

## CINQUANT'ANNI DI DNA - PARTE II

---

### Indice

<b>1</b>	<b>L'aspetto del DNA</b>	
1.1	I componenti della cromatina . . .	
1.2	Come far stare 2 metri di DNA in 6 millesimi di millimetro . . . .	
1.3	Aspetto e attività del DNA . . . .	
<b>2</b>	<b>Il codice genetico</b>	
<b>3</b>	<b>Da una molecola di DNA a due molecole di DNA</b>	
3.1	Struttura del DNA e replicazione	
3.2	Denaturazione e rinaturazione del DNA . . . . .	
3.3	Copiare il DNA . . . . .	
<b>4</b>	<b>Riparare il DNA danneggiato</b>	
4.1	Le cellule sanno difendersi da sole	
4.2	Quando il cromosoma viene spez- zato in due . . . . .	
4.3	Alterazioni del DNA, cancro ed evoluzione. . . . .	
<b>5</b>	<b>DNA e nanotecnologie</b>	
5.1	DNA come pongo per modellare microscopici oggetti . . . . .	
5.2	Le nanomacchine a DNA . . . . .	
5.3	Computer a DNA . . . . .	

### Introduzione

<b>2</b>	<i>Come è fatta e come funziona la molecola del secolo.</i>
2	Il <i>DNA</i> è la molecola che porta in sé le istruzioni della vita, il cosiddetto <i>genoma</i> .
2	E' una molecola straordinaria, semplice nella sua struttura ma in grado di specificare molte informazioni e di trasmettersi dai genitori ai figli.
3	Proprio la sua semplicità ha fatto sì che per quasi un secolo dalla sua scoperta gli scienziati non consideravano possibile che potesse portare in sé il <i>codice genetico</i> .
4	Negli ultimi cinquant'anni, affermato il ruolo centrale del DNA, la ricerca ha fatto passi da gigante svelando come funziona e come può es- sere analizzato e modificato in laboratorio. In questo dossier vedremo com'è fatto, come fun- ziona il DNA e come sia in grado di portare in sé e trasmettere attraverso le generazioni le caratteristiche del nostro genoma.
4	Nell'ultimo capitolo vedremo come gli scienziati stiano sviluppando tecniche che permetteranno di usare il DNA come una specie di pongo per creare microscopiche macchine.

## 1 L'aspetto del DNA

Il DNA è entrato nell'immaginario collettivo sotto forma di una lunghissima scala a chiocciola, la conformazione dedotta grazie agli studi di cristollografia di *Watson, Crick, Wilkins e Franklin*.

Altra immagine comune e familiare è quella del *cromosoma*, una X un po' paffuta sul quale è possibile individuare la posizione dei *geni*.

L'osservazione diretta della molecola attraverso un microscopio ottico ci offre ben altro scenario: un ammasso filamentoso colorabile con determinate sostanze, genericamente chiamato *cromatina*.

E' possibile osservare i cromosomi a forma di X al *microscopio* ottico, ma solo in una fase molto ristretta della vita di una *cellula*, quando inizia il processo di divisione, al termine del quale da una cellula se ne ottengono due (proliferazione cellulare).

In realtà quelle cose che chiamiamo cromosomi o cromatina non sono composti da solo DNA. Sono presenti, in termini di massa, oltre il doppio di *proteine* rispetto al DNA e un buon 10% di un'altra molecola particolare, l'*RNA*.

### 1.1 I componenti della cromatina

Il DNA custodisce all'interno del *nucleo* le informazioni per costruire i componenti della cellula, al sicuro dai danni ossidativi e di altra natura che avvengono nel resto della cellula.

La sintesi dei nuovi materiali avviene, però, proprio nel resto della cellula, nel citoplasma e in alcuni organelli. Il passaggio di informazioni dal nucleo al citoplasma avviene grazie ad una molecola che viene sintetizzata ad immagine del tratto di DNA contenente l'informazione d'interesse. La molecola in questione è l'*RNA messaggero*, che una volta sintetizzato esce dal nucleo e porta le informazioni alle strutture dedicate alla sintesi delle nuove componenti.

