



**UNIVERSITÀ DI PISA**

Corso di Laurea Triennale in Informatica (L-31)

TESI DI LAUREA

**Protein Folding: dai metodi classici per la  
predizione della struttura di proteine alla  
rivoluzione di AlphaFold**

**Relatore**

Prof. Paolo Milazzo

**Correlatore**

Prof. Mario Pirchio

**Candidato**

Ludovico Venturi

**ANNO ACCADEMICO 2020/2021**

# Indice

<b>1</b>	<b>Predizione della struttura di proteine (PSP)</b>	<b>3</b>
1.1	Determinazione sperimentale . . . . .	3
1.1.1	Predizione guidata sperimentalmente . . . . .	4
1.2	Strumenti informatici . . . . .	4
1.2.1	Rappresentazione informazioni . . . . .	4
1.2.2	Database . . . . .	4
1.2.3	Visualizzazione proteine . . . . .	5
1.2.4	CASP . . . . .	5
1.3	Workflow PSP . . . . .	5
1.3.1	Input, output, valutazione . . . . .	5
1.4	Paradigmi per approssimazione biologica . . . . .	5
1.5	Approccio <i>ab initio</i> . . . . .	6
1.5.1	Molecular mechanics & dynamics . . . . .	6
1.5.2	Limiti e utilità . . . . .	10
1.6	Approccio <i>template-based</i> . . . . .	12
1.6.1	Homology modeling . . . . .	12
1.6.2	Sequence alignment . . . . .	12
1.6.3	Fold recognition via threading . . . . .	13
1.7	Predizione della struttura secondaria . . . . .	13
1.7.1	Metodi integrativi [..] . . . . .	13
1.7.2	applicazioni specifiche [..] . . . . .	13
1.8	Paradigmi nel soft computing . . . . .	13
1.8.1	ANN, EC, SVM, .. [..] . . . . .	13
1.8.2	altri approcci [..] . . . . .	13
1.9	Storia della comprensione delle proteine . . . . .	13
1.9.1	primi approcci . . . . .	13
1.9.2	anni '90, database, omologia, progetto genoma . . . . .	14
1.9.3	CASP e AlphaFold . . . . .	14



# Capitolo 1

## Predizione della struttura di proteine (PSP)

Il protein folding problem ha sia guidato che tratto beneficio dagli avanzamenti nei metodi sperimentali e computazionali<sup>[1]</sup>. Uno dei maggiori obiettivi della biologia computazionale è proprio il PSP (Protein Structure Prediction), ovvero la predizione della struttura nativa tridimensionale di una proteina a partire dalla sua sequenza amminoacidica. Il PSP è il problema opposto al *protein design* (la progettazione di nuove sequenze proteiche che abbiano delle specifiche attività).

Grazie al CASP, alla crescita del PDB e ai metodi per omologia veloce e di allineamento di sequenze i metodi computazionali hanno registrato notevoli progressi, come dimostra il livello raggiunto da AlphaFold.

La predizione della struttura di proteine è uno strumento fondamentale in medicina per la comprensione delle malattie da misfolding, nell'industria farmaceutica per risparmiare anni di laboriosi e costosi esperimenti correntemente richiesti per lo sviluppo di un singolo farmaco (*drug design*), in biotecnologia per il design di nuovi enzimi e in generale per acquisire maggior conoscenza sul protein folding in tutti i suoi lati.

La determinazione sperimentale della struttura delle proteine, discussa sotto, ha vissuto dei progressi significativi col passare degli anni ed è di grande importanza per i metodi computazionali di PSP.

### 1.1 Determinazione sperimentale

I biochimici conoscono oggi la sequenza amminoacidica per più di 225 milioni di proteine<sup>[2]</sup> (UniProt), con circa 4.5-5 milioni aggiunte ogni mese. La struttura tridimensionale è

conosciuta per quasi 200.000 proteine<sup>[2]</sup> (PDB)<sup>1</sup> con più di 10.000 strutture aggiunte ogni anno.

