

Ernesto
Di Mauro
Il Golem
che ci attende

Un'etica per ogni cosa

 Asterios

3,90 € • N° 7

volantini militanti

Indice: Il nostro destino è dentro di noi, 3 • Golem, 3 • Praga e Chelm, 4 • Prima di Praga: Benevento, Oria, 5 • Ahima'az ben Partiel, 6 • Abu Ahron di Bagdad, 7 • Il nostro destino è dentro di noi, 8 • L'idea di Golem, 10 • Il Golem prossimo venturo, 11 • (i) Il codice, 13 • *La costruzione di un sistema di codificazione, la sua realizzazione*, 14 • (ii) La costruzione di genomi artificiali. *Determinazione di sequenze e di interi genomi*, 15 • *Cromosomi artificiali*, 18 • *Estensione universale*, 20 • *La vita non è un cristallo, il DNA cambia e impara*, 21 • (iii) Lo sviluppo controllato e programmato della capacità di pensare, 24 • Memoria, coscienza, intelligenza, Intelligenza Artificiale, 25 • (iv) La costruzione di corpi nei quali ospitare questo pensiero, 31 • Come sarà fatto il corpo di Golem non sappiamo, 35 • A questo punto dobbiamo guardare meglio dentro i computer che ci circondano, 36 • Il Golem che ci attende, 41 • Un'etica per ogni cosa, 43 • Bibliografia essenziale, 45.

Ernesto Di Mauro, biologo. È stato professore di Biologia Molecolare presso l'Università Sapienza di Roma, Direttore Scientifico della Fondazione Pasteur-Cenci Bolognetti, Direttore del Centro di Studio per gli Acidi Nucleici (CNR, Roma). È ora Vicepresidente della Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (Parigi). Ha studiato i materiali genetici, le loro forme e strutture, la loro capacità di codificare segni e significati. L'eleganza ed il rigore della genetica non possono essere separate dall'analisi del significato della vita. La genetica può essere valutata solo se considerata come parte della cosmologia, della fisica, della scienza dell'informazione, della antropologia, della neurobiologia.

Con Asterios ha pubblicato *Pandora, amore mio, riflessioni sul valore esistenziale della ricerca scientifica* (2015); *De Rebus natura, una riflessione sulla conoscenza, sulla nostra posizione nel tempo e nell'universo, sul senso della vita* (2015); *Epigenetica, il DNA che impara. Istruzioni per l'uso del patrimonio genetico* (prima edizione 2017, seconda edizione aggiornata 2020); *Essere. La scienza e gli spazi della filosofia* (2018); *Gaia Universalis. L'universo è un organismo vivente* (2018), *La Mente umana e la mente artificiale* (2019).

volantiniasterios.it è una pubblicazione della Asterios Abiblio Editore diretta da Asterios Delithanassis. • Prima edizione Gennaio 2020.

© Ernesto Di Mauro 2019 ©Asterios abiblio editore, Trieste 2019

www.volantiniasterios.it • **www.asterios.it** • posta: info@asterios.it
ISBN: 9788893130462

FINITO DI STAMPARE NEL MESE DI GENNAIO 2020 DA PRINTBEE - NOVENTA PADOVANA.

Il Golem che ci attende

Un'etica per il Golem

Il nostro destino è dentro di noi

Tutti gli organismi viventi hanno per definizione la tendenza a riprodursi, a creare altri se stesso, a dare vita a qualcosa. Il primo esempio che viene in mente, forse un po' banale, è quello del Golem. Un Golem esemplifica due cose insieme: la necessità di farsi aiutare e proteggere, la volontà di farsi servire; e la domanda, destinata finora a rimanere senza risposta, di cosa sia la vita. La scienza moderna sembra essere arrivata al punto di poter risolvere entrambi i problemi. Guardiamo prima dentro la figura del Golem, affacciamoci poi alla finestra aperta su un futuro che in gran parte è già presente.

Golem

La parola Golem evoca l'immagine di Frankenstein. Ma questa figura dalle tinte romantiche ed un po' gotiche è la creatura ideata da Mary Shelley, ed in realtà non corrisponde a un Golem, che è una cosa diversa e ben precisa, parte e frutto della cultura ebraica.