Quindi il 10% di RNA di cui abbiamo parlato è

costituito da nuove molecole appena sintetizzate e in partenza per il citoplasma.

E le proteine? Le proteine sono molto importanti in questa sede, poiché mantengono accese o spente determinate sequenze di DNA, come se agissero premendo su freni e acceleratori. Inoltre, permettono ed eseguono la sintesi di molecole di RNA messaggero e la replicazione del DNA quando la cellula deve dividersi.

### 1.2 Come far stare 2 metri di DNA in 6 millesimi di millimetro

Il nostro genoma è costituito da circa 3 miliardi di paia di *basi*, che disposte in fila una dietro l'altra costituiscono un filamento lungo circa 1,8 metri. In realtà è suddiviso in 46 filamenti separati, chiamati cromosomi.

Questi sono raccolti all'interno del nucleo delle cellule, una struttura rivestita da una membrana della dimensione media di circa 6 micrometri di diametro (6 millesimi di mm).

Una lunga molecola in piccolissimo spazio: nel cromosoma umano più piccolo, lungo circa 2 micrometri, sono compressi 14 mm di DNA. Per stare in queste ridotte dimensioni il DNA utilizza delle strutture proteiche attorno le quali si arrotola, un po' come del filo intorno a dei rocchetti.

Ogni struttura è formata da quattro coppie di rocchetti (proteine chiamate *istoni*) attorno a cui si arrotola il DNA e una specie di blocco che ferma il DNA all'ingresso e all'uscita dalla struttura (l'istone H), come un dito che ferma un nastro mentre facciamo un fiocco.

Queste strutture prendono il nome di nucleosomi, ognuna è grande 6x11 nm (1 nm è un milionesimo di mm) e su ognuna è arrotolato un filamento di DNA contenente circa 200 paia di basi.

Tre stringe di nucleosomi, ciascuna di circa 10 nm, si avvolgono una sull'altra in una corda spessa circa 30 nm.

Questa struttura si compatta ulteriormente durante la formazione dei cromosomi a forma di X prima della duplicazione cellulare. I meccanismi

mi esatti con cui avviene questa condensazione sono tutt'ora un mistero oggetto di studio.

L'RNA polimerasi ha una dimensione di circa 13x14 nm, poco più di un nucleosoma.

### 1.3 Aspetto e attività del DNA

Il trasferimento delle informazioni dal nucleo al citoplasma avviene grazie a delle proteine (RNA polimerasi) che copiano il DNA in RNA messaggero. Questo, una volta sintetizzato viene trasferito nel citoplasma dove viene tradotto, mediante appositi decodificatori, in proteine.

Normalmente il DNA non è esposto all'azione delle RNA polimerasi, non è come un libro già aperto su una pagina sempre accessibile. Tutt'altro, non solo è come un libro chiuso, ma anche sigillato con un lucchetto. Solo quando la cellula ha bisogno di una determinata proteina viene inviata nel nucleo una proteina particolare che funziona come una chiave che apre il lucchetto.

Intervengono poi altre proteine a districare la matassa di DNA (come se cercassero di aprire il libro) per esporre il tratto d'interesse.

Solo a questo punto le RNA polimerasi possono iniziare a leggere il DNA e a copiarlo in RNA messaggero.

Per questo motivo il DNA all'interno del nucleo può essere presente in due diverse modalità, una meno compatta disponibile alla lettura, definita per il suo aspetto omogeneo eucromatina, e una avvolta in strutture dense che impediscono l'accesso alle RNA polimerasi, l'eterocromatina.

Per usare un altro esempio, possiamo dire che l'eucromatina è come una cartella aperta che contiene diversi file direttamente apribili, l'eterocromatina è invece come una cartella zippata: bisogna prima de-zipparla per poter accedere alla lettura dei file.

## 2 Il codice genetico

La scoperta della struttura a doppia elica nel 1953 ha fatto immediatamente sorgere una do-

manda: come l'informazione genetica può essere codificata dal DNA?