- come le proteine sono studiate [alberts, 4.4 p.158] - metodi sperimentali alberts p.168  
pal 6 p.126 ma è molto tecnico wiki-protein folding, baxevanis 12 p.363

- storia dei metodi sperimentali (Pal)
- cristallografia a raggi-x
- NMR, risonanza magnetica nucleare
- Cryo-EM (electron microscopy)

### 1.1.1 Predizione guidata sperimentalmente

kessel 3.5 pal 6.2.5 p.138

Anche quando gli scienziati hanno una proteina correttamente ripiegata fra le mani non è così semplice determinarne la sua esatta conformazione tridimensionale, considerando che si parla di strutture di migliaia di atomi.

Integrating experimental (i.e., lab) data with predictions [235]. Low-resolution methods for the determination of protein structures (e.g., electron microscopy) have recently been used for deriving geometric constraints, which can be applied along with computational methods to achieve better predictions.

## 1.2 Strumenti informatici

La piccola percentuale di strutture determinate e il gap che continua a crescere con le sequenze conosciute è una conseguenza della lentezza dei metodi sperimentali (e in parte dei progressi delle tecnologie di sequenziamento). I metodi computazionali, significativamente più veloci ed economici, potrebbero risolvere (almeno parzialmente) questo problema.

### 1.2.1 Rappresentazione informazioni

pal 6.4.1 p.145 Gu 10-13 p.468 baxevanis 12 p.367

### 1.2.2 Database

baxevanis 12 p.373, 1

---

<sup>1</sup>al 25 Gennaio 2022 sono presenti 197.514 strutture di macromolecole quindi non solo proteine ma anche acidi nucleici e altre strutture complesse<sup>[3]</sup>

### 1.2.3 Visualizzazione proteine

pal 6.4 p.146, ottima kessel p.174 (2.3 GRAPHIC REPRESENTATIONS OF PROTEINS)

### 1.2.4 CASP

## 1.3 Workflow PSP

- paper Soft computing

### 1.3.1 Input, output, valutazione

Proprietà dei dati di input

Output: modelli, ... [..]

Metriche di valutazione

- Gu 16 p.655 GENERAL APPROACH TO STRUCTURE COMPARISON AND ALIGNMENT baxevanis 12 p.386

## 1.4 Paradigmi per approssimazione biologica

kessel 3.4 [computational methods for structure prediction] pal 15.3.2 Computational structure prediction. Molto breve pal 18.1 [molecular dynamics] psp-wiki [abbastanza discorsivo] prot-eng-wiki[molto breve] Gu 28-33 [serie di articoli messi insieme, sembra stra interessante] baxevanis 12 p.385

I numerosi metodi computazionali per il PSP possono essere suddivisi in base ai due diversi macro-approcci utilizzati<sup>2</sup>:

- *ab initio* (o *de novo*), approccio fisico, nei quali la struttura è predetta da zero usando principi fisici
- *template-based*, dove vengono usate informazioni da strutture 3D note di proteine. Questo approccio è ulteriormente divisibile in:

---

<sup>2</sup>La presente sezione sui paradigmi per approssimazione biologica segue e si basa sul capitolo 3.4 di A. Kessel e N. Ben-Tal, *Introduction to proteins: Structure, function and motion*, 2<sup>a</sup> ed. Chapman e Hall/CRC, 2018

- *homology modeling*, basato su confronti sequenza-sequenza tra la proteina da predire e il modello
- *fold recognition*, basato su altre similitudini fra modello e proteina da predire

## 1.5 Approccio *ab initio*

Il metodo più lineare e a prima vista ovvio per predire la struttura nativa di proteine è seguire la natura, simulando accuratamente come le forze fisiche guidino la proteina a ripiegarsi e usare questa simulazione per riprodurre il processo di ripiegamento su proteine con strutture sconosciute. *Ab initio*, termine latino, significa infatti "dall'inizio".

Il primo problema che sorge è superare il paradosso di Levinthal. Per farlo si assume un profilo energetico a imbuto del ripiegamento, ovvero la premessa termodinamica che la forma nativa di una proteina sia lo stato in cui risulta avere più bassa energia libera, o più precisamente (richiamando la definizione di struttura nativa data nella sez. ??) quella conformazione avente minore energia libera tale da mantenere il livello di dinamicità richiesto alla proteina per svolgere la sua funzione biologica.