In gran parte dei miti antropogonici, la nascita dell'uomo è opera di un Essere superiore che plasma materia inerte e gli infonde la vita. Versioni simili tra loro le troviamo nelle cosmogonie degli indiani d'America, nelle culture della semiluna fertile, in quelle orientali. La radice è antica, il mito ben radicato, un archetipo. Il termine Golem deriva dalla parola ebraica Gelem, che significa "materia grezza"; nel Tanakh (la Bibbia ebraica, l'Antico Testamento per i

cristiani) (Salmo 139,16) indica la “massa ancora priva di forma”, è Adamo prima che gli fosse infusa l’anima. In ebraico moderno golem significa anche robot (il che in questo discorso è particolarmente interessante).

Nelle elaborazioni successive della cultura ebraica, il Golem diventa figura mistica e simbolica simile a un automa, costituito da una materia alla quale è stata infusa la vita in modo artificiale. Gli autori della trasformazione sono degli uomini che conoscono qualcosa di speciale; il che ci porta a pensare che valga la pena cercare di capire meglio questa storia, per quanto è possibile.

Praga e Chelm

Il Golem che incontriamo più spesso in letteratura e al quale ci si riferisce in genere nasce e vive a Praga nel sedicesimo secolo, in varie versioni della storia. La più nota è quella il cui protagonista è il rabbino Jehuda Löw ben Bezalel, che creò dei Golem plasmandoli nell’argilla e risvegliandoli tramite una parola scritta sulla fronte. Non potendoli controllare perché si moltiplicavano a dismisura, cambiò la parola “verità” (*emeth*) scritta sulla loro fronte e che aveva infuso la forza vitale nell’argilla, in “morto” (*meth*). Uno dei suoi Golem vive ancor oggi nella antica Sinagoga Staronova (Vecchia-nuova) di Praga. Una leggenda, simile e della stessa epoca, vuole che un altro rabbino, questa volta polacco, Rabbi Elijah di Chelm, creasse anch’egli un Golem che crebbe a dismisura terrorizzando il suo creatore, che decise di cancellare la parola *emeth* lasciando sulla fronte solo *meth*. Crollando a terra decomposto, il Golem schiacciò e uccise il suo creatore. Il senso di queste storie, quasi identiche, è che il confine tra il fisico ed il metafisico non può essere varcato: se si crea un essere vivente dalla materia inerte attraverso la forza della parola-logos, questi

AVVERTENZA

I numeri tra parentesi che incontrate lungo la lettura del testo si riferiscono alla bibliografia essenziale (anch’essa numerata) che potete consultare alla fine del testo a pag. 45.

non può essere controllato dall'uomo, per quanto illuminato. Che secondo la Cabala la creazione del mondo sia avvenuta per un processo di emanazione di ogni cosa dal nome divino è cosa nota (1); e che non sia lecito sostituirsi a Dio né pronunciare invano il suo nome lo è altrettanto, anche se è necessario di tanto in tanto ribadirlo.

Nella elaborazione esoterica il Golem viene dunque formato attraverso il *Sefer Yetzira* (Libro della Formazione o Libro della Creazione) e le *Sefirot*, che sono qualcosa di potente e di connesso con *sefer* (scrittura), *sefar* (computo) e *sippur* (discorso), che derivano dalla stessa radice SFR. Le *Sefirot* nella Cabala ebraica sono le dieci modalità o gli “strumenti” di Dio attraverso cui l'*Ein Sof* (l'Infinito) si rivela e crea. Non è dunque lecito, né al rabbino Jehuda Löw né al rabbino Elijah di Chelm, né ad altri, entrare nell'uso del potere che emana dal nome di Dio.