Era noto che il DNA è costituito da solo quattro tipi diversi di mattoncini, le basi adenina, timina, guanina, citosina e che nella doppia elica ad una adenina è sempre affiancata una timina, ad una guanina una citosina.

In seguito si scoprì che per ogni gene viene sintetizzato, all'occorrenza, un filamento complementare di RNA, una molecola molto simile al DNA ma in grado di esistere come singolo filamento e che al posto della timina possiede un'altra base, l'uracile.

Si sapeva che in qualche modo questa molecola di RNA veniva letta nella cellula per costruire le proteine. Queste, però, sono costituite da ben venti mattoncini diversi, gli *aminoacidi*.

Presto il trucco venne svelato: il genoma è scritto in un linguaggio composta da parole di tre lettere, le triplette o *codoni*, ognuna indica un aminoacido. I conti però non tornavano: con 4 diverse lettere si possono formare ben 64 parole diverse, mentre gli aminoacidi sono solo venti. Si scoprì, che proprio come nella nostra lingua, anche il genoma aveva dei sinonimi: alcune parole indicavano lo stesso aminoacido, il quale poteva essere specificato anche con tre diverse triplette.

Inoltre, gli scienziati osservarono che determinate triplette, per la precisione tre, provocavano il termine della costruzione delle proteine e non indicavano l'aggiunta per nessun aminoacido, vennero pertanto chiamati codoni di stop.

La lettura di tutte le lettere del nostro genoma ha tenuto occupati diversi scienziati coinvolti nel *Progetto Genoma Umano*, ed ora è in atto la... traduzione ed interpretazione, un processo che si preannuncia più lungo e difficile ma indubbiamente con implicazioni di enorme importanza per lo sviluppo della medicina e la comprensione della nostra biologia.

### 3 Da una molecola di DNA a due molecole di DNA

Abbiamo visto che le informazioni possono passare dal DNA, posto nel nucleo, al citoplasma dove vengono trasformate in istruzioni per creare le proteine. Questo processo avviene in tutte le cellule, di qualsiasi organismo dotato di nucleo da, ormai, miliardi di anni.

Infatti, le sequenze di DNA presenti nelle nostre cellule lo erano già nei nostri avi primitivi, e molte di queste sono ancora più antiche: le ritroviamo praticamente invariate in organismi che si sono evoluti prima della comparsa dei vertebrati sulla faccia della terra.

Il DNA, quindi, viene tramandato di generazione in generazione, in maniera altamente fedele, talvolta con piccole variazioni che, raramente ma con importanti risvolti, hanno permesso l'evoluzione delle specie.

Infatti, una delle caratteristiche intrinseche della vita, quella di potersi riprodurre, è presente ed è dovuta proprio al DNA.

L'unità fondamentale della vita è la cellula, in grado di dare origine a molte copie di se stessa attraverso la riproduzione seriale di un processo noto con il nome di divisione cellulare. Prima di ogni divisione, devono essere effettuate nuove copie di ciascuna delle molecole che compongono la cellula, DNA compreso.

Esistono dei meccanismi molto sofisticati che coinvolgono un elevato numero di componenti cellulari e permettono di copiare in maniera fedele il DNA e generare cellule che possiedono cloni identici di DNA. Questo processo è chiamato replicazione del DNA, può essere definito come il processo che rende in grado l'informazione genetica di un organismo di essere trasferita alle cellule figlie create durante la duplicazione cellulare.

Quando le cellule si riproducono durante la crescita di un organismo o per rimpiazzare quelle morte, la duplicazione del DNA avviene in maniera molto fedele e secondo il meccanismo della replicazione.

Quando, invece, vengono generate le cellule ga-

meti (nell'uomo lo spermatozoo e l'ovulo), che fondendosi daranno origine ad un nuovo organismo, a questo processo se ne aggiunge uno, chiamato ricombinazione genica, che permette di mescolare un po' i geni dando origine a nuove combinazioni geniche e alla variabilità all'interno di una stessa specie.

