

OLTRE LA SPECIE

biologia, tecnoscienza e identità dell'uomo

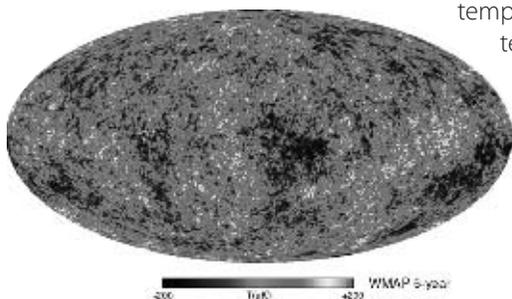
*di Carlo Soave**

Come emerge oggi dalla ricerca scientifica, in particolare dalla biologia evolutivistica, dalle biotecnologie, dalle neuroscienze, dalle scienze informatiche, la questione antropologica, cioè la domanda sull'uomo, sulla natura umana? Questo tema è stato messo a fuoco dall'autore nell'ambito di un corso di formazione per docenti (Natura e persona nell'epoca delle tecnoscienze) che poneva come ipotesi di lavoro l'idea che «l'identità dell'uomo non si individua attraverso un metodo di pensiero che rende l'uomo cosa, oggetto; si coglie piuttosto attraverso una narrazione dei fatti e degli atti che lo hanno generato e che prevediamo lo generino in futuro». Così, nel ricuperare le caratteristiche dell'uomo dalla storia che lo ha generato, siamo condotti a riflettere sulla strada che ha portato fino a noi, e a cercare in questa strada gli elementi caratteristici dell'identità umana per chiederci anche dove sta andando l'uomo.

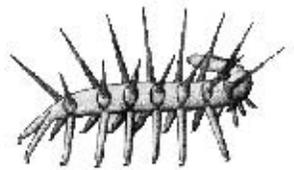
*Ordinario di Fisiologia Vegetale presso l'Università degli Studi di Milano.

¹ Si veda per esempio la foto dell'universo 379000 anni dopo il suo inizio ottenuta dal satellite WMAP (wmap.gsfc.nasa.gov).

Noi abitiamo un pianeta che rappresenta una parte infinitesima del cosmo: un pianeta abitato tuttavia da esseri che sono stati capaci, con la loro tecnologia, di vedere l'inizio del tutto.¹ La stessa scienza quindi che ci aveva relegato in un angolo infinitesimo del cosmo, facendoci vedere l'inizio del tutto ci rimette vicino al principio di tutto, ci riallaccia strettamente alla domanda delle domande: perché esiste il tutto, e io cosa sono? E poi come è andata la storia della vita? Anche qui la scienza ci racconta una storia incredibile: incredibile sia per la scansione temporale, che per l'imprevedibilità assoluta degli esiti. Un tempo lunghissimo di apparente immobilità (più o meno 3 miliardi di anni), poi un'esplosione di forme viventi (Cambriano, 570 milioni di anni fa) seguita da estinzioni spaventose (la fauna di Burgess Shale sparisce solo 40 milioni di anni dopo l'esplosione cambriana), e poi un'altra estinzione di massa 225 milioni di anni fa (fra paleo e mesozoico, più del 96% delle specie spariscono) e un'altra ancora 65



milioni di anni fa (dinosauri). E da tutto questo sconvolgimento, la linea che porterà a *Homo* è una linea infinitamente esile: un ramoscello microscopico. Eppure si mantiene, si distacca dalla grandi scimmie circa 10 milioni di anni fa, rimane praticamente ferma per milioni di anni fino ad un milione di anni fa con *Homo habilis* e infine poi solo 30.000 anni fa compare il *sapiens*. Noi siamo quindi una specie giovanissima, evento minuscolo, imprevedibile di una storia lunghissima costellata da sconvolgimenti terribili, ognuno dei quali avrebbe potuto spazzarci via come linea evolutiva migliaia di volte. Eppure siamo emersi da questo tempo profondo dotati di una capacità, l'intelligenza, in grado di trasformare il pianeta e sondare l'Universo. La risposta allora alla domanda del «come il tutto ha preso un cammino che porta fino a noi» ha una prima importante connotazione: siamo il risultato di un'incredibile serie di «coincidenze» favorevoli. Nessuno ci avrebbe scommesso. È opera del caso come dice Jacques Monod e della selezione del più adatto (teorie darwiniste e neodarwiniste) oppure altri meccanismi sono all'opera? E c'è uno scopo in questa storia, una tendenza, un fine? e se c'è, quale è? È lo scopo ultimo del vivente, in quanto vivente, la sua sopravvivenza, e tutte le strategie messe in atto dal vivente sono specificazioni di questo scopo, come affermano le teorie evoluzioniste? Certamente uno scopo appropriato della matrice operativa biologica è la sopravvivenza: ma se il fine fosse solo la sopravvivenza, allora i batteri sarebbero i più finalisti di tutti. Un'esplosione atomica planetaria spazzerebbe via tutti i viventi e solo i microrganismi potrebbero sopravvivere. C'è però un'altra tendenza presente ed evidente nella materia vivente ed è la sua capacità di cooperare a tutti i livelli, dal livello molecolare al livello di popolazione: i geni cooperano tra loro nel genoma, i genomi cooperano tra loro nelle cellule, le cellule nei tessuti, gli organi negli organismi, gli organismi nelle popolazioni, eccetera. La razionalità in fondo è lo strumento evolutivamente più recente e più potente di potenzialità cooperativa ed è quello tipico della specie umana.