Prima di Jehuda Löw e di Elijah di Chelm, anche Alberto Magno (1193-1280) si era fabbricato uno schiavo artificiale, poi distrutto dal suo allievo Tommaso d'Aquino (1225-1274). La creatura di Alberto Magno non è però entrata nell'immaginario collettivo moderno come il Golem di Praga; anche perché questa storia è poco nota, oscurata dalla fama scientifica, filosofica e teologica del Santo, protettore degli scienziati. La sovrapposizione parziale di culture in quell'epoca in fermento è comunque particolarmente interessante. La consapevolezza che i limiti non vadano varcati è con noi da sempre: *Elios non sorpasserà la sua misura: altrimenti le Erinni, guardiane della Giustizia, lo troveranno* (Eraclito, fr. 94).

Prima di Praga: Benevento, Oria

La storia del Golem è però più antica, il che la rende affascinante, la solleva da un momento storico troppo definito. Le prime tracce letterarie le troviamo nell'opera di Ahimaaz ben Paltiel, cronista medievale del XI secolo, noto conoscitore della Torah e della mistica ebraica, punto di entrata in un mondo non abbastanza esplorato. Ahimaaz ben Paltiel narra che nel IX secolo un rabbino, Ahron

di Bagdad, scoprì un Golem a Benevento, un ragazzo a cui era stata donata la vita eterna per mezzo di una pergamena. Nella sua cronaca viene anche descritto come, sempre alla fine del IX secolo, nella città di Oria in Terra d'Otranto risiedevano dei sapienti ebrei capaci di creare Golem, i quali smisero di praticare questa attività dopo una ammonizione divina. Qui c'è una prima differenza, importante, rispetto ai Golem di Praga e di Chelm, che eseguivano gli ordini dei loro creatori di cui diventavano una specie di schiavi, incapaci di pensare, di parlare e di provare emozione perché privi di un'anima. Che succedeva ad Oria nel IX secolo?

Che in Terra d'Otranto fiorisse, all'epoca, una comunità ebraica particolarmente colta lo testimonia quello che rimane di Amittai ben Shefatiah (Oria, 850/860 – Oria, 920/930), poeta. Amittai il Giovane, nipote di Amittai il Vecchio e figlio di Shefatiah, è avo del cronista Ahimaaz ben Paltiel che abbiamo ricordato, colui che del suo antenato ci ha lasciato memoria. Di Amittai il Giovane restano numerosi frammenti (alcuni di derivazione familiare) tra i quali un poema su Mosè e su creature bibliche tipiche dell'immaginario ebraico tra cui il Leviatano e lo Ziz, i mostri del mare e del cielo. La sua opera poetica è considerata originale (2, 3) ed anticipatrice di talune tematiche trattate nel *Sepher haZohar* (il *Libro dello Splendore*), testo profetico ebraico, il libro più importante della tradizione cabalistica, redatto in aramaico in Castiglia verso il 1275.

Ahima'az ben Partiel

Il *Libro delle discendenze* (4), in ebraico *Sefer Yuhasin*, è noto agli studiosi dal 1895, anno della scoperta di un manoscritto conservato nella Biblioteca Capitolare presso la Cattedrale di Toledo in Spagna. Il *Sefer*, ovvero la *Cronaca*, è non solo un componimento letterario romanizzato delle vicende di una stirpe, è anche il racconto di una dinastia d'astronomi/astrologi particolarmente importanti tra i secoli VIII e XI. L'autore del *Sefer* nasce a Capua nel 1017 in una delle comunità ebraiche sorte in Italia dopo la deportazione romana, ma le

sue origini sono pugliesi, nella comunità di Oria, ed è un profondo conoscitore delle Scritture e della mistica ebraica, e proscrittore di antiche e dotte conoscenze. La lettura del *Libro delle discendenze*, la cui stesura iniziò agli inizi del 1054, precisamente nel mese di *Adar* (febbraio-marzo), è affascinante nella sua testimonianza di un mondo che componeva fianco a fianco culture diverse capaci di integrare le proprie saggezze e capace di ricomporle anche dopo eventi traumatici come l'espugnazione musulmana di Oria, il 4 luglio 925, quando la città fu saccheggiata, incendiata e tutta la popolazione uccisa o fatta schiava. Dopo il racconto della diaspora, la storia inizia con le vicende dell'avo Ammittai, poeta e sapiente vissuto tra la fine del VIII secolo e gli inizi del successivo, e quelle dei figli Shefatiah, Hananeel ed El'azar, “*esperti di dottrine mistiche, compositori di rime, conoscitori di misteri, investigatori della Hochmah, indagatori della Binah, sussurratori dell'arcano*” (4).