#### 3.1 Struttura del DNA e replicazione

Il modello proposto da Watson e Crick per la doppia elica di DNA descrive la presenza di due filamenti di DNA appaiati e complementari nella loro sequenza di basi nucleotidiche (cioè se in un filamento c'è la ...A... o la ...C... sull'altro c'è, rispettivamente la ...T... o la ...G...).

Questo modello prevede in sé il meccanismo attraverso cui il DNA può essere duplicato: essendo i filamenti complementari, ciascuno dei due può funzionare da stampo per sintetizzare l'altro.

#### 3.2 Denaturazione e rinaturazione del DNA

I primi esperimenti hanno dimostrato come scaldando una soluzione di DNA fino a quasi 100°C, questo andasse incontro ad un fenomeno chiamato denaturazione del DNA: in pratica, i due filamenti complementari di DNA, tenuti insieme solo da ponti idrogeno, si separano.

Gli scienziati hanno poi scoperto che diverse molecole di DNA avevano una diversa temperatura di denaturazione, e che questa dipendeva dalla sequenza: più era alta la percentuale in C e G, più la temperatura doveva essere alta. Questo dato confermava quanto previsto da Watson e Crick: le coppie TA sono tenute insieme da solo due ponti idrogeni, mentre le coppie CG ne hanno tre, quindi è naturale serva più energia per separarle.

Inaspettatamente, gli scienziati hanno osservato che il DNA denaturato era in grado di rinaturarsi, cioè i filamenti separarsi erano in grado di riaccoppiarsi. Grazie a questa proprietà è stato possibile sviluppare alcune delle tecniche più im-

portanti della biologia molecolare: il clonaggio del DNA, la PCR, il sequenziamento del DNA.

Questi esperimenti, non solo hanno confermato il modello di Watson e Crick, ma hanno portato a scoprire le fasi primarie della replicazione del DNA, basate proprio sull'apertura della doppia elica, per permettere ad enzimi appositi di copiarla.

### 3.3 Copiare il DNA

Le molecole di DNA presenti nelle nostre cellule hanno una dimensione notevole (ragionando in termini molecolari): contengono ciascuna centinaia di milioni di basi. Com'è può la cellula che si divide copiarle accuratamente e in relativamente breve tempo?

Due scoperte hanno permesso agli scienziati di rispondere a questa domanda.

La prima riguardava lo studio della duplicazione del genoma di un batterio, che confermava il modello di apertura dei filamenti di DNA con successiva copiatura degli stessi.

La seconda è relativa alla scoperta di un enzima chiamato DNA polimerasi, in grado di utilizzare un filamento di DNA per sintetizzarne il complementare. La DNA polimerasi legge il filamento e sceglie da una miscela di basi a sua disposizione quale inserire seguendo le leggi di complementarietà: aggiungerà una C ogni volta che trova una G, una T quando legge una A e viceversa.

I basi sono però un po' diverse da quelli inseriti nella doppia elica del DNA, possiedono infatti un gruppo fosfato in più, per questo vengono definite ...nucleotidi trifosfati.... La DNA polimerasi per aggiungere il nucleotide trifosfato al filamento nascente di DNA ne rompe il legame con l'ultimo fosfato. Questo processo libera energia che l'enzima utilizza per legare il nucleotide a quelli già posizionati.

Affinché possa avvenire il processo di replicazione del DNA, questo deve essere svolto dalla conformazione usuale, per permettere l'accesso della polimerasi.

Di questo processo si occupa un'altra proteina,

la topoisomerasi, che esplica la propria azione srotolando il DNA.

Il DNA all'interno delle nostre cellule è sotto forma di lunghissimi filamenti: se la polimerasi iniziasse a copiare dall'inizio e procedesse fino al termine, l'intero processo sarebbe lunghissimo. Infatti, non è così che accade. In più punti di ogni singolo filamento di DNA si formano come degli occhielli ad opera degli enzimi elicasi: dei tratti di DNA, chiamati forcelle di replicazione, in cui i due filamenti antiparalleli si separano e all'interno dei quali la polimerasi inizia a copiare.

In questo modo più polimerasi copiano in contemporanea diversi tratti di DNA, rendendo l'intero processo estremamente rapido.

