoscenza delle proprietà fisiche di una proteina è **fondamentale** per la comprensione della sua funzione biologica all'interno delle cellule. In questo caso, analizzeremo le proprietà fisiche di una proteina globulare con **massa di 100 kDa**.

# **Massa e Densità della Proteina**

La **massa** della proteina globulare è di  **$166 \times 10^{-4}$  Kg** per mole. Questo significa che la massa di una singola molecola di proteina è di  **$166 \times 10^{-4}$  Kg** diviso il numero di Avogadro. La **densità** della proteina è di  **$1.38 \times 10^3$  Kg/m<sup>3</sup>**, che è circa 1.38 volte la densità dell'acqua.

# Volume e Raggio della Proteina

Il **volumne** della proteina è di **120 nm<sup>3</sup>**, calcolato dividendo la massa della proteina per la sua densità. Si assume che la proteina

sia sferica, quindi il **raggio** della proteina è di **3 nm**, calcolato utilizzando la formula per il volume di una sfera ( $V = 4/3 \pi r^3$ ).

## Coefficiente di Resistenza e di Diffusione

Il **coefficiente di resistenza** della proteina (**Y**) è di **60 pNs/m**, calcolato utilizzando la legge di Stokes ( $Y = 6\pi \eta r n$ ; dove  $\eta$  è la viscosità del fluido, in questo caso acqua a 20°C, pari a 108 Pa:s).

Il **coefficiente di diffusione** (**D**) della proteina è di **67  $\mu\text{m}^2/\text{s}$** , calcolato utilizzando la relazione di Einstein ( $D = k_B T/Y$ ; dove  $k_B$  è la costante di Boltzmann e  $T$  è la temperatura, in questo caso 20°C).

## Velocità Termica e Media dell'Energia

La **velocità termica** della proteina è di **8.6 m/s**, calcolata utilizzando il principio di equipartizione, che stabilisce che la velocità media delle molecole di una sostanza è proporzionale alla radice quadrata della temperatura assoluta. La **media dell'energia** della proteina è calcolata come  $1/2 mv^2 = 3/2 k_B T$ , dove  $m$  è la massa della proteina e  $v$  è la sua velocità. Questa equazione stabilisce che la media dell'energia di una proteina è proporzionale alla temperatura assoluta.

# Forze a livello della singola molecola

## Forze a livello della singola molecola

### Forze viscose

STATO STAZIONARIO = le grandezze coinvolte non cambiano nel tempo

Se un oggetto è mantenuto fermo in un liquido che scorre oppure si muove in un fluido stazionario, allora esso è soggetto a una forza viscosa (*drag*) da parte del fluido. Tale forza è proporzionale alla velocità relativa  $v$  tra oggetto e fluido, secondo la relazione  $F = -\gamma \cdot v$ . La costante di proporzionalità  $\gamma$  è chiamata **coefficiente di resistenza viscosa** (*drag coefficient*). Il coefficiente di resistenza viscosa dipende dalle dimensioni e dalla forma dell'oggetto e dal **coefficiente di viscosità** del fluido,  $\eta$ .

Per una sfera di raggio  $r$  che si muove a velocità costante  $v$  attraverso un fluido di viscosità  $\eta$  il coefficiente di resistenza viscosa vale  $\gamma = 6\pi \cdot \eta \cdot r$  (**legge di Stokes**).

Le forze viscose, a livello delle proteine sono grandi in paragone alle altre forze. Per una proteina globulare con diametro circa 6 nm, e massa ~100 kDa, il coefficiente  $\gamma$  misurato tramite studi di centrifugazione a 20°C è ~60 pN·s/m, in buon accordo con la legge di Stokes.

Per il teorema dell'equipartizione dell'energia, la velocità istantanea della proteina è ~8 m/s, dovuta alle collisioni con le molecole del solvente a causa dell'agitazione termica. La forza viscosa sulla proteina risulta quindi ~ 480 pN

Da J. Howard: «Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton», 2001, Sinauer.

Le forze che agiscono a livello della singola molecola sono di **fondamentale importanza** per la comprensione dei processi biologici all'interno delle cellule. Una di queste forze è la **forza viscosa**, che si manifesta quando un oggetto si muove in un fluido o un liquido che scorre. Tale forza è proporzionale alla velocità relativa tra oggetto e fluido, ed è regolata dal **coefficiente di resistenza viscosa (drag coefficient)**  $\gamma$ . Questo coefficiente dipende dalle dimensioni e dalla forma dell'oggetto, così come dal coefficiente di viscosità del fluido in cui si muove.

### Forze vischiose in una sfera

Per una sfera di raggio  $r$  che si muove a velocità costante  $v$  attraverso un fluido di viscosità  $\eta$ , il coefficiente di resistenza viscosa è regolato dalla **legge di Stokes**, che ci dice che  $\gamma = 67:7:r$ . Questo significa che per una **proteina globulare** con diametro di circa 6 nm e massa di 100 kDa, il coefficiente  $\gamma$  misurato tramite studi di centrifugazione a 20°C è di **-60 pN-s/m**,

in accordo con la legge di Stokes. Questo valore rappresenta una forza molto grande a livello molecolare, se si considera che la velocità istantanea della proteina, dovuta alle collisioni con le molecole del solvente, è di circa **8 m/s**, come stabilito dal **teorema dell'equipartizione dell'energia**. Ciò significa che la forza viscosa sulla proteina risulta essere di circa **-480 pN**.

## Altre forze a livello molecolare

Oltre alle forze vischiose, esistono altre forze a livello molecolare che regolano il comportamento delle proteine all'interno delle cellule. Tra queste forze si annoverano le **forze elettrostatiche**, che si manifestano a causa della carica elettrica delle proteine stesse e delle molecole circostanti. Le **forze idrofobiche**, invece, regolano l'interazione tra le proteine e l'acqua, e sono fondamentali per la formazione di strutture proteiche stabili. Inoltre, le **forze di Van der Waals** regolano l'attrazione tra le molecole di proteine e sono importanti per la formazione di legami tra diversi amminoacidi.

# Forze a livello della singola molecola

## Forze a livello della singola molecola

### Forze collisionali e termiche

Se un oggetto è colpito da un altro, esso sente una forza pari alla variazione della quantità di moto ( $m \cdot v$ ) divisa per il tempo in cui tale variazione avviene:  $F = m \cdot dv/dt$ . Per esempio, la massa di una molecola d'acqua è  $\sim 30 \cdot 10^{-27}$  kg, la velocità media associata con la sua energia cinetica è  $\sim 600$  m/s, e la sua quantità di moto  $\sim 18 \cdot 10^{-24}$  kg·m/s. Se una proteina è colpita frontalmente ogni secondo da una molecola d'acqua che rimbalza all'indietro, allora la forza che la proteina sente è  $\sim 36 \cdot 10^{-24}$  N (o  $36 \cdot 10^{-12}$  pN). Questa forza è molto piccola, ma in soluzione avvengono un numero enorme di collisioni al secondo. Queste collisioni arrivano da tutte le direzioni e la forza totale con direzione casuale (chiamata forza termica), è responsabile della diffusione. Si può dimostrare che la forza termica istantanea è dell'ordine delle forze viscose: per una proteina di 100 kDa è quindi  $\sim 500$  pN.