Abu Ahron di Bagdad

Quello che ci interessa qui è la parte che narra di Abu Ahron di Bagdad, grande Maestro, valente astronomo e profondo conoscitore di misteri (il nome intero è Abu Aron ben Shamuel ha-Nasi, quasi certamente personaggio storico, di lui si parla anche in altre fonti ebraiche medievali), che a metà dell' 800 nel suo peregrinare giunse a Benevento, e riconobbe un Golem. La storia narra che questi fosse un giovane morto nei pressi di Oria durante il cammino verso la Città Santa. Il mercante suo compagno di viaggio, al quale il giovane era stato affidato, si era rivolto ai saggi rabbini di Oria, sussurratori dell'arcano, che avevano inciso il braccio destro del giovane ed avevano inserito nella ferita il nome di Dio, che dà la vita. Da quel momento il giovane andava errando, qual creatura vivente. Ahron capì subito dove era nascosto il Sacro Nome e, su richiesta del giovane-Golem stesso, stanco di quella vita-non-vita, lo estrasse. Il corpo rimase senza spirito e cadde cadavere putrefatto, come se fosse da molti anni in decomposizione: esattamente come succederà secoli dopo al Golem di Chelm di Rabbi Elijah. Con lo stesso insegna-

mento morale, e con lo stesso presupposto: le lettere che compongono il nome di Dio hanno potere di dare la vita, sempre.

In tempi più vicini a noi il Golem viene svilito ad un insieme di leggende, credenze magiche e superstizioni da romanzo gotico. Il libro *Il Golem* (1915) di Gustav Meyrink ebbe enorme successo, ha ispirato film impressionisti famosi (*Der Golem, wie er in die Welt kam* del 1920 di Paul Wegener, ad esempio; il *Nosferatu* di Murnau o il *Frankenstein* di James Whale del 1931), poesie di Jorge Luis Borges e racconti di Primo Levi (*Il servo*, in *Vizio di forma*).

Ma la sua valenza mitologica quasi-divina è andata perduta. Oggi il Golem sta diventando vero, sta prendendo forma sotto i nostri occhi, è altro.

Il nostro destino è dentro di noi

Dicevamo: tutti gli organismi viventi hanno per definizione la tendenza a riprodursi, che altrimenti sarebbero già estinti per ragioni interne. Questo fatto riguarda le specie, cioè l'insieme di organismi inter-fecondabili, quelli che si possono accoppiare tra loro per produrre nuovi organismi, *Homo sapiens* ad esempio. Gli organismi di altre specie giocano partite separate ma simili. Le specie sono spesso in competizione tra loro, per fonti di energia, di cibo, di spazio; a volte sono in cooperazione, per competere meglio contro altri. Comunque, degli organismi che non avevano la spinta a riprodursi, o non l'avevano forte abbastanza, si è persa memoria. La spinta a riprodursi della specie umana è molto forte.

Quanto sopra non toglie che le specie non si possano estinguere anche per ragioni esterne. Anzi, è quello che succede più di frequente, glaciazioni, cambiamenti ambientali, competizione vincente da parte di altri. I due fattori, quello interno e quello esterno, l'insieme dei due, sono in equilibrio e lavorano di concerto, nel grande teatro dell'evoluzione. Il risultato lo vediamo intorno e dentro di noi, oltre che in paleografia, paleobiologia, archeologia, giù giù fino al petrolio, residuo organico dei corpi di organismi estinti tanto tempo fa, o fino alle rocce del Pilbara che portano al proprio

interno i primi segni rintracciabili di vita lasciati dai 3 miliardi e mezzo di anni appena trascorsi. Così vanno le cose qui sulla Terra.