Le predizioni nell'approccio *ab initio* sono pertanto *energy-based*. In quanto tali usano solo informazioni sul tipo di atomi nel sistema, le loro posizioni relative nello spazio tridimensionale e le loro interazioni con gli altri atomi. Viene poi calcolato l'intero contenuto di energia del sistema e le forze agenti su ogni atomo.

L'energia totale di un sistema (*free energy*) può essere decomposta in varie componenti: cinetica, potenziale, termica ecc. È l'energia libera che determina la stabilità del sistema. Come si vedrà sotto, nell'approccio fisico non viene calcolata tutta l'energia libera ma solamente approssimata con una parte di essa per motivi di complessità.

Sebbene vi siano differenti metodi in questo approccio, tutti condividono due caratteristiche di base:

- calcolano il contenuto di energia del sistema in una singola configurazione
- campionano numerose configurazioni e ne trovano una con la minor energia libera

Per *configurazione* si intende la disposizione complessiva di tutti gli atomi di tutti i componenti del sistema (proteina, solvente, ioni, membrana ecc.) mentre la posizione collettiva dei soli atomi della proteina viene chiamata *conformazione*.

### 1.5.1 Molecular mechanics & dynamics

Per descrivere in maniera affidabile tutte le forze fisiche operanti sul sistema tra i differenti atomi bisognerebbe descriverne la distribuzione di tutti gli elettroni, il che richiede però calcoli di meccanica quantistica (QM). Le forze, in un sistema molecolare, risultano dalla

distribuzione spaziale degli elettroni attorno agli atomi. Sfortunatamente questi calcoli sono computazionalmente molto costosi e una rigorosa caratterizzazione di un sistema macromolecolare, con milioni di atomi, è al momento insostenibile. Calcoli di QM su una singola conformazione di una piccola proteina possono richiedere mesi, tempi troppo lunghi se si ha l'obiettivo di provare tante configurazioni per sceglierne una finale.

## Molecular mechanics

Per le ragioni sopra elencate gli scienziati spesso investigano sistemi macromolecolari usando approssimazioni delle reali forze in essi. Il campo da cui i calcoli per le approssimazioni sono presi è chiamato *molecular mechanics* (MM), poiché approssima sistemi molecolari usando espressioni prese dalla meccanica newtoniana classica:

- il contenuto di energia è descritto usando un *campo di forza* nel quale gli atomi e i legami covalenti sono trattati come palline e molle
- le descrizioni che richiederebbero calcoli di QM vengono ignorate
- le rappresentazioni sono *esplicite*: prendono in considerazione tutti gli atomi (vedi fig. 1.1)

Il campo di forza sopra accennato descrive l'energia potenziale del sistema. Da notare che l'energia potenziale (intesa come entalpia) è solo una delle due componenti dell'energia libera, vedi sez. ??).

Un campo di forza è un'energia di posizione: l'energia di un oggetto in una specifica posizione all'interno di un campo (gravitazionale, elettrico, magnetico ecc.). Nelle molecole l'energia potenziale è la somma di tutti gli effetti dei campi elettrici atomici<sup>3</sup> in una determinata posizione. Si può approssimare l'energia potenziale all'energia risultante da tutti i legami covalenti e le interazioni non covalenti, escluse quelle non polari<sup>4</sup>, in una singola configurazione del sistema.

La descrizione approssimata fornita dal campo di forza permette di calcolare l'energia potenziale di molti sistemi macromolecolari in meno di un secondo.