In pratica si tratta dello stesso  
lavoro di Newton,  $F = massa \times$   
variazione  
della  
velocità  
nel tempo

Da J. Howard: «Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton», 2001, Sinauer.

Le forze a livello della singola molecola sono fondamentali per la comprensione dei processi biologici all'interno delle cellule. Una di queste forze è la **forza collisionale**, che si verifica quando un oggetto viene colpito da un altro. Questa forza è determinata dalla quantità di moto dell'oggetto e dal tempo in cui avviene la variazione della quantità di moto. Per esempio, una molecola d'acqua ha una massa di circa  $3 \times 10^{-26}$  kg, una velocità media di circa 600 m/s e una quantità di moto di circa  $1,8 \times 10^{-24}$  kg·m/s. Se una proteina viene colpita frontalmente ogni secondo da una molecola d'acqua che rimbalza all'indietro, la forza che la proteina sente è di circa  $3,6 \times 10^{-13}$  N (o 0,36 pN). Sebbene questa forza sia molto piccola, il gran numero di collisioni che avvengono in soluzione fa sì che la forza totale (nota come **forza termica**) sia responsabile della diffusione delle molecole.

## Forze termiche

La **forza termica** è una forza casuale che agisce su una particella o una molecola in soluzione a causa delle collisioni con le altre particelle o molecole. Questa forza agisce in tutte le direzioni ed è responsabile della diffusione delle molecole. La forza termica istantanea può essere calcolata utilizzando il teorema dell'equipartizione dell'energia, il quale ci dice che l'energia cinetica media di una particella o di una molecola è proporzionale alla temperatura assoluta del sistema. Per una proteina di 100 kDa, la forza termica istantanea è dell'ordine di grandezza delle **forze viscose**, ovvero circa -500 pN. Questo significa che, nonostante la forza termica sia casuale e agisca in tutte le direzioni, essa è comunque abbastanza forte da influenzare il comportamento delle molecole in soluzione.

## Forze viscose

Le **forze viscose** sono le forze che si manifestano quando un oggetto si muove in un fluido o in un liquido che scorre. Queste forze sono proporzionali alla velocità relativa tra l'oggetto e il fluido e sono regolate dal **coefficiente di resistenza viscosa**. Per una sfera di raggio  $r$  che si muove a velocità costante  $v$  attraverso un fluido di viscosità  $\eta$ , il coefficiente di resistenza viscosa è regolato dalla legge di Stokes, che ci dice che  $y = 6\pi\eta r v$ , dove  $\eta$  è il coefficiente di viscosità del fluido. Per una proteina globulare di circa 6 nm di diametro e di massa 100 kDa, il coefficiente  $y$  è di circa -60 pN-s/m, in accordo con la legge di Stokes. Tuttavia, come abbiamo visto, la forza termica istantanea è ancora più grande di quella viscosa, il che significa che la forza termica è l'effetto dominante per le molecole in soluzione.

## Conclusioni

In sintesi, le forze a livello molecolare sono fondamentali per la comprensione dei processi biologici all'interno delle cellule. Le forze collisionali e termiche sono responsabili della diffusione delle molecole in soluzione, mentre le forze viscose regolano il

movimento delle proteine in un fluido o in un liquido che scorre. La forza termica istantanea è abbastanza forte da influenzare il comportamento delle molecole, nonostante sia casuale e agisca in tutte le direzioni.

# Forze a livello della singola molecola

## Forze a livello della singola molecola

### Forze ottiche

Un altro esempio di forze collisionali è la pressione ottica. Un fotone ha una quantità di moto (*momentum*), e quindi esercita una forza quando è assorbito o diffratto da un oggetto. La quantità di moto di un fotone è  $p = \frac{h}{\lambda} v/c = h/(n \cdot \lambda)$ , dove  $h$  è la costante di Planck,  $v$  è la frequenza della radiazione,  $c$  la velocità della luce,  $n$  l'indice di rifrazione e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda (nel vuoto).

Quindi, se un oggetto in acqua ( $n = 1.33$ ) assorbe un fotone verde ( $\lambda = 500$  nm) ogni secondo, la forza che agisce su di esso è  $10^{-15}$  pN, una forza molto piccola. Anche se la molecola assorbisse  $10^9$  fotoni al secondo (come forniti da un laser molto potente) la forza ottica sarebbe ancora soltanto  $10^{-6}$  pN.

Da J. Howard: «Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton», 2001, Sinauer.

Le forze a livello della singola molecola sono **fondamentali** per la comprensione dei processi biologici all'interno delle cellule. Un esempio di forza collisionale è la **pressione ottica**, che si verifica quando un fotone viene assorbito o diffratto da un oggetto. La quantità di moto di un fotone è data dalla **costante di Planck** divisa per la lunghezza d'onda e la velocità della luce. Se un oggetto in acqua (con un indice di rifrazione di 1,33) assorbe un fotone verde ad una lunghezza d'onda di 500 nm ogni secondo, la forza che agisce su di esso è di **10^-16 N**, ovvero una forza molto piccola. Tuttavia, se la molecola assorbisse  $10^{10}$  fotoni al secondo (come forniti da un laser molto potente), la forza ottica sarebbe ancora soltanto di **10^-9 N**.

### Forze elettromagnetiche

Le forze elettromagnetiche sono un altro **importante** esempio di forze a livello della singola molecola. Queste forze sono generate dalla distribuzione di **carica elettrica** all'interno delle molecole e

possono influenzare il comportamento delle molecole in soluzione. Ad esempio, le forze elettromagnetiche possono essere responsabili della formazione di **legami chimici** tra le molecole, come nel caso della formazione di legami idrogeno tra le molecole d'acqua. Le forze elettromagnetiche possono anche essere responsabili della **repulsione** tra molecole con cariche simili, come nel caso della repulsione tra due molecole di carica negativa.

## Forze di van der Waals

Le forze di van der Waals sono un'altra importante categoria di forze a livello della singola molecola. Queste forze sono causate dalla distribuzione di carica elettrica all'interno delle molecole e sono responsabili dell'**attrazione** tra le molecole. Le forze di van der Waals si dividono in tre categorie: forze di **dispersione**, forze **dipolo-dipolo** e forze di dipolo istantaneo-dipolo indotto. Le forze di dispersione sono causate dalle **fluttuazioni** di carica all'interno delle molecole e sono responsabili dell'attrazione tra molecole non polari. Le forze dipolo-dipolo sono causate dall'**orientamento dei dipoli** all'interno delle molecole e sono responsabili dell'attrazione tra molecole polari. Le forze di dipolo istantaneo-dipolo indotto sono causate dall'**induzione di un dipolo** in una molecola non polare da parte di una molecola polare e sono responsabili dell'attrazione tra molecole polari e non polari.