Le più antiche rocce australiane contengono i microorganismi più antichi noti. Nell’Australia dell’ovest, regione del Pilbara, le rocce della Dresser Formation sono datate con precisione a 3.48 miliardi di anni. La formazione contiene stromatoliti, strutture che si formano quando dei microbi crescono formando strati (biofilm) per poi coprirsi di sedimenti. Nel caso della Dresser Formation i sedimenti sono fatti di pirite, materiale particolarmente resistente ed inalterabile. Strato su strato, i biofilm funzionano da collante, e rocce tondeggianti crescono e conservano al proprio interno le tracce di vita, pronte ad essere analizzate e riconosciute come tali.

Per capire cosa è successo prima di Pilbara, si cerca l’origine della vita nelle tracce delle pozze primigenie di cui ha scritto Darwin per primo (5), una volta sola:

“Si dice spesso che tutte le condizioni per la prima produzione di un organismo vivente sono presenti oggi, come lo sono sempre state. Ma se (e oh che grande se) potessimo concepire che in una qualche piccola pozza calda in cui fossero presenti tutti i necessari tipi di sali di ammonio e di fosforo, luce, calore, elettricità, si sia formato chimicamente un composto chimico proteico, pronto ad andare incontro a più complessi cambiamenti, oggi questa materia sarebbe istantaneamente divorata, o assorbita, cosa che non sarebbe avvenuta prima della formazione delle creature viventi.”

In quella intuita pozza erano al lavoro le stesse regole di competizione ed evoluzione alle quali siamo soggetti noi, solo che si chiamava ancora evoluzione molecolare, non evoluzione di organismi. Quando dalla pozza è emerso LUCA, il nostro *Last Universal Common Ancestor*, il comune nostro punto di partenza, questo ha iniziato a riprodurre se stesso per una spinta interna che, in qualche modo, è quella che guida anche noi, e che ci tiene in vita come specie. I meccanismi sono noti, piacere (condizionato), istinto (di sopravvivenza del sé e della sua riproduzione),

meccanica biochimica, ansia di esistere, ormoni, sogni.

La spinta della specie umana a riprodursi non si ferma a fare figli. Porta a fare altre due cose. La prima è dipingere e fare statue, con le derivate proiezioni di se stessi sulle scene e sugli schermi; la seconda è più complessa e più profonda, potenzialmente molto pericolosa, e comincia a delinarsi se mettiamo insieme indicazioni e pezzi sparsi.

L'idea di Golem

La storia del Golem, abbiamo visto, inizia nel IX secolo a Benevento, dove fu scoperto dal rabbino Ahron di Bagdad. Il Golem, che cosa strana (e quanto è strana la sua storia! perché a qualcuno è venuta quest'idea?). L'idea di oggetti animati è in effetti sogno antico; ne troviamo tracce nella cultura ellenistica. Rileggiamo Cratete:

A. E nessuno avrà né uno schiavo né una schiava? / Tutti gli uomini, anche se vecchi, / dovranno dunque essere i servi di se stessi?

B. Neanche per sogno: io farò in modo / Che tutte le cose si muovano da sole.

A. E allora che vantaggio ne avranno?

B. Ogni strumento si presenterà quando sarà chiamato: "Tavola, vieni qua! Su, apparecchiati da sola! Panierino, impasta! Mestolo, versa! Dov'è la coppa? Và a lavarti! Focaccia, sollevati! La pentola deve versare le bietole! Pesce, muoviti!" "Sull'altro lato non sono ancora cotto!" "Allora voltati, ungit e cospargiti di sale!"

(Cratete, 16, *Le bestie*).

Di Cratete, commediografo ateniese del IV secolo a. C., ci è rimasto solo qualche frammento. Peccato, perché la sua vena sembra essere stata particolarmente visionaria e immaginativa. Nel frammento 17 descrive un bagno fatto con l'acqua che si era scaldata da sola, in cooperazione con il vaso di alabastro contenente il profumo che versava quando era necessario, e la spugna che si muoveva sapendo dove andare e cosa fare. Al di là di questi aspetti officinali,

c'è una radice più profonda: la creazione di un simulacro è l'uomo che riflette su se stesso.