Una variante del MM è la *QM/MM* nella quale i calcoli di QM sono indirizzati solamente su una piccola parte della proteina che contiene residui funzionali importanti. Le altre regioni sono soggette invece a MM, con calcoli molto più veloci<sup>5</sup>

---

<sup>3</sup>gli atomi possiedono, in base alla loro eventuale carica, campi elettrici che influenzano gli altri atomi

<sup>4</sup>un esempio di interazione non polare è l'effetto idrofobico. Vengono escluse poiché coinvolgono principalmente cambiamenti di entropia nel solvente

<sup>5</sup>questo approccio è stato introdotto da Warshel, Levitt e Karplus



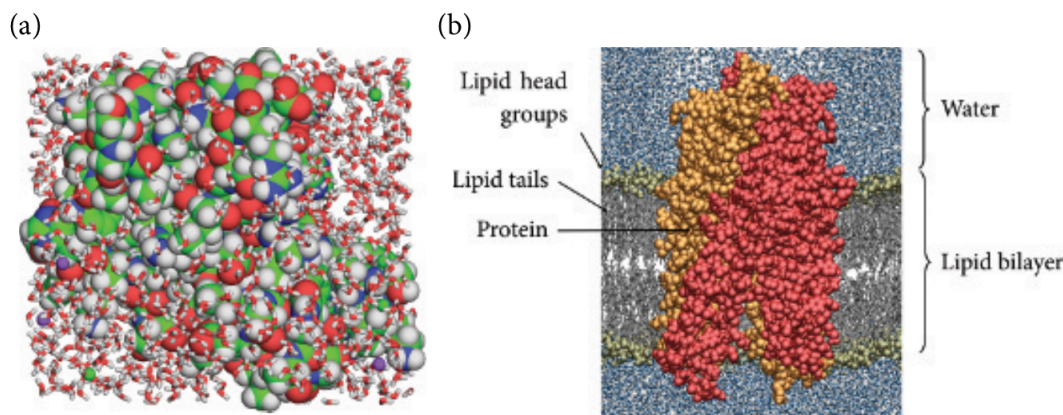


Figura 1.1: Descrizioni esplicite nei calcoli di MM. (A) una piccola proteina immersa in un solvente composto da molecole d'acqua e ioni ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ). La proteina è rappresentata come sfere di atomi, l'acqua come bastoncini e gli ioni come piccole sfere magenta e gialle. (B) una proteina trasportatrice in un doppio strato lipidico, circondato da ambiente acquoso. La proteina e le teste dei lipidi sono rappresentate in modo space-fill, mentre l'acqua e le code dei lipidi con rappresentazione wire-frame. Fonte [4]

## Spazio configurazionale

Assumendo l'accuratezza del campo di forza, il calcolo dell'energia potenziale di un sistema consente di determinare (parte del)la stabilità di una configurazione. L'idea iniziale potrebbe essere quella di considerare tutte le possibili locazioni atomiche del sistema, calcolare l'energia potenziale in ogni caso e scegliere quella con la minor energia. Come si può facilmente intuire ciò risulta essere un procedimento troppo oneroso, in quanto si devono considerare anche gli atomi del solvente (ed eventuali ligandi o cofattori). Anche il solo numero delle possibili configurazioni atomiche è difficile da calcolare.

Per superare questo problema vengono usate tecniche per ridurre lo spazio di ricerca nello spazio configurazionale. Ci sono vari metodi di ricerca, ad esempio: *systematic search* (grid search basata su dettagli geometrici), *model-building model* (usa frammenti molecolari), *random approach* (movimenti random sul piano cartesiano da una configurazione iniziale), *distance geometry* (usa una matrice di distanze atomiche), *Monte Carlo method* (modifiche random e accettazione probabilistica di configurazioni a livelli energetici maggiori) [5].

Il metodo più semplice è chiamato *energy minimization*:

1. si parte da una configurazione arbitraria
2. si calcola l'energia potenziale. Viene derivato questo valore su differenti posizioni nel sistema in modo da calcolare le forze agenti su ogni atomo dalla rimanente parte del sistema

3. un piccolo cambiamento è introdotto nella posizione di ogni atomo, in risposta alle forze applicate su ognuno di essi dal resto del sistema (in accordo a quanto calcolato nel precedente step)
4. se la nuova configurazione ha un'energia minore viene adottata
5. altrimenti questa viene scartata e viene creata una nuova configurazione
6. si ritorna allo step 3 finché non si trovano più configurazioni con minor energia

Il metodo passa da una configurazione all'altra scendendo con il gradiente della superficie dell'energia potenziale finché non converge in un *punto di minimo locale*. Tutte le procedure di *energy minimization* tendono a rimanere bloccate in un minimo locale di energia non riuscendo spesso a raggiungere il minimo globale a causa di *barriere energetiche* da scavalcare per raggiungere una configurazione con energia minore (vedi fig. 1.2 e ??).

