Né Kupiec né Sonigo

Né dio né genoma di J.J. Kupiec & P. Sonigo



Jean-Kacques Kupiec, Pierre Sonigo
Né dio né genoma
Eleuthera, 2009
pp. 232, € 18,00
Trad. C. Milani

Un libro difficile. Un libro provocatorio. Un titolo che senz'altro attira attenzioni.
La pubblicazione, con qualche anno di ritardo, della traduzione italiana di *Ni Dieu ni gène – pour une autre théorie de l'hérédité* di Kupiec e Sonigo, entrambi ricercatori presso istituti prestigiosi di Parigi, ha suscitato perfino l'interesse di alcuni quotidiani di rilievo[1]. Anche a me il tema del libro ha incuriosito molto, e purtroppo non riesco a scriverne in merito senza affrontare un discorso più dettagliato sul suo contenuto. Proviamo quindi ad approfondire, per quanto sia possibile in una breve recensione, questa «nuova teoria dell'ereditarietà» proposta dagli autori.

Darwin e la filosofia

Prima di spiegare in dettaglio la loro teoria[2], Kupiec e Sonigo fanno alcuni cenni interessanti sulla storia e la filosofia della scienza, concentrandosi soprattutto su Charles Darwin che, a differenza di quanto si assume spesso, con il suo importantissimo libro *L'origine delle specie* non fu il fondatore dell'evoluzionismo. Infatti già prima di Darwin esistevano diverse teorie dell'evoluzione, tutte fondate su una concezione ereditata da Platone e Aristotele che caratterizza anche il creazionismo: la dualità tra *essenza* (entità o specie *fissate* e immutabili che si potrebbero considerare come «prototipi») e *esistenza* (gli individui con le loro caratteristiche che variano). Un esempio sarebbe l'evoluzionismo teista che assume che ci sia un'evoluzione guidata che spinge (secondo un *modello istruttivo* o *deterministico*) verso specie definite *a priori* per realizzare il piano di Dio. Un'ipotesi che ancora oggi ha alcuni sostenitori anche se viene generalmente rifiutata dal mondo scientifico. La vera novità che fu introdotta da Darwin era un meccanismo evolutivo che ruppe con la dualità tra essenza e esistenza affermando che l'evoluzione non era *deterministica* ma basata su *variazioni casuali* con una consequente *selezione naturale* delle variazioni che si adattavano meglio all'ambiente (chiamato il *modello caso-selezione* dagli autori del libro). Il principale «difetto» della teoria

era che Darwin non fu in grado di spiegare da dove venissero le variazioni casuali. Ma questa teoria fu la prima a dare una piena enfasi all'esistenza, cioè all'individuo, cancellando la necessità dell'essenza. Le specie non erano più entità pre-fissate che definivano come dovevano essere i singoli individui, ma al contrario erano gli insiemi di individui molto simili tra di loro (per via di un antenato in comune) a «definire» una specie. La differenza sembra poco importante, ma è essenziale a livello filosofico: nel primo caso è la specie come realtà trascendente e assoluta (*realismo*) a definire la natura, mentre nel secondo caso la specie è una classificazione inventata da noi umani (*nominalismo*). Anche se nell'ambito scientifico spesso si parla dell'opera di Darwin, Kupiec e Sonigo danno un particolare rilievo a quale fosse veramente il grande merito dell'evoluzione darwiniana a livello filosofico rispetto a tutte le teorie che la precedevano.

Il «programma genetico» come modello istruttivo

La genetica, la biologia molecolare e l'attuale concezione dell'ereditarietà, secondo Kupiec e Sonigo, hanno fatto passi indietro per tornare a una dualità essenza/esistenza reintroducendo un modello istruttivo: il programma genetico, che viene usato come metafora per spiegare lo sviluppo dell'individuo dall'embrione all'adulto (ontogenesi) e il funzionamento dei processi cellulari (per esempio del sistema immunitario), dagli autori viene paragonato al creazionismo.