Esempi di fauna del sito di Burgess

Lo stato delle teorie evoluzioniste

Ma vediamo qual è lo stato attuale delle teorie evoluzioniste. Innanzitutto l'evoluzione si deve considerare un fatto, molto più che un'ipotesi; evoluzione nel senso che i viventi si modificano nel corso delle generazioni, evoluzione nel senso di una storia di discendenza con ramificazioni che ci accomuna a tutti i viventi passati. La sintesi moderna è il paradigma corrente della biologia evoluzionista. Si veda per esempio quanto afferma Brian Charlesworth (1996) a proposito della sintesi moderna: «most evolutionary geneticists would agree that the major problems of the field have been solved. [...] We will never again come up with concepts as fundamentals as those formulated by the

² La maggior parte dei genetisti evolucionisti concorderebbe sul fatto che i maggiori problemi presenti in questo campo sono stati risolti.

“founding fathers” of population genetics». ² In breve i pilastri della sintesi moderna sono: la forma di un individuo dipende dai geni che possiede (genocentrismo, è quindi la sintesi moderna una teoria di geni, non di forme); le modificazioni indotte dall’ambiente nei geni non sono trasmesse alla progenie, cioè i caratteri acquisiti non sono ereditabili; le variazioni dell’informazione trasmissibile sono le variazioni dei geni (mutazioni) cioè del DNA che li contiene; la mutazione è un evento casuale, nel senso che non c’è nessun rapporto tra il variante che si produce e la funzionalità del prodotto che si genera; la possibilità di continuare a esistere nel corso delle generazioni di ogni variante fenotipica è il risultato della selezione naturale (processo fisico che porta alla sopravvivenza e al successo riproduttivo differenziale di quegli individui con varianti fenotipiche vantaggiose in un particolare ambiente) e quindi la persistenza di ciascun carattere risponde a necessità strettamente adattative.

È quindi la selezione naturale che si incarica di fissare le forme/funzioni dei viventi, trasformando gradualmente gli organismi e producendo sia modificazioni delle specie nel tempo (con il passare delle generazioni) che nuove specie (quando una popolazione si stacca o per motivi genetici, o ambientali, dalla specie cui appartiene e dà origine a una nuova specie).

In ultima analisi quindi la «sintesi moderna», con i suoi successivi aggiornamenti, afferma che l’evoluzione biologica risulta dalla selezione naturale che conduce alla lenta, cumulativa, graduale sopravvivenza non casuale di mutazioni geniche casuali. Su queste basi Monod (1970) poteva affermare «L’antica alleanza è infranta [...] Il caso, solo il caso è all’origine del tutto e il nostro numero è uscito alla roulette».

Ma vediamo se la ricerca scientifica più recente ha modificato in tutto o in parte i pilastri della teoria. Una prima importante modifica deriva dall’applicazione delle tecnologie moderne (genomica, proteomica, metabolomica, eccetera). Queste tecnologie documentano che il fenotipo è di gran lunga il prodotto non della somma delle azioni di tanti geni, ma è il *network*, l’insieme del genoma, che opera. Non c’è il «gene per» (come tanto spesso si legge sui giornali), ma c’è un insieme di tante azioni geniche coordinate. Inoltre, la rilevanza e diffusione nei viventi della plasticità fenotipica (quanti fenotipi, forme diverse può assumere un determinato genotipo quando esposto ad ambienti diversi) porta a una concezione non deterministica del genoma, ma a una concezione dove i geni e il genoma contengono l’informazione per fare strumenti e non prodotti. Cosa fare con gli strumenti messi a disposizione dal genoma dipende dall’ambiente in cui l’organismo si sviluppa e vive e dalla storia dei suoi predecessori. L’informazione trasmissibile alla progenie poi non è solo l’informazione contenuta nel DNA, ma anche l’informazione epigenetica sul DNA e su altre molecole (prioni), l’informazione culturale socialmente mediata (cognlie e bacche di ginepro) tramite apprendimenti non imitativi o imitativi è trasmessa alla progenie [Jablonka e Lamb 2007]. E ancora, la variazio-