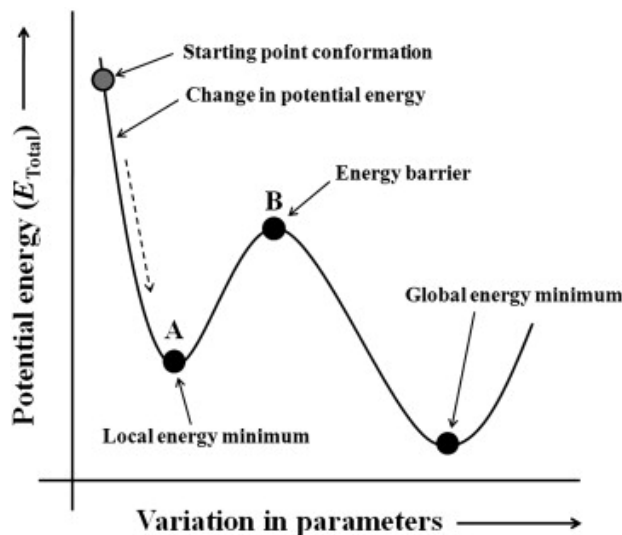


Figura 1.2: *Differenti fasi energetiche di una molecola durante la sua minimizzazione energetica. Fonte[5]*

## Molecular dynamics

È possibile spingere l'algoritmo di minimizzazione energetica fuori da punti di minimo locale fornendo energia extra, ad esempio innalzando la temperatura del sistema (ovvero aggiungendo calore virtuale). L'energia aggiunta consente agli atomi del sistema di incrementare i loro movimenti e nuove configurazioni fuori dalle barriere energetiche vengono create. Questo metodo è chiamato *Molecular dynamics* (MD) e si focalizza sui movimenti dipendenti dal tempo degli atomi nel sistema. I calcoli sono realizzati in accordo alla meccanica classica.

Agli atomi viene assegnata una velocità iniziale (proporzionale alla temperatura) e continuano a muoversi nello spazio secondo i corrispondenti cambiamenti nell'energia potenziale del sistema. Il movimento di ogni atomo nel sistema è calcolato in base alla sua energia in quel dato momento.

Le simulazioni di MD sono eseguite in cicli ripetitivi di *riscaldamento* e *raffreddamento* (metodo conosciuto nel mondo informatico come *simulated annealing*, in riferimento al processo di tempra dei metalli). Nella fase di riscaldamento vengono superate le barriere energetiche mentre la fase di raffreddamento (seguita dall'*energy minimization*) consente al sistema di rilassarsi in configurazioni con minor energia.

Un metodo comune per rendere la ricerca con MD più efficiente è di spezzarla in due fasi:

- ricerca a bassa risoluzione per trovare una collezione di strutture con interazioni non polari (basato sulla nozione che il nucleo delle proteine globulari sia idrofobico)
- ricerca ad alta risoluzione fra le strutture selezionate nel primo step

### **Limiti dell'approccio fisico e parziali soluzioni**

I metodi di MM/MD trovano difficilmente impiego in processi biologici rilevanti come il protein folding. Alcuni problemi riguardano l'approssimazione in sé del campo di forza, la sua accuratezza e i possibili doppi conteggi delle forze in gioco (es. interazioni ioniche e legami idrogeno calcolate in due espressioni differenti).

Un altro problema, sempre nell'approssimazione dell'energia libera con campi di forza, è che forniscono sì l'energia potenziale ma non l'entropia. L'unico modo per stimare l'entropia e l'energia libera dai calcoli per l'energia potenziale è eseguire questi calcoli su tutte le possibili configurazioni del sistema e poi integrarli. Il problema risiede quindi nell'impossibilità di compiere la totalità di questi calcoli a causa delle rappresentazioni esplicite usate nelle simulazioni di MD. In particolare è difficile considerare tutte le configurazioni del solvente acquoso. Ciò che si sta calcolando non è l'energia libera ma un *potenziale di forze medie* (PMF). In conclusione le simulazioni di MD non sono consigliate per descrivere gli effetti dei solventi.