## Conclusioni

In sintesi, le forze a livello molecolare sono fondamentali per la comprensione dei processi biologici all'interno delle cellule. Le forze collisionali, ottiche, elettromagnetiche e di van der Waals sono solo alcune delle forze che si verificano a livello molecolare e che possono influenzare il comportamento delle molecole in soluzione. Comprendere queste forze e come interagiscono tra di loro è fondamentale per comprendere molti dei processi biologici che avvengono all'interno delle cellule.

# Forze a livello della singola molecola

## Forze a livello della singola molecola

### Forze gravitazionali

Un oggetto di massa  $m$  è soggetto a una forza gravitazionale  $F = m \cdot g$ , dove  $g$  è l'accelerazione di gravità alla superficie terrestre:  $g \sim 9.8 \text{ m/s}^2$ .

Con una massa di  $166 \cdot 10^{-24} \text{ kg}$ , una proteina di 100 kDa sente una forza gravitazionale di soli  $1.6 \cdot 10^{-9} \text{ pN}$ . Quindi, a livello della singola molecola, le forze gravitazionali sono così piccole da poter essere trascurate.

### Forze in una centrifuga

Un oggetto che ruota in una centrifuga sente una forza (apparente) centrifuga pari a  $m \cdot a_c$ . Un'ultracentrifuga ha la capacità di generare una accelerazione centrifuga  $a_c$  100 000 volte quella di gravità.

Le forze centrifughe associate alla solita proteina di 100 kDa sono ancora di piccola entità:  $\sim 160 \cdot 10^{-18} \text{ N} = 160 \cdot 10^{-6} \text{ pN}$ , ma grandi abbastanza da causare una sedimentazione della proteina a una velocità media di  $\sim 3 \text{ } \mu\text{m/s}$ .

La lenta velocità di sedimentazione è sovrapposta al rapido moto termico. A questa velocità, la proteina sedimenterà attraverso una distanza di 100 mm (una tipica lunghezza di un tubo da centrifuga) in circa 10 ore.

Da J. Howard: «Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton», 2001, Sinauer.

Nella **biofisica cellulare e molecolare**, le forze a livello della singola molecola sono fondamentali per comprendere i processi biologici che avvengono all'interno delle cellule. Le forze gravitazionali, ad esempio, sono estremamente piccole a livello molecolare e possono essere trascurate. Infatti, una proteina di massa 100 kDa sente una **forza gravitazionale** di soli  $1.6 \times 10^{-17} \text{ N}$ , che è troppo piccola per essere rilevata. Tuttavia, le **forze centrifughe**, che sono responsabili della sedimentazione delle molecole in soluzione, possono essere utilizzate per separare le molecole in base alla loro massa e densità.

In una **centrifuga**, un oggetto che ruota sente una **forza apparente centrifuga** proporzionale alla sua massa. In un'**ultracentrifuga**, che ha la capacità di generare **accelerazioni centrifughe** 100.000 volte maggiori di quelle della gravità, le forze centrifughe possono permettere la sedimentazione delle proteine a una velocità media di circa 3 um/s. Tuttavia, anche in questo caso, le forze centrifughe associate alla proteina di 100 kDa

sono ancora di piccola entità, pari a  $1.6 \times 10^{-16}$  N ( $160 \times 10^{-18}$  pN), ma sono comunque sufficientemente grandi da causare la sedimentazione della proteina.

La sedimentazione delle proteine in una centrifuga è influenzata anche dal **rapido moto termico** delle molecole in soluzione. Ad una velocità di sedimentazione di circa 3 um/s, la proteina sedimenterebbe attraverso una distanza di 100 mm (una tipica lunghezza di un tubo da centrifuga) in circa 10 ore. Questo processo può essere utilizzato per separare le proteine in base alla loro massa e densità, consentendo una migliore comprensione delle loro proprietà strutturali e funzionali.

In generale, le forze a livello molecolare possono influenzare il comportamento e le proprietà delle molecole in soluzione. Comprendere queste forze e come interagiscono tra di loro è fondamentale per comprendere i processi biologici che avvengono all'interno delle cellule.

# Forze a livello della singola molecola

## Forze a livello della singola molecola

### Forze magnetiche

Le forze magnetiche sono molto piccole a livello molecolare: le molecole interagiscono molto debolmente con i campi magnetici. Per esempio, la massima forza su un protone (il nucleo con il momento magnetico più grande) nei più potenti macchinari per l'**NMR** è dell'ordine di  $10^{-12}$  pN. Quindi anche per una grande proteina con 3000 aminoacidi e 60000 atomi, la forza magnetica è minore di  $10^{-6}$  pN.

Da J. Howard: «Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton», 2001, Sinauer.

Le **forze magnetiche**, una delle forze a livello molecolare, sono estremamente piccole e deboli a livello molecolare. Le molecole interagiscono molto debolmente con i campi magnetici, il che rende difficile rilevare questa forza. Ad esempio, la massima forza su un protone (il nucleo con il momento magnetico più grande) nei più potenti macchinari per l'**NMR** (risonanza magnetica nucleare) è dell'ordine di  **$10^{-10}$  pN**. Questo significa che anche per una grande proteina con **3000 aminoacidi** e **60000 atomi**, la forza magnetica è inferiore a  **$10^{-8}$  pN**, che è molto piccola e trascurabile.

Tuttavia, ci sono molte altre forze a livello molecolare che hanno un ruolo importante nei processi biologici. Ad esempio, la **forza gravitazionale**, che è anch'essa molto piccola a livello molecolare, può essere trascurata nella maggior parte dei casi. Al contrario, le **forze elettrostatiche** e le **forze di van der Waals**, che sono influenzate dalle cariche e dalla distribuzione della

densità elettronica nei composti molecolari, sono molto importanti per la formazione e la stabilità delle molecole biologiche.

Le **forze centrifughe**, che sono responsabili della sedimentazione delle molecole in soluzione, possono essere utilizzate per separare le molecole in base alla loro massa e densità. In una **centrifuga**, un oggetto che ruota sente una **forza apparente centrifuga** proporzionale alla sua massa. In un'**ultracentrifuga**, le forze centrifughe possono permettere la sedimentazione delle proteine a una velocità media di circa **3 um/s**. Questo processo può essere utilizzato per separare le proteine in base alla loro massa e densità, consentendo una migliore comprensione delle loro proprietà strutturali e funzionali.

In generale, le forze a livello molecolare possono influenzare il comportamento e le proprietà delle molecole in soluzione. Comprendere queste forze e come interagiscono tra di loro è fondamentale per comprendere i processi biologici che avvengono all'interno delle cellule.