> La teoria del programma genetico [...] offre una risposta a tutto [...] Perché abbiamo un cervello? Perché il programma genetico ha fatto un cervello. Perché abbiamo un fegato? Perché il programma genetico ha fatto un fegato. (p. 147)

Come fa notare Giulio Giorello nella sua prefazione, questa citazione di Kupiec e Sonigo assomiglia alle parole di Voltaire:

> Chi ha dato il moto alla natura? Dio. Chi fa vegetare tutte le piante? Dio. Chi ha dato il movimento agli animali? Dio. Chi produce il pensiero dell'uomo? Dio.

Vedono pertanto una contraddizione profonda tra il darwinismo e la genetica che secondo loro limita il progresso della biologia contemporanea. L'in-*form*-azione genetica, secondo Kupiec e Sonigo, è «una versione moderna della *forma* di Aristotele, della quale reintroduce l'intera metafisica per necessità di coerenza» (p. 227).

Il riduzionismo della genetica – che cerca di spiegare ogni caratteristica osservabile (*fenotipo*, ad esempio l'anatomia di un organismo, ma anche il colore dei nostri capelli) con interazioni specifiche tra i geni (*genotipo*) e molecole come le proteine (che vengono codificate dai geni) e che attribuisce diversi ruoli a diverse sequenze del DNA (geni codificanti e non, promotori, inibitori, ...) – viene criticato per la mancanza di

... un principio generale di funzionamento [...] valido per tutte le sequenze di DNA, in partenza uguali [...] indipendentemente da una «natura» (informazione, istruzione, messaggio), proprio come le leggi della fisica spiegano che un oggetto cade o prende il volo a seconda delle circostanze, indipendentemente alla natura pesante o leggera (p. 110).

È proprio sulla specificità delle interazioni tra le molecole che si basa il modello del programma genetico, che viene paragonato non soltanto al determinismo e all'essistenzialismo della concezione aristotelica della natura ma addirittura a una dittatura:

La biologia è quindi concepita come una dittatura del programma genetico che impone la propria legge al suo impero di cellule, sotto la rigida sorveglianza della sua guardia pretoriana (pp. 146/7).

La loro critica arriva perfino a mettere in dubbio l'attuale concezione dell'evoluzionismo, la cosiddetta sintesi moderna, che spiega le variazione casuali della teoria darwiniana come variazioni (ricombinazioni e mutazioni) del genoma[3]:

L'evoluzione delle specie non può essere spiegata dalle mutazioni perché i cambiamenti nella sequenza dei geni sono insignificanti (p. 127).

Riteniamo che l'ereditarietà sia legata non alla trasmissione di un codice ma alla riproducibilità di fenomeni aleatori. [...] In senso proprio, non si trasmette mai nulla: le stesse cause riproducono gli stessi effetti, ecco tutto (p. 210).

Un modello di interazioni casuali

Per Kupiec e Sonigo, l'espressione dei geni, invece di essere regolata da un programma, è sostanzialmente un fenomeno casuale. Nel loro modello le interazioni specifiche, ad esempio tra i geni e i loro regolatori (che attivano o inibiscono la trascrizione e quindi l'espressione dei geni), ma anche le interazioni tra altre molecole importanti per i processi cellulari, vengono sostituiti da una «libertà molecolare» con lo scopo di «abbandonare una visione statica del mondo per adottarne una dinamica» (p. 92).

Tutte le molecole possono interagire fra loro seguendo delle costanti cinetiche più o meno rigide. Alcune molecole hanno una tendenza molto elevata ad associarsi, altre una tendenza molto debole [...] Le interazioni molecolari non si caratterizzano per l'esclusività nella scelta dei partner ma, al contrario, per una grande libertà (pp. 92/3).

Queste interazioni, con diverse probabilità di realizzazione e diverse stabilità, sono il «risultato di un processo che segue le leggi chimico-fisiche e non le leggi di un'informazione (essenza) contenuta nella sequenza del DNA, quindi data a priori, che deve realizzarsi nel quadro di un programma» (p. 121).