Il parallelo più chiaro (o, se vogliamo: un suo aspetto parziale ed illuminante) è dato dalla creazione di quello che chiamiamo *mente artificiale* che, oltre a servirci e ad obbedirci sotto forma di computer, ci fa riflettere sulla nostra mente, ci permette di capirla. Così la *vita artificiale* ci fa riflettere sulla nostra vita, quella reale e naturale, qualsiasi cosa questo significhi. In qualche modo, se vogliamo capire noi stessi, è necessario mettersi all'esterno, guardarci dal di fuori.

Il Golem prossimo venturo

Per fare un uomo ci vogliono molte cose. Per fare un Golem vivo e vero ce ne vogliono altrettante:

(i) un codice. L'organizzazione di un sistema di codificazione dell'informazione, l'organizzazione di un sistema di lettura ed uso di questa informazione; la realizzazione funzionale di elaborazione dell'informazione tra il momento della codificazione e quello della decodificazione. Stiamo qui parlando della decifrazione del codice genetico, della sua attuata possibilità di uso, di tanta parte della ricerca biologica contemporanea e delle associate applicazioni biotecnologiche. Non è stato necessario inventare un codice nuovo e artificiale, quello chimico inventato dalla natura è di gran lunga il migliore. ...*Fatto.*

(ii) Una struttura che contenga il codice: un genoma. Lo sviluppo di metodi per la decifrazione della sequenza del DNA ha portato alla determinazione della sequenza di genomi interi, dai genomi virali e batterici fino al genoma umano. Questa scienza è ormai matura e, sotto il nome di genomica, comprende le sequenze di moltissimi organismi diversi. Dalla loro analisi comparata è derivata la determinazione della loro organizzazione e della loro struttura. Conoscendo la struttura, è stato possibile programmare e costruire genomi artificiali. La scelta iniziale è stata quella della semplificazione, costruire cioè genomi minimi dotati di strutture per poter soprav-

vivere, funzionare, replicarsi ed esprimere pochissimi geni, e null'altro. Su questo modello si potrà costruire complessità genetica. ... *Fatto.*

(iii) Lo sviluppo controllato e programmato della capacità di pensare. Il discorso è complesso, per affrontarlo è necessario definire cosa sia la mente; e non limitandosi soltanto, in modo auto-referenziale, alla mente umana. È necessario definire le diverse funzioni che, nel loro insieme e nel loro funzionamento coordinato, possiamo chiamare mente: memoria, coscienza, intelligenza. Poi, confrontandoci con queste definizioni, capire a che punto sia giunto l'insieme di fatti, di nozioni, di concetti, di tecnologie che va sotto il nome ampio di intelligenza artificiale. Ma anche in questo caso è possibile annotare:... *fatto.*

(iv) La costruzione di corpi nei quali ospitare questo pensiero. Da un lato abbiamo dunque un codice genetico ed il suo uso, e la costruzione delle strutture che portano questo codice (genomi artificiali); dall'altro abbiamo il modo di codificare un pensiero autonomo (intelligenza artificiale) e la costruzione di strutture che lo contengono e lo mettono in uso (computer, in forma di scatoloni di metallo, di i.phone o di robot semoventi). A che punto è la costruzione di strutture biologiche nelle quali sia possibile ospitare questo pensiero? Esistono due diversi approcci. Il primo è quello che parte dalle micellule (bottom-up), l'altro è quella che parte direttamente dall'alto, e si chiama clonazione. Qui non possiamo ancora dire ...*fatto.* Ma quasi, la via è aperta.

Quello che manca per fare un Golem è mettere insieme queste quattro parti del sistema, farle interagire in modo organico. Farne un insieme. Tenendo presente anche che, al tempo della comunicazione a distanza, forse non è necessario giungere ad una unità fisica perché si abbia una unità funzionale.

Prima di esaminare meglio quale sia l'*insieme* migliore, o il più probabile, è opportuno entrare più in profondità nei quattro punti, uno per volta, analizzare i vari aspetti singolarmente, in un qualche dettaglio, cercare di capirne meglio i limiti e le possibilità.