# Forze elettrostatiche

## Forze a livello della singola molecola

### Forze elettrostatiche

Una particella con carica elettrica  $q$  in un campo elettrico  $E$  sente una forza  $F = q \cdot E$ .  
Per esempio, uno ione monovalente come il sodio, con carica  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , si muove attraverso un canale ionico nella membrana cellulare, in un campo elettrico di  $15 \cdot 10^6 \text{ V/m}$  ( $60 \text{ mV}$  di differenza di potenziale attraverso uno spessore di  $4 \text{ nm}$ ), spinto da una forza di  $2.4 \text{ pN}$ .  
Una forza simile si esercita tra due ioni monovalenti in acqua separati da una distanza di  $1 \text{ nm}$ . La forza sarà minore in una soluzione salina a causa dell'effetto di schermo delle cariche, e maggiore all'interno delle proteine dove la costante dielettrica ha valori bassi.

Da J. Howard: «Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton», 2001, Sinauer.

Le **forze elettrostatiche** sono una delle forze a livello molecolare più importanti in **biofisica cellulare e molecolare**. Una particella con carica elettrica  $q$  in un campo elettrico  $E$  sente una forza  $F = q \cdot E$ . Ad esempio, uno ione monovalente come il sodio, con carica di  **$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$** , si muove attraverso un canale ionico nella membrana cellulare, in un campo elettrico di  **$15 \times 10^6 \text{ V/m}$**  ( $60 \text{ mV}$  di differenza di potenziale attraverso uno spessore di  $4 \text{ nm}$ ), spinto da una forza di  **$2.4 \text{ pN}$** .

Le forze elettrostatiche si esercitano anche tra due ioni monovalenti separati da una distanza di  **$1 \text{ nm}$** . In questo caso, la forza è molto simile a quella esercitata sull'ione sodio nel canale ionico. La forza elettrostatica è minore in una soluzione salina a causa dell'**effetto di schermo** delle cariche, ovvero la riduzione della forza elettrostatica a causa della presenza di altre particelle cariche nella soluzione. Tuttavia, all'interno delle proteine dove la costante dielettrica è bassa, la forza elettrostatica è maggiore.

Le forze elettrostatiche svolgono un ruolo fondamentale nella **struttura e nella funzione** delle molecole biologiche. Ad esempio, nella struttura delle proteine, le cariche elettriche sui vari **residui aminoacidici** possono attirare o respingere le altre parti della proteina, contribuendo alla sua stabilità tridimensionale. Inoltre, le interazioni elettrostatiche tra le proteine e altre molecole possono influire sulla loro funzione biologica, come la regolazione dell'attività enzimatica e la trasmissione del segnale cellulare.

# Forze elastiche

## Forze a livello della singola molecola

### Forze elastiche

Un oggetto connesso a una molla di rigidità  $k$ , estesa per una distanza  $x$  dalla sua condizione di riposo, subisce una forza  $F = k \cdot x$

La rigidità di una proteina motrice (per sempio miosina, kinesina, dineina) è dell'ordine di grandezza di  $1 \text{ mN/m} = 1 \text{ pN/nm}$ . Se la proteina è deformata per un'estensione di  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ , una distanza consistente con la dimensione della proteina, allora la forza elastica esercitata dalla proteina è  $F = 1 \text{ pN/nm} \cdot 1 \text{ nm} = 1 \text{ pN}$

Da J. Howard: «Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton», 2001, Sinauer.

Le **forze elastiche** sono un'altra delle forze a livello molecolare importanti in **biofisica cellulare e molecolare**. Quando un oggetto è connesso a una molla di rigidità  $K$  ed esteso per una distanza  $x$  dalla sua condizione di riposo, subisce una forza  $\mathbf{F} = -Kx$ . La rigidità di una proteina motrice, come la miosina, kinesina o dineina, è dell'ordine di grandezza di  $1 \text{ mN/m} = 1 \text{ pN/nm}$ . Se la proteina è deformata per un'estensione di  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ , una distanza consistente con la dimensione della proteina, allora la forza elastica esercitata dalla proteina è  $\mathbf{F} = 1 \text{ pN/nm} * 1 \text{ nm} = 1 \text{ pN}$ .

Le forze elastiche sono importanti nella funzione delle proteine motorie, come la miosina, che generano forza attraverso la trasformazione di energia chimica in energia meccanica. La miosina, ad esempio, si lega all'actina e usa l'ATP per muoversi lungo il filamento di actina e generare la forza necessaria per il movimento muscolare. La rigidità della proteina miosina è

essenziale per la sua funzione motoria, poiché una maggiore rigidità aumenta la forza generata dalla proteina.

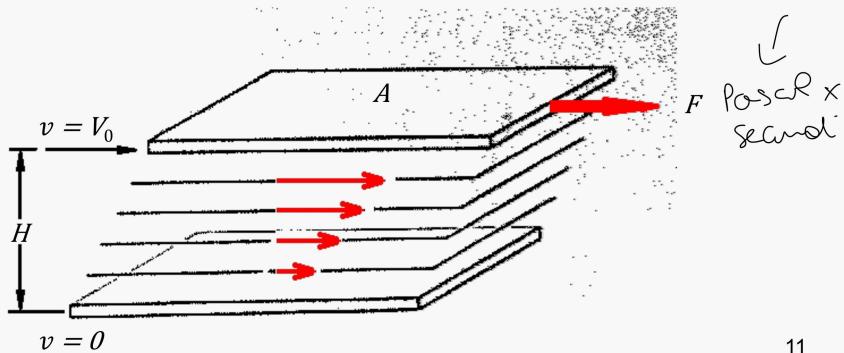
Le forze elastiche sono anche importanti in altri contesti biologici, come la deformazione delle membrane cellulari durante la fagocitosi e la formazione di vescicole di trasporto. Inoltre, le forze elastiche possono essere utilizzate per studiare le proprietà fisiche delle proteine e delle membrane cellulari, come la loro rigidità e la loro tensione di superficie.

# Viscosità

## Viscosità

Quando due superfici parallele di area  $A$  e immerse in un fluido si muovono l'una relativamente all'altra, come nella figura, si trova sperimentalmente che la forza  $F$  necessaria per farle scorrere è proporzionale all'area  $A$  e al gradiente di velocità  $dv/dx$ . La costante di proporzionalità  $\eta$  si chiama *coefficiente di viscosità* o anche, più semplicemente, *viscosità*.

$$\frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{dv}{dx} = \eta \cdot \frac{V_0}{H} \implies \eta = \frac{F}{A} / \frac{V_0}{H} \rightarrow \text{unità di misura} = \text{Pas}$$



11

La **viscosità** è un'altra proprietà fisica importante dei fluidi nella **biofisica cellulare e molecolare**. Quando due superfici parallele di area **A** e immerse in un fluido si muovono l'una relativamente all'altra, come nella figura, si trova sperimentalmente che la forza necessaria per farle scorrere è proporzionale all'area **A** e al gradiente di velocità **dv/dx**. La costante di proporzionalità che collega la forza applicata e il gradiente di velocità è chiamata **coefficiente di viscosità** o semplicemente **viscosità**.

Il coefficiente di viscosità è una misura della resistenza di un fluido al movimento. I fluidi con una viscosità alta, come il miele, offrono una maggiore resistenza al movimento rispetto ai fluidi con una viscosità bassa, come l'acqua. La viscosità è influenzata dalla temperatura del fluido, poiché la temperatura influisce sulla mobilità delle molecole del fluido.