Per questo motivo rifiutano anche il concetto dei segnali biologici che vengono scambiati tra le cellule dell'organismo, ad esempio durante lo sviluppo embrionale, essendo questi segnali l'espressione di una specificità ereditata dalla metafisica di Aristotele. Il segnale biologico meno credibile, a loro avviso, è il segnale che induce una cellula all'apoptosi (la cosiddetta morte cellulare programmata), che invece spiegano come un processo metabolico causato da una carenza di nutrienti.

Il «darwinismo cellulare»: caso e selezione applicati allo sviluppo embrionale

Un umano adulto è composto da circa 10^{14} (centomila miliardi) di cellule. Com'è possibile che queste si possano organizzare in tessuti e organi ben definiti che svolgono funzioni specifiche, considerando che l'organismo si sviluppa a partire da una sola cellula (l'ovulo fecondato)? Com'è possibile che questo fenomeno, l'ontogenesi[4], si riproduca sempre nella stessa maniera? Il modello attuale spiega lo sviluppo tramite un programma genetico che coinvolge l'attivazione o lo spegnimento di geni specifici in determinati contesti e con tempistiche più o meno precise.
Per Kupiec e Sonigno, invece, «la selezione naturale guida l'evoluzione degli animali e al *tempo stesso* quella delle loro cellule. La costruzione dell'organismo (ontogenesi) non è un processo indipendente dall'evoluzione (filogenesi). È sempre lo stesso processo» (p. 229), che

chiamano «ontofilogenesi». In sostanza il loro «darwinismo cellulare»[5] è un modello basato su fenomeni causali che ritengono comunque riproducibili.

È sbagliato pensare che un fenomeno dipendente da un evento casuale non sia riproducibile. È riproducibile statisticamente. [...] Se la varianza di un fenomeno casuale è molto piccola, quest'ultimo potrebbe assomigliare a un fenomeno deterministico, pur essendo del tutto fondato sul caso (pp.112/3).

Dall'idea delle interazioni casuali, sostenuta dagli autori, seguirebbe che anche l'espressione dei geni debba essere un fenomeno essenzialmente casuale e di conseguenza le cellule, durante lo sviluppo embrionale, si trasformerebbero *per caso* nei diversi tipi cellulari. Sarebbe poi la disponibilità di risorse metaboliche (nutrienti) in un dato microambiente a *selezionare* (e stabilizzare) i tipi cellulari adeguati per un certo tessuto o organo. L'organismo viene così paragonato a un ecosistema in cui avviene un'evoluzione tramite la selezione naturale darwiniana.

Esiste [...] un ecosistema in ciascuno di noi, composto da miliardi di animaletti microscopici che chiamiamo le nostre cellule (pp. 145/6).

Quindi l'embriogenesi sarebbe essenzialmente un processo evolutivo invece che l'attuazione di un programma genetico, che viene visto come «una versione moderna della creazione» (p. 147).

Una teoria valida?

La critica di Kupiec e Sonigo verso un riduzionismo esagerato della genetica, che troppo spesso cerca di spiegare fenomeni molto complessi limitando lo sguardo su singole interazioni tra molecole o geni, appare in parte giustificato[6]. Ma questo riduzionismo era dovuto anche a tecniche sperimentali che difficilmente permettevano di esaminare altro che singole interazioni. Prima della pubblicazione della versione originale del libro, però, si iniziavano a utilizzare nuove tecniche sperimentali che permettono di analizzare il comportamento delle cellule nel loro complesso, ad esempio misurando i livelli di espressione di migliaia di geni contemporaneamente con i cosiddetti *microarray*. Già allora si parlava di *systems biology*, un approccio alla biologia molecolare indirizzato alla complessità dei sistemi biologici anziché a singole interazioni. Inoltre appare difficile capire le funzioni biologiche nel loro complesso sapendo niente o quasi dei dettagli

su cui si basano. Da questo punto di vista, la critica ai genetisti di essere riduzionisti per definizione sembra esagerata.