### **1.5.2 Limiti e utilità**

#### **Mean field approach**

Per ovviare parzialmente al problema delle rappresentazioni esplicite è possibile descrivere *implicitamente* parti del sistema che vengono descritte da una proprietà media, per questa ragione tale approccio è chiamato *mean field*. Un esempio è la descrizione del solvente,

la parte "meno" interessante in genere, come una massa omogenea descritta dalla sua *dielettricità* <sup>6</sup>, conosciuto anche come approccio *continuum-solvent*, vedi fig. 1.3.

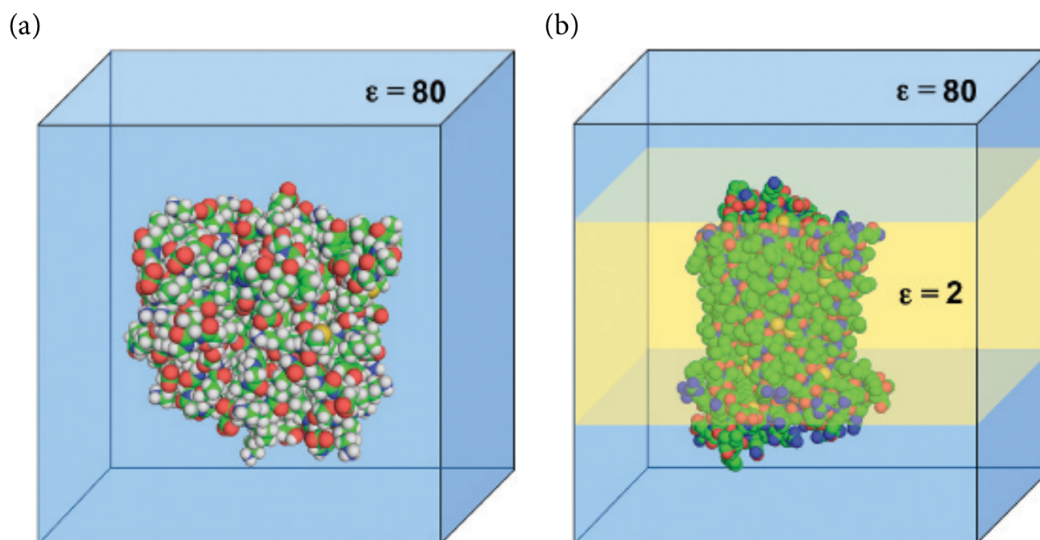


Figura 1.3: Descrizione con approccio mean-field di un sistema, il solvente è descritto implicitamente mentre la proteina esplicitamente.  $\epsilon$  indica la dielettricità. (A) proteina in un solvente acquoso altamente dielettrico. (B) proteina di membrana in un ambiente eterogeneo. Il solvente acquoso è altamente dielettrico mentre la lastra semi-trasparente gialla, che rappresenta la regione biologica di doppio strato lipidico, è poco dielettrica. Fonte[4]

Ovviamente, essendo una forte approssimazione, alcuni aspetti del sistema reale sono ignorati, come le interazioni fra gli atomi delle proteine e le molecole d'acqua. Tale problema si esacerba quando il solvente è una membrana.

Un altro compromesso è l'approccio *mixed force fields* che combina calcoli espliciti sulla proteina e calcoli impliciti sul solvente. Viene usata l'equazione di Poisson-Boltzman (PBE) per calcolare accuratamente l'energia libera elettrostatica, legando così l'effetto polarizzante delle cariche con il loro ambiente. Essendo però un calcolo oneroso viene in genere risolta l'equazione generalizzata di Born (GB). A partire da queste due equazioni, che calcolano la componente elettrostatica dell'energia libera, è possibile calcolare l'intera *free energy*, in modo abbastanza accurato, con calcoli che si rifanno alla surface area (SA, vedi parte finale della sez. ??).