La viscosità dei fluidi biologici, come il **sangue**, il **liquido sinoviale** e la **linfa**, è importante per il funzionamento del corpo

umano. Ad esempio, la viscosità del sangue influisce sulla sua capacità di trasportare ossigeno e nutrienti ai tessuti del corpo. La viscosità del liquido sinoviale, che si trova nelle articolazioni, aiuta a lubrificare le articolazioni e ridurre l'attrito durante i movimenti articolari.

La viscosità è anche importante nella microscopia, poiché può influire sulla velocità di sedimentazione delle particelle e sulla mobilità delle molecole all'interno delle cellule. Inoltre, la viscosità può essere influenzata dalla presenza di proteine e altre molecole biologiche, che possono alterare le proprietà fisiche dei fluidi biologici.

# Viscosità

## Viscosità

L'unità di misura della viscosità è il **Pa·s** nel SI, mentre nel sistema cgs è il **poise**.

$$1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ poise}$$

D (DOSTRA)

Liquido	Viscosità a 20°C (mPa·s)
Acetone	0.32
Acqua	1.00
Etanolo	1.2
Olio di oliva	84
Glicerolo	1408

Liquido	Viscosità a 37°C (mPa·s)
Acqua	0.69
Plasma sanguigno	1.5
Sangue intero	4.0

12

La **viscosità** è una proprietà fisica importante dei fluidi nella **biofisica cellulare e molecolare**. L'unità di misura della viscosità è il **Pa:s-ne**, che misura la resistenza di un fluido al movimento.

In generale, i fluidi con una viscosità alta offrono una maggiore resistenza al movimento rispetto ai fluidi con una viscosità bassa. Ad esempio, l'acetone ha una viscosità molto bassa di 0,32 Pa:s-ne, mentre il sangue intero ha una viscosità molto alta di 4,0 Pa:s-ne.

Ecco alcuni esempi di viscosità di alcuni fluidi:

- **Acqua:** 1,00 Pa:s-ne
- **Etanolo:** 1,2 Pa:s-ne
- **Olio di oliva:** 84 Pa:s-ne
- **Glicerolo:** 1408 Pa:s-ne
- **Plasma sanguigno:** 1,5 Pa:s-ne

La viscosità è influenzata dalla temperatura del fluido. In generale, i fluidi diventano meno viscosi quando vengono riscaldati e più viscosi quando vengono raffreddati. Ad esempio, l'acqua ha una viscosità di 0,69 Pa:s-ne a 20 °C, ma la sua viscosità diminuisce a 0,55 Pa:s-ne a 50 °C.

La viscosità dei fluidi biologici, come il **sangue**, è importante per il funzionamento del corpo umano. Ad esempio, la viscosità del sangue influisce sulla sua capacità di fluire attraverso i vasi sanguigni e di trasportare ossigeno e nutrienti ai tessuti del corpo. La viscosità del **plasma sanguigno**, che è la parte liquida del sangue, è circa 1,5 Pa:s-ne, mentre la viscosità del **sangue intero** è circa 4,0 Pa:s-ne. La viscosità del sangue può essere influenzata da fattori come la temperatura, la pressione sanguigna e la presenza di malattie.

La viscosità dei fluidi biologici è importante anche per la microscopia, dove può influire sulla velocità di sedimentazione delle particelle e sulla mobilità delle molecole all'interno delle cellule. Inoltre, la viscosità dei fluidi biologici può essere influenzata dalla presenza di proteine e altre molecole biologiche, che possono alterare le proprietà fisiche dei fluidi biologici.

# Numero di Reynolds

## Numero di Reynolds

Un oggetto che si muove attraverso un fluido viscoso è soggetto a una forza che si oppone al suo movimento. La grandezza di questa forza dipende da come il fluido fluisce attorno all'oggetto, che a sua volta dipende dal **numero di Reynolds**, definito come segue:

$$Re = \frac{\rho Lv}{\eta}$$

dove  $\rho$  è la densità del fluido,  $L$  è la lunghezza caratteristica dell'oggetto lungo la direzione del moto,  $v$  è la velocità dell'oggetto e  $\eta$  è la viscosità.

13

Il **numero di Reynolds** è un parametro adimensionale utilizzato nella **biofisica cellulare e molecolare** per descrivere il flusso di un fluido attorno a un oggetto in movimento. Un oggetto che si muove attraverso un fluido viscoso è soggetto a una forza che si oppone al suo movimento. La grandezza di questa forza dipende da come il fluido fluisce attorno all'oggetto, che a sua volta dipende dal numero di Reynolds.

Il numero di Reynolds, indicato con **Re**, è definito come il rapporto tra la quantità di moto inerziale e la quantità di moto viscosa del fluido attorno all'oggetto. In formule, il numero di Reynolds si calcola come:

$$Re = \rho * v * L / \eta,$$

dove **p** è la densità del fluido, **y** è la velocità dell'oggetto, **L** è la lunghezza caratteristica dell'oggetto lungo la direzione del moto e **η** è la viscosità del fluido.

Il numero di Reynolds è un parametro importante perché determina il tipo di flusso che si verifica attorno all'oggetto in movimento. In particolare, quando il numero di Reynolds è basso, il flusso attorno all'oggetto è **laminare** e il fluido scorre in modo ordinato e regolare. Quando il numero di Reynolds è alto, il flusso diventa **turbolento** e il fluido scorre in modo caotico e irregolare.

Ecco alcuni esempi di numeri di Reynolds per diversi flussi:

- Flusso laminare: **Re < 2300**
- Flusso transitorio: **2300 < Re < 4000**
- Flusso turbolento: **Re > 4000**

Il numero di Reynolds ha importanti applicazioni nella biofisica cellulare e molecolare, dove viene utilizzato per descrivere il flusso di fluidi biologici come il sangue attraverso i vasi sanguigni. Inoltre, il numero di Reynolds può essere utilizzato per progettare dispositivi microfluidici, come microcanali e microvalvole, utilizzati in diversi campi, come la diagnostica medica e la ricerca biologica.

# Biofisica cellulare e molecolare

## Numero di Reynolds

Oggetto	Dimensione	Velocità	Densità del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosità del fluido (Pa·s)	Numero di Reynolds
transatlantico	100 m	15 m/s	1000	10 <sup>-3</sup>	1.5·10 <sup>9</sup>
nuotatore	2 m	1 m/s	1000	10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>6</sup>
ape	10 mm	0.14 m/s	1.3	18·10 <sup>-6</sup>	100
proteina	6 nm	8 m/s	1000	10 <sup>-3</sup>	0.05
batterio	2 μm	25 μm/s	1000	10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-5</sup>

14

La **biofisica cellulare e molecolare** studia i processi biologici a livello molecolare e cellulare utilizzando principi e tecniche della fisica. In questo campo di ricerca, sono studiati diversi fenomeni biologici, come ad esempio il movimento di un **nuotatore** in un fluido, la locomozione di un **batterio**, il volo di un'**ape**, la struttura di una **proteina** e il flusso di un fluido in un **transatlantico**. Per descrivere questi fenomeni, i ricercatori utilizzano diversi strumenti e tecniche, tra cui il **numero di Reynolds**.