Anche la critica al concetto della specificità delle interazioni molecolare appare troppo netta. Lavorando nell'ambito non mi è mai capitato di incontrare un genetista o biologo che sostenesse che i legami tra un gene e un suo regolatore o tra due proteine fossero esclusivi. Se un ricercatore afferma che «un regolatore X si lega al promotore di un gene Y per attivare la sua espressione» non significa che quel regolatore non possa anche attivare (o inibire) altri geni. È ben noto che le molecole spesso hanno molti partner possibili. Sulla specificità Kupiec e Sonigo contraddicono se stessi quando affermano che «la specificità di una citochina per un tipo cellulare è eccezionale»[7] (p. 185) o quando parlano della «specializzazione dei [...] recettori di superficie» (p. 187) delle citochine.
Per giustificare la loro ipotesi di un'espressione casuale dei geni, devono supporre che il numero di regolatori sia inferiore al numero di siti del DNA a cui questi possono legarsi, cosicché l'espressione genica dipenda dalla combinazione *casuale* dei siti scelti dai regolatori. Fanno un bell'esempio (pp. 129/130) considerando un solo regolatore (la proteina MeCp2) che esisterebbe in circa un milione di copie nella cellula, mentre per quel regolatore ci sarebbero 40 milioni di siti di legame nel DNA di un mammifero.

Fra tutte le possibili distribuzioni del milione di molecole sui quaranta milioni di loci nel DNA, alla fine ne viene scelta una sola, corrispondente a un tipo cellulare (pp. 129/130).

Bene, proviamo a fare qualche calcolo di probabilità. Facendo un'approssimazione non banale (usando la formula di Stirling), per il numero di combinazioni possibili delle proteine MeCp2 sui 40 milioni di siti di legame si può arrivare a una stima di $10^{2030874}$ (1 seguito da più di 2 milioni di zeri!). Anche se assumiamo che una cellula possa provare un miliardo (10^9) di combinazioni diverse in un solo secondo (non ripetendo mai una combinazione per due volte, quindi ricordando tutte le combinazioni già provate), ci vorrebbero fino a $10^{2030865}$ secondi per trovare il tipo cellulare giusto per sopravvivere al «darwinismo cellulare». Basta paragonare questo risultato con l'età di «appena» $1{,}4 \times 10^{17}$ secondi del pianeta Terra per rendersi conto di quanto sia improbabile... O, guardando la questione da un altro punto di vista, ricordando che un essere umano ha circa 10^{14} cellule, in media un umano su $10^{2030860}$ dovrebbe avere *una* cellula che ha trovato la

configurazione «giusta» per puro caso. Di esseri umani sulla Terra ce ne sono meno di $7x10^9$ (meno di 7 miliardi). Quindi già prendendo in considerazioen un solo regolatore le considerazioni di Kupiec e Sonigo non tornano. In realtà di regolatori ce ne sono migliaia che hanno un importanza ben nota per l'embriogenesi. Gli autori non hanno tenuto in conto che dei tantissimi siti a cui i regolatori si potrebbero legare teoricamente, la maggior parte non sono nemmeno accessibili per via della conformazione del DNA (detta cromatina) e di altri effetti come la metilazione dei promotori[8]. Di conseguenza la stragrande maggioranza di combinazioni teoriche sono da escludere ed è altamente probabile che il numero di siti accessibili sia simile o inferiore al numero di regolatori. La distribuzione dei regolatori sul DNA dipende più dal contesto (l'accessibilità dipende ad esempio dal tipo cellulare) che dal caso. Così, anche permettendo un certo grado di casualità per le singole interazioni, il comportamento della cellula dipende per lo più dalla presenza o meno del regolatore (che viene anch'esso codificato da un gene attivo o meno), ed è questa l'idea su cui si basa il concetto del «programma genetico».