Nonostante le DNA polimerasi eseguano il loro lavoro ad una velocità straordinaria, da 500 a 1000 nucleotidi al secondo, sono molto accurate: sbagliano solamente una volta su un miliardo.

## 4 Riparare il DNA danneggiato

Inizialmente si pensava che il DNA fosse una molecola altamente stabile, che non fossero possibili modificazioni di alcun tipo, data la sua importanza come pietra miliare delle informazioni genetiche.

Studi successivi rivelarono che il DNA era una molecola estremamente dinamica, continuamente sottoposta ad una miriade di tipi diversi di agenti in grado di danneggiarla. Contemporaneamente venne scoperto che le cellule possedevano dei meccanismi per riparare i danni subiti dal DNA.

Questi sistemi sono molto importanti nella vita quotidiana, sia per proteggere il DNA dagli agenti mutageni, sia per porre rimedio a quell'unica volta su un miliardo in cui le nostre DNA polimerasi sbagliano. A riprova di ciò, le persone che presentano questi sistemi difettivi sviluppano malattie molto importanti come lo xeroderma pigmentoso (che aumenta di 10000 volte il rischio di sviluppare il tumore alla pelle),

il colon al cancro ereditario non poliposo e alcune forme di tumore al seno.

#### 4.1 Le cellule sanno difendersi da sole

I primi studi risalgono agli anni Trenta, ad opera di due tedeschi, Karl Zimmer e Max Delbruck e di un russo Nikolai Timoféeff-Ressovsky e riguardavano lo studio del come agenti tipo radiazioni ionizzanti e raggi ultravioletti fossero in grado di indurre modificazioni ereditabili nel moscerino della frutta. A metà degli anni Trenta diventò evidente come le cellule in vitro erano in grado di riparare i danni indotti da agenti mutageni.

La scoperta dei meccanismi di riparazione dovette aspettare gli anni Quaranta, questa volta grazie a due studi indipendenti da parte di Albert Kelner, del gruppo di lavoro di Milislav Demerec al Cold Spring Harbor Laboratori e di Renato Dulbecco, del laboratorio di Salvador Luria alla University of Indiana.

In realtà i loro studi erano indirizzati ad altre scoperte, ma durante alcuni esperimenti osservarono come le cellule, se illuminate con luce di determinate lunghezze d'onda (come quella solare), miglioravano la loro capacità di recuperare dai danni subiti in seguito all'esposizione alle radiazioni UV.

Venne così scoperta la fotoriattivazione, grazie alla quale il DNA danneggiato dall'esposizione ai raggi UV viene riparato da un sistema composto da enzimi attivati dalla luce.

Le radiazioni UV inducono la formazione di legami covalenti fra due timine quando queste si trovano affiancate, formando i dimeri di timina. Questa modifica impedisce la corretta funzione del DNA. Gli enzimi attivati dalla luce, quando colpiti da una luce di circa 300 nm, leggono il DNA finché non incrociano un dimerico di timina e lo separano. Attualmente si conoscono diversi meccanismi di riparazione, ciascuno interviene per riparare danni particolari.

Per nominarne qualcuno: il sistema di riparazione mediante escissione di nucleotidi, mediante escissione di basi e di controllo degli ac-

coppiamenti fra le basi. Tutti questi meccanismi sono in grado di riconoscere l'errore, tagliare via il pezzo ...guasto... e sostituirlo con uno nuovo e corretto.

In tutti i casi si tratta di processi complessi, nel primo, ad esempio, sono coinvolte ben 30 diverse proteine.

#### 4.2 Quando il cromosoma viene spezzato in due

I radicali dell'ossigeno sono in grado di danneggiare in maniera molto grave il DNA, provocando delle rotture sui filamenti, talvolta spezzando in due un cromosoma. In questa situazione la cellula non è vitale ed è destinata a morire, a meno di non trasformarsi in cellula tumorale.

Interviene un sistema di riparazione molto particolare, la cui anomalia (un gene per la proteina BRCA1 non è funzionale) è coinvolta nell'insorgenza di buona parte dei tumori al seno ereditari.