ne (mutazione) dell'informazione trasmissibile a livello del DNA è casuale, ma anche non casuale (si veda per esempio la *global and local induced hypermutation*, Wright 2000); anche la variazione epigenetica non è casuale, come ovviamente anche gli altri tipi di trasmissione dell'informazione [Jablonka e Lamb 2007].

Significativo quindi, alla luce di queste evidenze, il commento dell'evoluzionista Massimo Pigliucci al recente *Evolution Meeting* (Stony Brook University, giugno 2006): «Does all of this mean that a much-heralded new synthesis in evolutionary theory is around the corner? [...] I think so, because new empirical and conceptual developments continue to enrich evolutionary biology far beyond the intellectual horizons delineated by (the founding fathers) Dobzhansky, Mayr, Simpson, among others».³

Quindi certamente c'è caso e necessità: il caso tuttavia è sempre meno rilevante man mano che si sale nella scala evolutiva: più si avanza, più altri meccanismi all'origine della variazione dell'informazione trasmissibile, si manifestano. Anche la necessità ovviamente esiste: è necessario l'adattamento, altrimenti la vita sparirebbe. Ma c'è anche un altro principio in azione, un principio di autoorganizzazione della materia vivente che porta fino a noi. Quindi, non solo resta irrisolta la domanda «da dove viene il tutto» ma si riapre potentemente anche la domanda «di come il tutto prende un cammino che arriva finalmente all'uomo (cioè quali sono le forze che agiscono all'interno dell'evoluzione e dirigono le sue strade) e dove andrà l'uomo».

Il quadro, a mio parere, che sta emergendo, è che gli organismi viventi, tutti, dai monocellulari ai più complessi, imparano a vivere vivendo e trasmettono quello che hanno imparato ai figli. Quindi la storia della vita è una storia popolata da soggetti attivi, che hanno costruito la propria vita, hanno reagito, inventato i modi per sopravvivere, per evolvere, sono cioè dei protagonisti continuamente all'opera, responsabili in prima persona, come individui e specie della storia della vita sulla terra. Non quindi soggetti passivi, irresponsabili, dipendenti solo dal caso che genera dei varianti «ciechi» tra i quali la selezione, la lotta per l'esistenza sceglie. Non più dono di caso e selezione ma un'evoluzione guidata dalle nostre azioni, ciascuno e ciascuna specie con il ruolo che si è in parte ereditato e in parte costruito. Il procedere dell'evoluzione biologica degli organismi viventi è quindi un percorso, una strada e, come tutte le strade, l'importante è dove sono dirette. La direzione dell'evoluzione è stata la conquista della coscienza, dello spirito: la materia vivente in dinamismo, momento nella storia dello spirito. Fino a che punto? Quale sarà la prossima tappa e il punto d'arrivo?



Theodosius Dobzhansky (1900-1975)

³ Tutto ciò significa che la nuova sintesi grandemente preannunciata della teoria dell'evoluzione sia a portata di mano? Io la penso così, nuovi sviluppi concettuali e sperimentali continuano ad arricchire la biologia dell'evoluzione ben oltre gli orizzonti intellettuali delineati dai padri fondatori, fra cui Dobzhansky, Mayr, Simpson.

Il ruolo della nostra specie

Quale allora il ruolo della nostra specie, quale la sua caratteristica particolare? Il primo problema che la scienza incontra nella ricostruzione dell'evoluzione della nostra specie è che non abbiamo parenti stretti, non conosciamo chi erano i nostri progenitori. Darwin riconosceva l'uomo come una specie morale, meglio il solo animale morale «capace di confrontare le sue azioni o motivazioni e approvarle o disapprovarle. Nessun animale ha questa capacità».

Sappiamo che esiste qualcosa che chiamiamo natura umana in base alla quale si ottengono reazioni caratteristiche comuni a tutti gli umani al presentarsi di situazioni reali.

Queste reazioni sono remote nella mente, ci differenziano dagli altri animali e ci definiscono umani. Sono il prodotto del nostro processo evolutivo, un processo iniziato solo 100.000-300.000 anni fa da un unico gruppo di circa 10.000 individui e le nostre diverse culture hanno impressionanti analogie. Siamo quindi una specie profondamente omogenea dal punto di vista evolutivo, una specie con una profonda unità e fermezza psichica che attraversa le diverse culture.