(i) Il codice

Sulla Terra tutti gli organismi viventi utilizzano lo stesso codice genetico. Questo fatto può essere dovuto a due ragioni. La prima potrebbe essere definita “storica”: la vita sarebbe iniziata una volta sola, secondo un insieme di modalità definite e, una volta iniziata, non ha più potuto ricominciare perché le condizioni favorevoli che ne avevano permesso l’inizio non c’erano più, erano cambiate. Il Pianeta aveva seguito la propria via evolutiva, e quello che c’era, c’era. La seconda potrebbe essere definita “mancanza di alternative”: data la composizione dell’ambiente, data la qualità e le proprietà degli atomi presenti nello scenario, date le proprietà chimico-fisiche del Pianeta, e date le regole termodinamiche delle interazioni molecolari, dati tutti questi parametri iniziali, le regole di interazione e di sviluppo di ulteriore complessità erano definite una volta per tutte. Su queste regole quello che definiamo vita (*“Vita è riproduzione con variazioni”*) ha costruito i propri meccanismi funzionali e la propria base molecolare. Questa base la conosciamo: l’informazione è nel DNA, questo si esprime (si “trascrive”) in RNA, che a sua volta dirige su di sé (ovvero: si “traduce in”) la produzione di proteine. Il resto della biochimica ruota intorno a questi elementi e produce membrane, forme, foglie, ossa, trasformazione di energia, tronchi, scheletri, fiori, residui. Questa seconda via, questa seconda classe di meccanismi è complessa e, una volta imboccata, non permette di tornare indietro. Tutte le semplificazioni possibili sono state esplorate dall’evoluzione e sono note, riguardano dettagli del sistema, non modificano i suoi meccanismi di base.

Le due ragioni non sono alternative; sono probabilmente vere entrambi. Il risultato è il mondo biologico che ci circonda e del quale facciamo parte, basato sull’informazione e sulla sua gestione. Se vogliamo riprodurlo ad arte, non abbiamo alternative se non seguire la via già tracciata dalla natura.

La costruzione di un sistema di codificazione, la sua realizzazione

L'organizzazione dell'informazione del materiale genetico è simile a quella di un computer che procede con scelte successive di informazioni fornite dalla sequenza di due cifre ... 0-0-1-0-1-1... . Il DNA è organizzato nello stesso modo: le sue cifre di base sono due strutture chimiche distinte (nucleotidi purinici e nucleotidi pirimidinici), allineate lungo un filamento polimerico. Per aumentare la propria ricchezza di informazione il codice binario del DNA si è sdoppiato, all'inizio della propria evoluzione, e sia le purine che le pirimidine del DNA sono diventate due: A (adenina) e G (guanina) sono le purine, C (citosina) e T (timina) sono le pirimidine. La sequenza delle A, G, T e C, allineate lungo una struttura ripetitiva costituita da gruppi zucchero-fosfato che si ripetono in successione legati da legami fosfodiesterici, costituisce la parte variabile ed informativa del DNA. Questo filamento polimerico è potenzialmente lunghissimo e, avvolgendosi intorno ad un filamento speculare, forma una struttura a doppia elica. È questo il senso profondo delle sequenze ...ATGAGTACCATT... di cui è fatto il DNA.

Sono possibili alternative? Sembra di no. Senza addentrarci eccessivamente in analisi biochimiche, basta ricordare che: (a) le sostanze di base del DNA possono generarsi da sostanze più semplici in modo spontaneo. Queste sostanze di partenza possono essere ad un solo atomo di carbonio; possono essere cioè *veramente* semplici, e facevano parte dell'atmosfera della Terra primitiva. (b) Altre sostanze simili si formano secondo modalità simili, ma sono tutte, per un verso o per l'altro, meno adatte allo scopo finale: quello di essere abbastanza facili da fare; di essere sufficientemente stabili per poter rimanere; di essere abbastanza reattive per interagire tra loro, ma non reattive abbastanza da reagire in modo indiscriminato con tutto ciò che le circonda o da autodistruggersi. (c) Sono state sintetizzate negli ultimi decenni centinaia di molecole in forma di varianti simili a quelle naturali, alla ricerca di alternative biotecnologiche, di po-

tenzialità terapeutiche, per pura curiosità intellettuale, o allo scopo brevettuale per eventuali e mirati miglioramenti. Il risultato chiaro è che la natura ha scelto e tramandato le quattro molecole migliori, le più adatte allo scopo. Naturalmente tenendo ben presente che la natura non ha uno scopo. La natura e l'evoluzione hanno solo cause ed effetti. L'effetto è che il DNA che abbiamo è il migliore possibile.