Kupiec e Sonigo, quando affermano che «l'evoluzione delle specie non può essere spiegata dalle mutazioni perché i cambiamenti nella sequenza dei geni sono insignificanti» (p. 127) e che «i geni sono conservati, dal lievito fino all'essere umano» (p. 127), si avvicinano molto a quello che chiamerei *disonestà intellettuale*. Anche se è vero che «fra l'essere umano e la scimmia oltre il 99% dei geni sono identici» (p. 127), sono noti tanti casi in cui una singola mutazione specifica può causare differenze significative (come in tanti casi di malattie genetiche ereditarie), ad esempio se cambia il comportamento di un regolatore avendo effetto sull'espressione di tanti, forse centinaia di geni. FOXP2, un regolatore implicato nella funzione del linguaggio, nella capacità di parlare, è molto conservato tra i mammiferi ma nell'uomo ha acquisito (solo) due mutazioni che alterano l'espressione di almeno un centinaio di geni, di cui alcuni importanti per lo sviluppo del cervello[9]. Recentemente sono anche stati trovati dei geni che sembrano attivi solo negli umani[10]. Le differenze del numero di geni tra le diverse specie, e delle strutture delle proteine derivate anche dai geni che sono conservati, sono note da tempo. L'opinione che queste differenze non possano spiegare le differenze tra l'uomo e il lievito, mi sembra francamente assurda. La stragrande maggioranza dei biologi e genetisti sostiene invece che proprio i cambiamenti genetici sono il «tassello mancante» della teoria dell'evoluzione di Darwin, in grado di spiegare l'origine della variazione casuale.

A prescindere dalla questione se il genoma possa spiegare le differenze tra le varie specie o meno, il modello del darwinismo cellulare sembra ignorare alcuni aspetti importanti dell'evoluzionismo darwiniano quando rifiuta la possibilità di scambio di segnali tra le cellule che possono indurre una cellula all'apoptosi (vedi sopra). Kupiec e Sonigno si chiedono comprensibilmente se le cellule – da loro considerate come «animaletti» indipendenti nell' «ecosistema» del nostro organismo – potrebbero veramente obbedire ad un «messaggio di morte» che senza dubbio va contro i loro interessi.

> Un tale programma di morte non è minimamente vantaggioso per la cellula interessata. [...] Come ha potuto l'evoluzione mantenere un programma tanto svantaggioso per la cellula che lo porta? (p. 158).

> Il beneficio ottenuto non viene goduto dalla cellula selezionata, ma dall'organismo nel suo complesso. Questo cambiamento di oggetto nella selezione – il vantaggio è ottenuto dall'organismo, ma è la cellula che si moltiplica – è estremamente problematico (p. 159).

Dimenticano che la riproduzione avviene proprio al livello dell'intero organismo. È vero che anche le singole cellule si moltiplicano, ma tra le popolazioni cellulari di un organismo e le popolazioni cellulari dei suoi discendenti non c'è la continuità che si avrebbe in un classico ecosistema. In altre parole: la popolazione cellulare di un animale muore con la morte dell'animale stesso. L'ereditarietà, e quindi la selezione naturale, riguardano la riproduzione dell'intero animale. Kupiec e Sonigo hanno ragione quando affermano che «la cellula è anteriore all'organismo, tanto dal punto di vista dell'ontogenesi quanto dal punto di vista della filogenesi» (p. 163), ma trascurano il fatto che dal punto di vista dell'ontogenesi l'organismo (che si riproduce) è anche anteriore alla cellula (l'ovocita o lo spermatozoo). Questo spiega perché possano svilupparsi delle funzioni che sono vantaggiose per l'organismo nel suo complesso pur essendo svantaggiose per alcune cellule. Basta ricordare che tutte le cellule dell'organismo portano lo stesso DNA (anche questo differenzia un organismo da un classico ecosistema). L'apoptosi è una delle funzioni chiave che, in condizioni normali, impedisce lo sviluppo tumorale. Se le cellule fossero libere di evolversi e cercassero solo di moltiplicarsi (come sostengono gli autori del libro), ignorando il «programma di morte» dell'apoptosi, allora il cancro dovrebbe essere un fenomeno molto più frequente, perché è proprio questo che avviene nella maggior parte dei

tumori. Per fortuna le cose non stanno così.