Il numero di Reynolds è un parametro adimensionale che descrive la transizione tra il flusso laminare e il flusso turbolento di un fluido attorno a un oggetto in movimento. In particolare, il numero di Reynolds dipende dalla **densità del fluido**, dalla **velocità dell'oggetto**, dalla **viscosità del fluido** e dalla **lunghezza caratteristica dell'oggetto**. Ad esempio, il numero di Reynolds per un nuotatore che si muove in acqua è di circa **1.5 x 10^9**, mentre per un batterio che nuota in un fluido viscoso è di circa **0.05**.

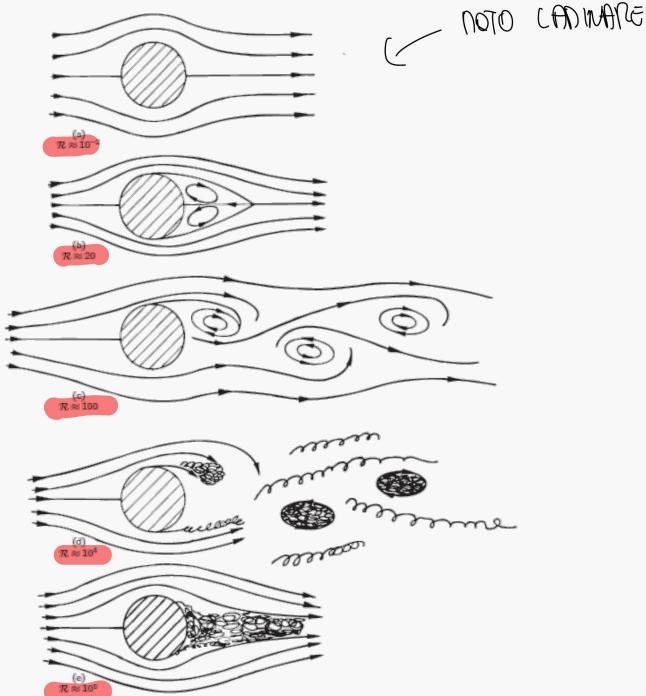
Ecco alcuni esempi di numeri di Reynolds per diversi fenomeni biologici:

- Nuotatore: **1.5 x 10^9**
- Transatlantico: **100**
- Batterio: **0.05**
- Proteina: **5 x 10^10**
- Ape: **2 x 10^8**

Il numero di Reynolds è un parametro importante nella biofisica cellulare e molecolare perché descrive il comportamento di un fluido attorno a un oggetto in movimento. Questo parametro viene utilizzato per progettare dispositivi microfluidici, per comprendere il flusso di fluidi biologici come il sangue attraverso i vasi sanguigni e per studiare la locomozione di organismi microscopici come i batteri. Inoltre, il numero di Reynolds è uno dei parametri utilizzati per descrivere i processi di trasporto di molecole attraverso le **membrane cellulari**.

# Biofisica cellulare e molecolare

Flussi attorno a un cilindro per vari valori del numero di Reynolds



Il campo della **biofisica cellulare e molecolare** utilizza i principi della fisica per comprendere i processi biologici a livello molecolare e cellulare. Un aspetto importante della biofisica cellulare e molecolare è lo studio dei **flussi di fluidi** attorno agli oggetti in movimento, come ad esempio un cilindro. In particolare, i ricercatori utilizzano il **numero di Reynolds** per descrivere il comportamento del fluido attorno all'oggetto in movimento.

Il numero di Reynolds è un parametro adimensionale che descrive il rapporto tra le forze inerziali e le forze viscose in un fluido in movimento. In altre parole, il numero di Reynolds indica se il flusso del fluido sarà **laminare o turbolento**. Ad esempio, un numero di Reynolds basso indica che il flusso sarà laminare, mentre un numero di Reynolds alto indica che il flusso sarà turbolento.

Per studiare i flussi di fluidi attorno agli oggetti in movimento, i ricercatori utilizzano diverse tecniche sperimentali, come ad

esempio la **velocimetria a particelle** (o PIV, Particle Image Velocimetry). La PIV è una tecnica non invasiva che permette di misurare la velocità del fluido in un piano bidimensionale utilizzando immagini di particelle di traccianti luminosi. In questo modo, è possibile ottenere informazioni dettagliate sul flusso del fluido attorno all'oggetto in movimento.

Inoltre, i ricercatori utilizzano anche la **dinamica molecolare** per studiare il comportamento delle **molecole biologiche** come le proteine e gli acidi nucleici. La dinamica molecolare è una tecnica di simulazione al computer che permette di studiare il movimento delle molecole e le loro interazioni con il loro ambiente. Questa tecnica è utilizzata per comprendere come le molecole biologiche si muovono e interagiscono con altre molecole all'interno delle **cellule**.

In sintesi, la biofisica cellulare e molecolare è un campo di ricerca che utilizza i principi della fisica per comprendere i processi biologici a livello molecolare e cellulare. Lo studio dei flussi di fluidi attorno agli oggetti in movimento e la dinamica molecolare sono solo alcune delle tecniche utilizzate per comprendere il comportamento delle molecole biologiche e dei fluidi all'interno del corpo umano.

# Numero di Reynolds

## Numero di Reynolds

$$Re = \frac{\rho Lv}{\eta}$$

Per bassi numeri di Reynolds ( $Re < 1$ ) la forza che si oppone al moto dell'oggetto è proporzionale alla velocità secondo il coefficiente di resistenza viscosa  $\gamma$ .

$$F = -\gamma v = -6\pi\eta r v$$

Per una sfera di raggio  $r$  che si muove a velocità  $v$  nel fluido, la forza è data dalla **legge di Stokes**:

$$F = -6\pi\eta r v$$

Quindi

$$\gamma = 6\pi\eta r$$

16

Il **numero di Reynolds** è un parametro adimensionale utilizzato nella biofisica cellulare e molecolare per descrivere il comportamento del fluido attorno agli oggetti in movimento, come ad esempio una sfera di raggio  $r$  che si muove a velocità  $v$  nel fluido.

Per bassi numeri di Reynolds (**Re < 1**), la forza che si oppone al moto dell'oggetto è proporzionale alla velocità secondo il coefficiente di resistenza viscosa  $\gamma$ . La forza è data dalla legge di Stokes, che per una sfera di raggio  $r$  che si muove a velocità  $v$  nel fluido è espressa come:

$$F = -6\pi\eta r v$$

dove  $\eta$  rappresenta la viscosità del fluido.

In generale, il numero di Reynolds indica se il flusso del fluido attorno all'oggetto in movimento sarà laminare o turbolento. Se il

numero di Reynolds è basso, il flusso sarà laminare e il fluido si muoverà in strati paralleli senza turbolenze. Se, invece, il numero di Reynolds è alto, il flusso sarà turbolento e il fluido si muoverà in modo caotico.