Gli stessi ragionamenti si applicano, per quanto riguarda il DNA, alla sua struttura a doppia elica; per quanto riguarda l'RNA si applicano sia alla sua composizione che alla sua struttura; così per le proteine: delle molte decine di aminoacidi possibili, solo 20 sono stati selezionati a far parte della struttura delle proteine e del codice genetico. Per tutti i passaggi del sistema sono ormai noti effetti e cause, conosciamo le ragioni della sua universalità e della mancanza di alternative plausibili o possibili. Data la composizione atomica dell'Universo, date le leggi che lo governano, questa è l'organizzazione della materia vivente. Ed è probabile che altrove le regole non siano molto dissimili. La chimica dell'idrogeno, quella dell'ossigeno e, soprattutto, quella del carbonio, sono le stesse qui sulla Terra e su Andromeda, e si mantengono uguali, per quanto ci sia dato sapere, fino ai confini dell'Universo.

Nella prospettiva di creare un Golem usiamo dunque il codice genetico migliore che conosciamo: il nostro.

(ii) La costruzione di genomi artificiali

Determinazione di sequenze e di interi genomi

La decifrazione del codice genetico è andata di pari passo allo sviluppo di tecnologie di sequenziamento del DNA. Con il che si intende la determinazione, lungo il filamento di DNA, della sequenza di quelle sostanze chimiche i cui acronimi sono A, G, T, C e che, appunto con la loro sequenza, determinano l'informazione genetica. Le tecnologie specifiche hanno raggiunto negli anni '90 un altissimo grado di sofisticazione e precisione al punto da essere considerate prive di errori. Queste tecnologie sono oggi altamente

automatizzate e permettono in tempi brevi e con costi moderati la determinazione, l'ordinamento e la interpretazione di lunghe sequenze. La automazione della determinazione delle sequenze ha portato alla definizione genetica e strutturale di interi genomi, intendendo per genoma l'insieme delle informazioni che determinano un tipo di organismo.

Sono stati ovviamente determinati prima genomi di grandezza limitata, poi man mano genomi sempre più grandi. Ripercorriamo rapidamente alcune tappe importanti: nel 1981 è stata determinata la prima sequenza completa di un genoma, quello del mitocondrio umano (16.569 coppie di basi, bp). I mitocondri sono organelli cellulari sede, nelle cellule umane, della componente biochimica delle funzioni respiratorie e della produzione di sostanze depositarie di energia. Hanno un genoma distinto da quello del resto della cellula, di derivazione batterica ancestrale. Il numero di coppie di basi che compongono un genoma o una sua componente è un importante dato del sistema, se pensiamo che il genoma umano nucleare non-mitocondriale è composta da circa 4 miliardi di elementi.

Batteri. Il sequenziamento del batterio *Haemophilus influenzae* (1,83 milioni di coppie di basi Mb) è del 1995, ed è stato eseguito con la stessa tecnica che sarà in seguito usata dalla ditta *Celera Genomics* per sequenziare il genoma umano. Il sequenziamento del batterio *Escherichia coli*, batterio presente nell'intestino dell'uomo (4.639.221 bp) è di poco successivo. Il primo genoma di un archeobatterio completamente sequenziato (1.664.976 bp, 1996) è quello di *Methanococcus jannaschii*, che vive ad una temperatura di 85 °C e a pressioni fino a 200 atmosfere. I genomi di virus e batteri oggi sono noti a migliaia, il che ha permesso studi comparativi, funzionali ed evolutivi.

Organismi superiori. Il genoma di *Saccharomyces cerevisiae* fu eseguito nel 1996 ed è il primo genoma eucariotico ad essere sequenziato completamente. Dato che il lievito *Saccharomyces cerevisiae* rappresenta un sistema eucariotico modello perché somiglia per diversi aspetti alla cellula di mammifero (una grande percentuale