In ogni cellula noi possediamo due cromosomi analoghi, che contengono gli stessi geni, anche se in varianti diverse. Il sistema che si occupa di aggiustare i cromosomi rotti lo fa confrontando quello spezzato con il suo ...fratello... sano e aggiungendo le parti mancanti.

Non sempre questi sistemi funzionano alla perfezione, soprattutto quando i danni da riparare sono tanti, come quando ci sottoponiamo ad intense dosi di sostanze mutagene (ad es. sostanze radioattive). Quando non è possibile riparare tutti i danni le cellule vanno incontro a morte spontanea: siccome i danni subiti potrebbero aver causato delle modificazioni tali nella cellula da renderla pericolosa per il resto dell'organismo, questa si suicida.

#### 4.3 Alterazioni del DNA, cancro ed evoluzione.

La non funzionalità di questi sistemi, sia di riparo che di induzione al suicidio, predispone all'insorgenza del *cancro*: quando una mutazione porta all'attivazione di un gene che favorisce lo

sviluppo del cancro questa non viene corretta, permettendo l'insorgenza del tumore.

Questa elasticità del nostro genoma, di essere modificato, aggiustato e talvolta rimanere alterato, ha un significato molto importante per quello che è la vita sulla terra al giorno d'oggi: è, infatti, grazie ad essa che il genoma dei primi esseri viventi si è modificato, corretto, amplificato durante i secoli dando origine alle diverse specie e alle variabilità osservabili all'interno di queste.

Quindi il nostro DNA è continuamente in bilico in un delicato equilibrio: la sua dinamicità lo porta ad essere continuamente in sospenso tra un effetto dannoso e più frequente, lo sviluppo del cancro, e la nascita di un nuovo evento a favore della trasmissione della vita, molto raro, ma alla base dell'evoluzione delle specie.

## 5 DNA e nanotecnologie

Il DNA è una molecola dalle caratteristiche ideali per essere utilizzate nella nanotecnologie: è sufficientemente minuscola, ha delle piccole ripetizioni strutturali (ogni giro dell'elica di DNA) della lunghezza di circa 3,4-3,6 nanometri, presenta una discreta rigidità.

Nelle nanotecnologie esistono due possibili classi di applicazioni:

- i sistemi top-down (dall'alto al basso), dove la manipolazione microscopica di un piccolo numero di atomi o molecole conduce alla formazione di strutture
- i sistemi bottom-up (dal basso all'alto), in cui diverse molecole si auto-assemblano in passaggi paralleli, in base alle loro caratteristiche reciproche di riconoscimento.

L'utilizzo del DNA nelle nanotecnologie riguarda il secondo tipo di applicazioni. I primi studi risalgono agli anni Settanta, quando venivano effettuati i primi tentativi di modificazione genetica in vitro realizzando soluzioni contenenti molecole con estremità adesive in grado di unirsi spontaneamente le une alle altre. Le estremità adesive di una molecola come quella del DNA

sono strutture che si formano in condizioni particolari e che si comportano come un velcro che si attacca ad un contro-velcro. Quindi due estremità per essere adesive fra di loro devono essere complementari (una come il velcro e una come il contro-velcro, o, per usare un altro esempio, una come un bottone a pressione e l'altra come il contro-bottone).

Nel caso specifico del DNA si tratta di piccole estremità a singolo filamento che sporgono dalla doppia elica. Due tratti di DNA hanno fra loro estremità adesive se uno presenta nel tratto a singolo filamento una sequenza di DNA complementare rispetto a quella presente nell'altro.

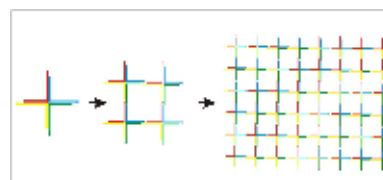
Le estremità coesive possono essere disegnate a tavolino con un numero estremamente elevato di possibilità diverse, permettendo quindi di programmare con precisione il tipo di interazioni che si vogliono ottenere fra una miscela di molecole di DNA diverse.