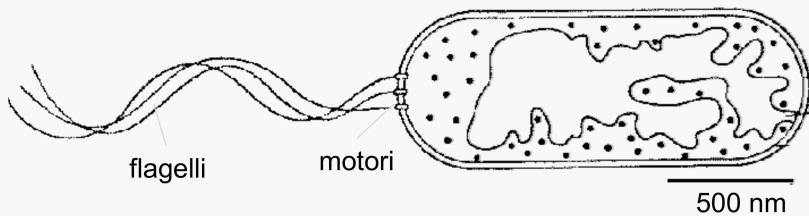
Inoltre, il numero di Reynolds è utilizzato per calcolare la forza di resistenza che il fluido oppone all'oggetto in movimento. La forza di resistenza dipende sia dalla viscosità del fluido che dalla geometria dell'oggetto. Ad esempio, per una sfera di raggio  $r$  che si muove a velocità  $v$  in un fluido con viscosità  $\eta$ , la forza di resistenza è data dalla legge di Stokes:

$$\mathbf{F} = -6\pi\eta rv$$

In sintesi, il numero di Reynolds è un parametro adimensionale utilizzato nella biofisica cellulare e molecolare per descrivere il comportamento del fluido attorno agli oggetti in movimento. Il numero di Reynolds è importante perché indica se il flusso del fluido sarà laminare o turbolento e permette di calcolare la forza di resistenza che il fluido oppone all'oggetto in movimento.

# Moto di un batterio

## Moto di un batterio



Consideriamo un batterio di 2  $\mu\text{m}$  di lunghezza, come ad esempio l'*E. coli*, che nuota nell'acqua a una velocità di 25  $\mu\text{m/s}$ . Per la legge di Stokes, il coefficiente di resistenza viscosa  $\gamma$  è circa 20  $\text{nN}\cdot\text{s}/\text{m}$ . Quindi per poter assicurare una velocità costante (accelerazione, o decelerazione, nulle) i motori molecolari che muovono i flagelli devono poter generare una forza di almeno  $20 \text{ nN}\cdot\text{s}/\text{m} \cdot 25 \mu\text{m} = 0.5 \text{ pN}$ , che si oppone alla forza di resistenza viscosa.

17

Il **moto di un batterio** è uno degli argomenti trattati nella biofisica cellulare e molecolare. Consideriamo un batterio di **2  $\mu\text{m}$  di lunghezza**, come ad esempio l'*E. coli*, che nuota nell'acqua a una velocità di **25  $\mu\text{m/s}$** .

Per la legge di Stokes, il coefficiente di resistenza viscosa  **$\gamma$**  è circa **20  $\text{nN}\cdot\text{s}/\text{m}$** . Ciò significa che, per poter assicurare una velocità costante (accelerazione, o decelerazione, nulle), i motori molecolari che muovono i flagelli devono poter generare una forza di almeno  **$20 \text{ nN}\cdot\text{s}/\text{m} - 25 \mu\text{m} = 0.5 \text{ pN}$** , che si oppone alla forza di resistenza viscosa.

I flagelli sono strutture filamentose presenti sulla superficie del batterio e sono responsabili del movimento del batterio stesso. Essi sono mossi dai motori molecolari, che sono costituiti da proteine specializzate chiamate **motore flagellare**. Queste proteine trasformano l'energia chimica in energia meccanica, che viene poi utilizzata per far ruotare i flagelli e muovere il batterio.

La forza necessaria per far muovere il batterio dipende dalla viscosità del fluido in cui il batterio si trova e dalle dimensioni del batterio stesso. Per batteri più grandi, ad esempio, la forza necessaria per superare la resistenza viscosa del fluido diventa sempre maggiore.

In sintesi, il **moto di un batterio** è un argomento importante nella biofisica cellulare e molecolare. La velocità di un batterio dipende dalla forza generata dai motori molecolari che muovono i flagelli e dalla resistenza viscosa del fluido in cui il batterio si trova. La comprensione del moto di un batterio può aiutare a sviluppare nuovi trattamenti per le infezioni batteriche e a comprendere meglio il funzionamento dei microorganismi.

# Moto di un batterio: la forza viscosa

## Moto di un batterio

Consideriamo lo stesso batterio dell'esempio precedente, di quanto continua a muoversi per inerzia dopo che i motori molecolari si sono fermati?

Quando i motori molecolari cessano di agire, la sola forza che agisce sul batterio è la forza viscosa. Quindi applicando la seconda legge di Newton otteniamo l'equazione del moto:

$$m \frac{dv(t)}{dt} = -\gamma \cdot v(t)$$

Questa è un'equazione differenziale, dove la derivata della funzione incognita è proporzionale alla funzione stessa. In questi casi la soluzione è un esponenziale, del tipo:

$$v(t) = v(0) \cdot \exp(-t/\tau)$$

La velocità diminuisce esponenzialmente col tempo e il parametro  $\tau$  è la **costante di tempo**, cioè misura dopo quanto tempo la funzione è diminuita a circa il **37%** del suo valore al tempo zero.

In funzione dei parametri dell'equazione differenziale scritta sopra:

$$\tau = m/\gamma$$
$$\rightarrow \text{è la soluzione dell'equazione differenziale } m \frac{dv(t)}{dt} = -\gamma \cdot v(t)$$

18

Il **moto di un batterio** è un argomento importante nella biofisica cellulare e molecolare. In questo caso, consideriamo il batterio dell'esempio precedente e ci chiediamo di quanto continua a muoversi per inerzia dopo che i motori molecolari si sono fermati.

Quando i **motori molecolari** cessano di agire, la sola forza che agisce sul batterio è la **forza viscosa**. Per calcolare il moto del batterio, possiamo applicare la **seconda legge di Newton**.

L'**equazione del moto** diventa quindi:

$$d(mv)/dt = -Rv + F$$

dove **m** è la **massa** del batterio, **v** è la sua **velocità**, **R** è il **coefficiente di resistenza viscosa**, e **F** è la **forza esterna applicata** sul batterio. Questa è un'equazione differenziale, dove la derivata della funzione incognita è proporzionale alla funzione stessa. In questi casi, la soluzione è un'**esponenziale** del tipo:

$$v(t) = v(0) - \exp(-t/\tau)$$

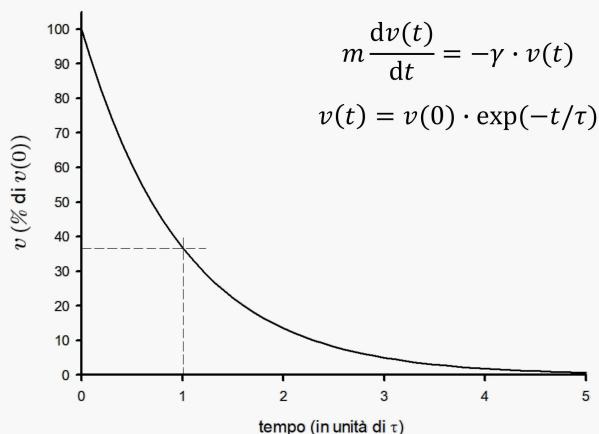
La velocità diminuisce esponenzialmente col tempo, dove il parametro  **$\tau$**  è la **costante di tempo**, cioè misura dopo quanto tempo la funzione è diminuita a circa il 37% del suo valore al tempo zero.