Un altro aspetto fondamentale della teoria di Darwin, che viene contraddetta, è che «nuove varietà si formano molto lentamente, perché la variazione è un processo molto lento e la selezione naturale non può agire finché non siano emersi casualmente delle variazioni favorevoli»[11]. Secondo Kupiec e Sonigo invece «è importante capire che l'evoluzione è un processo molto rapido. Quando un pericolo minaccia la vita, si deve rispondere immediatamente» (p. 208). Si può anche essere d'accordo che la selezione, non sempre ma almeno in alcuni casi, può essere un processo rapido, ma di sicuro non lo è l'evoluzione in sé.

Ma non solo a livello biologico il lavoro presentato non sembra molto convincente. Oserei dire che si basa anche su considerazioni filosofiche poco condivisibili. L'analogia fra il sistema metafisico di Aristotele e la genetica che «funzionano nello stesso modo, basandosi su concetti identici» (p. 84) porta al paragone tra il genoma (o il programma genetico) e il concetto di essenza che è in contraddizione con l'evoluzione darwiniana[12]. L'essenza secondo Aristotele, però è un'entità assoluta, immutabile, a prescindere dall'esistenza (quindi al di fuori dell'individuo). Il genoma (e quindi il programma genetico), al contrario, è una parte integrale e importante dell'individuo, e *si evolve* con esso, essendo oggetto sia di variazioni casuali suia dell'influenza della selezione naturale. Quindi dovrebbe essere considerato come facente parte dell'esistenza, e non di un'essenza astratta. Basta ricordare che in realtà non esiste «il genoma» di una specie, ma che *tutti gli individui*, anche della stessa specie[13], hanno un proprio genoma (simili tra di loro, ma quasi mai uguali). Rifiutare il modello attuale della genetica per ragioni soprattutto filosofiche (per di più errate), come fanno gli autori, è poco scientifico.
Paradossalmente, il darwinismo cellulare sostenuto dagli autori, e non la genetica, sembra aver fatto un passo indietro rispetto alla teoria dell'evoluzione di Darwin, perché l'idea che la presunta evoluzione cellulare all'interno dell'organismo, togliendo importanza al genoma, possa sempre portare allo stesso risultato (seguendo sempre un identico processo di embriogenesi), introduce indirettamente un determinismo nella teoria dell'evoluzione che Darwin stesso ha rifiutato.

Conclusioni

Mentre la genetica è sostanzialmente in armonia con l'evoluzione

darwiniana (anche se è a volte un pò troppo riduzionista, ma questo è un altro discorso), la teoria di Kupiec e Sonigo sembra avere, almeno in parte, gli stessi difetti di cui essi accusano la genetica.

Perfino Giulio Giorello, autore della prefazione nonché professore di Filosofia della Scienza presso l'Università degli Studi di Milano e Presidente della Società Italiana di Logica e Filosofia della Scienza (SILFS) ha affermato in un intervista:

> Personalmente sono portato a credere che nell'attuale dibattito sul «dopo genoma»[14] la posizione, come la presentano i due autori, sia un po' esasperata, e non sia proprio così: oggi non pochi studiosi del vivente sottolineano come i nostri geni siano importantissimi ma non siano tutto. A mio avviso è interessante vedere come si risponderà alle provocazioni di Kupiec e di Sonigo. [...] Io nel presentare questo testo non prendo posizione su quella loro tesi specifica ma lascio agli studiosi di biologia decidere se la provocazione di Kupiec e di Sonigo sia corretta o meno[15].

La mia risposta è netta, anche se Kupiec e Sonigo offrono alcuni (pochi) spunti di riflessione interessanti. Ma temo che proprio perché il libro si inserisce in un dibattito su argomenti difficili e molto specifici debba essere letto soprattutto da chi conosce questi argomenti sufficientemente bene da potersi fare una propria opinione. Ma «siccome le controversie in campo scientifico sono sempre un bene e non un male, speriamo che questa sia un'occasione per crescere»[16]

Anche il tono molto polemico fin dall'inizio del libro e il fatto che tanti concetti della biologia molecolare e della genetica vengano usati per l'argomentazione senza essere spiegati a sufficienza rendono la lettura difficile. A chi volesse sapere di più dell'evoluzione e della selezione naturale posso invece raccomandare di tornare alla fonte: *L'origine delle specie* di Charles Darwin, uno dei libri più belli che abbia mai letto (*Rosario Piro*).