### 5.1 DNA come pongo per modellare microscopici oggetti

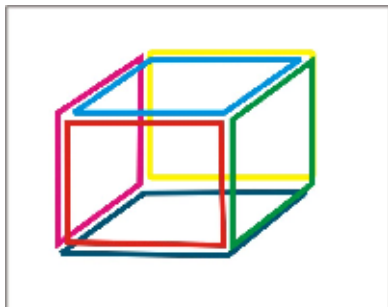
Gli scienziati sfruttando la capacità del DNA di unirsi automaticamente a filamenti complementari sono riusciti ad ottenere anche strutture bidimensionali e tridimensionali.

Quattro filamenti diversi di DNA adesivi per metà ad una delle molecole e metà ad un'altra, formano una struttura chiamata giunzione Holliday, che si forma anche naturalmente durante la meiosi.

Ognuno dei quattro filamenti presenta un'ulteriore estremità adesiva sporgente, in modo che ogni giunzione di Holliday possa interagire con altre quattro strutture analoghe. In questo modo si formano delle strutture a forma di rete di tipo cristallino e bidimensionali.



Una struttura tridimensionale del DNA (il cubo a DNA) è stata costruita utilizzando sei diverse molecole circolari di DNA, ciascuna avvolgente i lati di una faccia di un ipotetico cubo. In questo modo su ogni spigolo interagiscono fra di loro due filamenti diversi, complementari solo per quel tratto. Ogni filamento di DNA pertanto interagisce direttamente con altri quattro filamenti.



Quindi, la realizzazione di una struttura di DNA di qualsiasi forma è praticamente solo questione di fantasia. Gli scienziati si stanno concentrando sulla realizzazione di reti di DNA, da utilizzare in diverse applicazioni.

## 5.2 Le nanomacchine a DNA

Oltre a piccoli oggetti e maglie, con il DNA sono stati realizzati diversi microscopici dispositivi. Le prime nanomacchine prodotte sono piccolissimi assemblati di DNA in grado di effettuare delle rotazioni allontanando o avvicinando dei filamenti di dna.

L'obiettivo principale di questi studi è quello di utilizzare il DNA come impalcatura su cui organizzare altre molecole. Ad esempio, è possibile utilizzare delle reti di DNA come piattaforma per posizionare molecole biologiche e poterle ...fotografare... con i raggi X per studiarne la struttura.

Inoltre, reticoli di DNA in grado di effettuare delle torsioni potrebbero essere utilizzate per far venire a contatto molecole proteiche in grado di reagire fra loro.

Un altro obiettivo è quello di realizzare cristalli di DNA in cui assemblare nanocomponenti elettronici. Infatti, è stato dimostrato che il DNA è

in grado di organizzare le nanoparticelle metalliche nelle strutture precursori dei dispositivi nanoelettronici.

## 5.3 Computer a DNA

Un assemblato di molecole di DNA è in grado di processare dati in maniera simile a quella di un microchip di un computer. Inoltre, possiede le potenzialità di sciogliere problemi molto più complessi e immagazzinare un maggior quantitativo di informazioni, utilizzando un quantitativo di energia sostanzialmente inferiore rispetto ai dispositivi elettronici.

Il primo studio a riguardo risale al 1994, ad opera del gruppo di lavoro di Leonard Adleman, e riguarda la risoluzione di un problema chiamato ...Hamiltonian path.... In breve, il problema richiede di stabilire se esiste un percorso che collega due città avendo a disposizione solo l'elenco incompleto delle strade disponibili.

Adleman ha utilizzato i filamenti di DNA per rappresentare le città e le strade. Ha scelto le sequenze dei filamenti di modo che ciascuno di quelli rappresentanti una strada si connettesse, grazie alle estremità appiccicose, ad altri due filamenti rappresentanti le città. Mescolando insieme i filamenti, ed eliminando tutte le risposte sbagliate ha dimostrato che i filamenti di DNA sono in grado di auto-assemblarsi per risolvere il problema.

Quindi, l'utilizzo del DNA come microchip si basa sul principio che questa molecola può essere programmata per andare incontro ad auto-assemblaggio seguendo algoritmi, processo alla base del calcolo computazionale.