In funzione dei parametri dell'equazione differenziale scritta sopra, possiamo calcolare la costante di tempo  **$\tau$** . Essa dipende dalla massa del batterio, dal coefficiente di resistenza viscosa, e dalla forza esterna applicata sul batterio.

In sintesi, il **moto di un batterio** può essere descritto dall'equazione differenziale che tiene conto della forza viscosa che agisce sul batterio quando i motori molecolari si fermano. La soluzione dell'equazione differenziale è un'**esponenziale** che descrive come la velocità del batterio diminuisce col tempo. La comprensione del moto di un batterio è importante per capire il funzionamento dei microorganismi e può essere utile per lo sviluppo di nuovi trattamenti per le infezioni batteriche.

# Moto di un batterio

## Moto di un batterio



La velocità diminuisce esponenzialmente col tempo e il parametro  $\tau$  è la **costante di tempo**, cioè misura dopo quanto tempo la funzione è diminuita a circa il 37% del suo valore al tempo iniziale.

In funzione dei parametri dell'equazione differenziale scritta sopra:

$$\tau = m/\gamma$$

19

Il **moto di un batterio** è un argomento fondamentale della **biofisica cellulare e molecolare**. In particolare, lo studio del moto degli organismi microscopici come i batteri permette di comprendere il loro funzionamento e di sviluppare nuovi trattamenti per le infezioni batteriche.

Nel caso specifico del moto di un batterio, possiamo considerare l'**equazione differenziale** che descrive il suo comportamento quando i **motori molecolari** si fermano. Quando i **motori molecolari** cessano di agire, la sola forza che agisce sul batterio è la **forza viscosa**. Applicando la **seconda legge di Newton** possiamo ottenere l'**equazione del moto**, che si presenta nella forma:

$$d(mv)/dt = -Rv + F$$

dove **m** è la **massa** del batterio, **v** è la sua **velocità**, **R** è il **coefficiente di resistenza viscosa**, e **F** è la **forza esterna applicata** sul batterio.

La soluzione dell'equazione differenziale è un'**esponenziale** che descrive come la velocità del batterio diminuisce col tempo. La **velocità** diminuisce esponenzialmente col tempo e il parametro **T** è la **costante di tempo**, cioè misura dopo quanto tempo la funzione è diminuita a circa il 37% del suo valore al tempo iniziale. In particolare, l'equazione del moto del batterio si presenta nella forma:

$$v(t) = v(0) - \exp(-t/\tau)$$

Il tempo di **T** dipende dalla **massa** del batterio, dal **coefficiente di resistenza viscosa**, e dalla **forza esterna applicata** sul batterio. Possiamo calcolare il tempo di **T** in funzione dei parametri dell'equazione differenziale scritta sopra come:

$$\tau = m/R$$

Dove **m** è la **massa** del batterio e **R** è il **coefficiente di resistenza viscosa**. In questo modo, possiamo ottenere una stima del tempo necessario affinché la velocità del batterio si riduca del 37% rispetto al suo valore iniziale.

In sintesi, lo studio del **moto di un batterio** permette di comprendere il funzionamento dei microorganismi e di sviluppare nuovi trattamenti per le infezioni batteriche. L'equazione differenziale che descrive il moto del batterio tiene conto della **forza viscosa** che agisce sul batterio quando i motori molecolari si fermano. La soluzione dell'equazione differenziale è un'**esponenziale** che descrive come la velocità del batterio diminuisce col tempo. Il tempo di **T** dipende dalla **massa** del batterio e dal **coefficiente di resistenza viscosa**.

# Moto di un batterio

## Moto di un batterio

In funzione dei parametri dell'equazione differenziale, la costante di tempo  $\tau = m/\gamma$  si può calcolare conoscendo i valori della massa  $m$  e della resistenza viscosa  $\gamma$ , approssimando la forma del batterio a una sfera di raggio  $r$ .

$$m = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \gamma \approx 6\pi\eta r \quad \tau = \frac{m}{\gamma} \approx \frac{2\rho}{9\eta} r^2$$

Con  $\rho = 1 \text{ kg/L}$  ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) e  $\eta = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ :  $\tau \approx \frac{2\rho}{9\eta} r^2 \approx 0.2 \mu\text{s}$

La distanza  $x$  percorsa dal batterio per inerzia, da quando i flagelli si fermano, si calcola come:

$$x = \int_0^\infty v(t) dt = \int_0^\infty v(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt = v(0) \cdot \tau$$

Con  $v(0) = 25 \mu\text{m/s}$  e  $\tau = 0.2 \mu\text{s}$  otteniamo  $x = 5 \mu\text{m} = 0.05 \text{ \AA}$

20

Il **moto di un batterio** è un fenomeno importante da studiare in **biofisica cellulare e molecolare**. Nel caso specifico in esame, possiamo considerare l'equazione differenziale che descrive il comportamento del batterio quando i suoi motori molecolari smettono di agire. In questo caso, l'unica forza che agisce sul batterio è la **forza viscosa**, che è stata introdotta nel paragrafo precedente.

La **costante di tempo** nella soluzione dell'equazione differenziale dipende dalla **massa** del batterio e dal **coefficiente di resistenza viscosa**. Nel caso in cui approssimiamo la forma del batterio a una sfera di raggio  $r$ , possiamo calcolare la costante di tempo come  $\tau = m/\gamma = (4/3)\pi r^3 \rho / 6\pi\eta r$ , dove  $\rho$  è la **densità** del batterio e  $\eta$  è la **viscosità** del mezzo circostante. Inserendo i valori numerici, si ottiene che la costante di tempo è di circa 0.2 ps.

La **distanza percorsa dal batterio per inerzia**, da quando i flagelli si fermano, può essere calcolata come  $x = f \tau$ , dove  $f$  è la forza risultante sull'organismo e  $\tau$  è la velocità iniziale del batterio. Inserendo i valori numerici forniti nel testo, ovvero  $v(0) = 25 \mu\text{m/s}$  e  $\tau = 0.2 \text{ ps}$ , si ottiene che il batterio percorre una distanza di circa 5  $\mu\text{m}$  prima di fermarsi completamente.

In sintesi, lo studio del **moto di un batterio** è importante per comprendere il funzionamento degli organismi microscopici e sviluppare nuovi trattamenti contro le infezioni batteriche. La costante di tempo, che dipende dalla massa e dalla resistenza viscosa, è un parametro fondamentale dell'equazione differenziale che descrive il moto del batterio. La distanza percorsa dal batterio prima di fermarsi completamente dipende della velocità iniziale e della costante di tempo.