Note

[1] Si vedano ad esempio gli articoli *Ribelli a Dio e al genoma* (Il Sole 24 Ore, 5 aprile 2009, p. 31) e *Libere cellule in libero stato – No ai dogmi di Dio e Dna* (Il Riformista, 2 aprile 2009, p. 17); entrambi riproducono una parte della prefazione del libro.
[2] Sarebbe più opportuno parlare di una «ipotesi», visto che il termine «teoria», nel mondo scientifico, richiede di solito un certo supporto da osservazioni e dati scientifici ben documentati.

[3] Il genoma è l'insieme di geni presenti nel DNA di un individuo. Anche se si parla ad esempio del «genoma umano», in realtà ogni individuo ha un proprio genoma (con poche eccezioni, per esempio tra gemelli omozigoti).

[4] L'ontogenesi é la genesi di un essere adulto partendo da una sola cellula iniziale. Come tale inizia ovviamente con l'embriogenesi, ma riguarda anche la crescità dell'organismo dopo la nascita.

[5] Il termine «darwinismo cellulare» non viene usato in *Né Dio né genoma*, ma in altre pubblicazioni più recenti degli stessi autori.

[6] Si veda anche: Marc Van Regenmortel, *Reductionism and complexity in molecular biology, EMBO reports* 5(11), p. 1016-20, 2004.

[7] Anche se poche righe dopo dicono sullo stesso argomento che "[...] non si capisce ancora come la debole specificità delle citochine possa assicurare la precisione della segnaletica richiesta dalle teorie attuali" (p. 185). Le citochine sono proteine che si legano a recettori della superficie cellulare e provocano la proliferazione (moltiplicazione) o la differenziazione cellulare (trasformazione da un tipo cellulare più generico, come le cellule staminali, ad un tipo più specifico, ad esempio i globuli bianchi).

[8] I promotori sono sequenze di DNA vicine ai geni a cui si legano i regolatori e altre proteine importanti per l'attivazione dei geni.

[9] Si veda: Genevieve Konopka et al. «Human-specific transcriptional regulation of CNS development genes by FOXP2», *Nature* 462, p. 213-8, Novembre 2009.

[10] Si veda: D.G. Knowles e A. McLysaght, «Recent de novo origin of human protein-coding genes», *Genome Research* 19(10), p. 1752-9, Ottobre 2009.

[11] Tradotto da: Charles Darwin, «The Origin of Species By Means of Natural Selection», John Murray, London, 1859; (ristampa di Penguin Books, London, 1985), p. 210.

[12] La maggior parte dei scienziati e filosofi concorda che l'essenzialismo è in contrasto con il darwinismo, ma esistono anche dei filosofi che sostengono che i due concetti possano convivere. Si veda ad esempio: Michael Devitt, «Resurrecting Biological Essentialism», *Philosophy of Science* 75, p. 344-382, Luglio 2008.

[13] Il discorso vale anche considerando le specie non come entità assolute, ma come insiemi di individui vicini tra di loro da un punto di vista evolutivo. L'esatta definizione del concetto di «specie» era già prima di Darwin un problema scientifico e filosofico.

[14] Il termine «ricerca post-genomica» si riferisce alla ricerca genetica dopo il sequenziamento del «genoma umano» avvenuto nel 2002. È importante notare che biologi e genetisti sono coscienti che non esiste «il» genoma umano, ma che ogni essere umano ha un proprio genoma, differente (anche se solo leggermente) dai genomi degli altri.

[15] Intervista a Giulio Giorello, pubblicata su «La Provincia» il 6 aprile 2009, p. 48.

[16] Intervista a Giulio Giorello, cit. R. Sario M. Piro – Università di Torino