Questi metodi sono chiamati *PBSA* e *GBSA* rispettivamente, e come si è visto permettono un calcolo più preciso dell'energia libera. Questi possono a loro volta essere combinati con la MM per rappresentare anche le interazioni del sistema (*MM-PBSA*, *MM-GBSA*) e sono oggi largamente utilizzati.

---

<sup>6</sup>proprietà di un mezzo non conduttore di essere sede di un campo elettrostatico

Un altro limite computazionale è il lasso temporale che si riesce a coprire. La maggior parte delle proteine si ripiega in microsecondi mentre le simulazioni riescono a coprire tempi che vanno dai pico ai nanosecondi. Grazie ad avanzamenti nelle risorse informatiche sono stati fatti dei passi avanti da questo punto di vista. Un caso interessante è *Anton*, un supercomputer progettato specificatamente per ottimizzare simulazioni di MD capace di coprire  $85\mu s$  al giorno per un sistema molecolare di 23.000 atomi (180 volte più veloce di qualsiasi computer general-purpose). Altri progressi sono dovuti alla computazione parallela e alla computazione accelerata dalla GPU. Il calcolo distribuito (*grid computing*), ovvero una larga rete di computer personali dedicati volontariamente al completamento di processi ha permesso alla rete *Folding@Home* (170.000 computer) di simulare l'intero processo di ripiegamento della proteina di legame dell'acetil coenzima A, composta da 86 residui e che richiede 10 millisecondi per ripiegarsi. Un'altra rete distribuita di calcolo è Rosetta@Home, con 86000 computer e finalizzata al PSP.

Un possibile metodo di azione è la *frammentazione delle proteine*, nel quale i calcoli sono realizzati su piccoli frammenti della proteina e poi integrati. Un esempio è il software QUARK. L'approccio *fragment-based* è usato nei metodi che combinano predizioni *template-based* con assemblamenti *ab initio*.

## Conclusioni sull'approccio *ab initio*

Gli approcci *ab initio* non sono attualmente in grado di predire la struttura della maggior parte delle proteine sulla sola base della loro sequenza. Ma sono molto abili nel farlo quando il punto di partenza della predizione è una struttura vicino a quella nativa. Questi metodi sono infatti ampiamente usati per raffinare le strutture grezze ottenute dalle determinazioni sperimentali (vedi sez. 1.1). Hanno anche fornito informazioni importanti sulla dinamica delle proteine e sono utilizzati anche nel *protein engineering* e nel *drug discovery*.

## 1.6 Approccio *template-based*

### 1.6.1 Homology modeling

### 1.6.2 Sequence alignment

- protein sequence alignment (poi MSA) [Burkowski 6 p.167] baxevanis 8 p.227

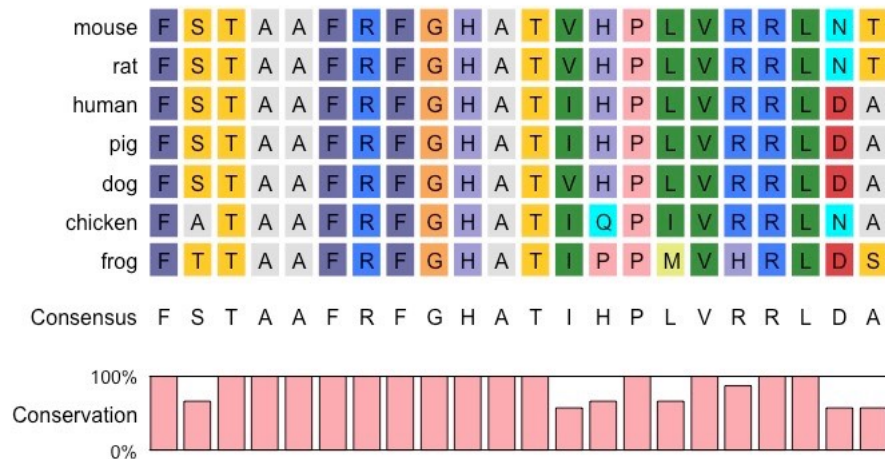


Figura 1.4: Multiple sequence alignment schematica di una sequenza proteica di varie specie. Fonte[6]

### 1.6.3 Fold recognition via threading

## 1.7 Predizione della struttura secondaria

### 1.7.1 Metodi integrativi [..]

### 1.7.2 applicazioni specifiche [..]

#### Loop modeling

- predictive methods baxevanis 7

## 1.8 Paradigmi nel soft computing

### 1.8.1 ANN, EC, SVM, .. [..]

### 1.8.2 altri approcci [..]

## 1.9 Storia della comprensione delle proteine

- alberts p.160 - psp-wiki - levitt 2001, birth of structural biology

### 1.9.1 primi approcci

L'approccio *ab initio* è emerso negli anni '60 a partire dal campo della chimica computazionale. Nel 2013 il premio Nobel per la chimica è stato assegnato proprio a quegli

scienziati che hanno contribuito sin da quegli anni al campo della biofisica molecolare computazionale (Warshel, Levitt, Karplus).

Le predizioni di strutture basate sui metodi *ab initio* sono emerse nella metà degli anni '80, prima per piccoli peptidi e poi per polipeptidi. Il primo programma per calcolare l'energia potenziale nelle proteine è stato sviluppato nel 1969 da Lifson e Levitt<sup>[7]</sup>.

La prima simulazione di MD su una proteina è stata realizzata nel 1977 da McCammon, Gelin e Karplus<sup>[8]</sup>, studiando la dinamica di ripiegamento di una proteina di 58 amminoacidi rappresentata esplicitamente ma simulata nel vuoto. Questo studio seguì il lavoro pionieristico di Levitt e Warshel del 1975 (*Computer simulation of protein folding*<sup>[9]</sup>) sulla stessa proteina che era però rappresentata in modo più semplicistico: ogni amminoacido era rappresentato da due sfere.

## **1.9.2 anni '90, database, omologia, progetto genoma**

### **1.9.3 CASP e AlphaFold**

Interestingly, in the first rounds of CASP, secondary structure prediction was a separate category. This category was cancelled after the organizers noticed that the winners in this category used a somewhat circular approach. They predicted the 3D structure and used their model structure to decipher the secondary structure elements.

# Bibliografia

## Libri

- [4] A. Kessel e N. Ben-Tal, *Introduction to proteins: Structure, function and motion*, 2<sup>a</sup> ed. Chapman e Hall/CRC, 2018.

## Articoli

- [1] K. A. Dill, S. B. Ozkan, M. S. Shell e T. R. Weikl, “The protein folding problem,” *Annu. Rev. Biophys.*, vol. 37, pp. 289–316, 2008.
- [7] M. Levitt e S. Lifson, “Refinement of protein conformations using a macromolecular energy minimization procedure,” *Journal of molecular biology*, vol. 46, n. 2, pp. 269–279, 1969.
- [8] J. A. McCammon, B. R. Gelin e M. Karplus, “Dynamics of folded proteins,” *Nature*, vol. 267, n. 5612, pp. 585–590, 1977.
- [9] M. Levitt e A. Warshel, “Computer simulation of protein folding,” *Nature*, vol. 253, n. 5494, pp. 694–698, 1975.

## Risorse Online

- [2] “Latest Release Information.” (27 gen. 2022), indirizzo: <https://www.ddbj.nig.ac.jp/latest-releases-e.html> (visitato il 27/01/2022).
- [3] “wwPDB: Deposition Statistics.” (25 gen. 2022), indirizzo: <https://www.wwpdb.org/stats/deposition> (visitato il 27/01/2022).
- [6] “Sequence Alignment. BioNinja.” (15 apr. 2021), indirizzo: <https://ib.bioninja.com.au/options/untitled/b5-bioinformatics/sequence-alignment.html> (visitato il 02/02/2022).



## Altre fonti

- [5] K. Roy, S. Kar e R. N. Das, “Chapter 5 - Computational Chemistry,” in *Understanding the Basics of QSAR for Applications in Pharmaceutical Sciences and Risk Assessment*, Boston: Academic Press, 2015, pp. 151–189.