La specie umana ha in comune con gli animali paura, felicità, cautela, depressione e altre emozioni. La specie è tuttavia unica per una infinità di caratteri: per grandezza del cervello; per cure parentali lunghe che lasciano spazio alla cultura; per cultura trasferita in elevatissimo grado; per linguaggio che contribuisce a sviluppare il cervello; per coscienza di sé e pensiero; per intelligenza, superiore di molti ordini di grandezza a quella di animali intelligenti (scienza, arte, letteratura); per intelligenza che si è originata una volta sola 1-300.000 anni fa, 1 caso su 1 miliardo di specie (esistite-estinte e viventi). In una sola parola riassuntiva: una specie cosciente di sé.

L'unità dell'individuo

Ma non è questa l'unica unicità. Esiste anche l'unicità dell'individuo. L'adattamento del singolo uomo al livello basale (di specie) della natura umana sembra differire da individuo a individuo: a tutti i livelli, anatomici, fisiologici, neurofisiologici, comportamentali, cioè da persona a persona. Questo è il fondamento biologico del concetto di persona. Influisce la genetica e l'ambiente.

Ciascun individuo è unico entro la specie: lo testimoniano le prove dall'analisi del DNA (anche i gemelli monozigoti sono diversi) così come le prove dallo studio dello sviluppo del cervello: le diverse aree del cervello si determinano in modo individuo-specifico. Il dato scientifico quindi ci conduce a delle domande: perché la specie umana è l'unica specie cosciente di sé? Perché l'individualità dei singoli?

Unità duale

E inoltre un'altra singolarità della specie è il binomio io/tu. La singolarità sta nel fatto che le nostre menti (e quindi le nostre persone) sono costruite per essere sociali e cooperative (io/tu, unità duale). Nessuna altra specie ha percorso così a fondo questo sentiero evolutivo. Come specie noi dobbiamo il nostro successo ai nostri atteggiamenti sociali. Cioè, le espressioni, nel bene e nel male, del nostro *imprinting* sociale, della tipicità della natura umana sono già presenti nei cacciatori-raccoglitori del Pleistocene, sono all'origine della nostra specie. C'è un elemento biologico alla base di questa peculiarità? Il cervello umano è la struttura più complessa dell'universo: 100 miliardi di neuroni, ciascuno con 1.000-10.000 punti di contatto (sinapsi) con altri neuroni. Un ruolo importante all'origine della socialità sembra essere quello dei neuroni specchio. I neuroni specchio, scoperti nelle scimmie, rispondono attivandosi a un gesto o a un evento particolare e non è necessario che a compierlo sia la scimmia registrata oppure un animale che vede l'atto eseguito dalla scimmia registrata. In un individuo rispecchiano cioè l'attività del soggetto ma anche di altri soggetti diretti allo stesso obiettivo. Esistono anche nell'uomo, al quale permettono di leggere, almeno in parte, la mente altrui (il sistema sociale trova qui un suo elemento organico importante). In pratica, l'interpretazione del comportamento e delle espressioni facciali degli altri ci permette di comprendere le loro sensazioni.

I neuroni specchio hanno svolto una funzione importante nell'evoluzione dell'uomo: la cultura si acquisisce infatti per imitazione. Circa 70.000 anni fa il sistema dei neuroni specchio si è affinato al punto di permettere, da allora, una facile trasmissione culturale delle informazioni. Negli uomini empatia e neuroni specchio sembrano implicati anche nella comprensione di gesti, ancorché vaghi e imprecisi. Il cervello, cioè, è programmato per provare ciò che si sperimenta personalmente ma anche ciò che deriva da esperienze altrui. In questo senso il nostro cervello è in rete con altri cervelli; nella percezione unitaria dell'io c'è anche parte del tu.

Quale futuro per la nostra specie?

La storia recente della nostra specie è costellata da rivoluzioni tecnologiche che hanno cambiato il modo di essere e di vivere della nostra specie (il fuoco, le pietre scheggiate, l'agricoltura, i metalli, e via via fino alla stampa, alla rivoluzione industriale, alle comunicazioni -telefono- fino ad oggi). Il passato recente della nostra specie è stato totalmente determinato dalla storia della cultura più che dalla storia biologica. E il futuro? Rivoluzioni tecnologiche ancora più potenti si affacciano con capacità di incidere a fondo sul nostro substrato biologico e, di conseguenza, anche

sulla concezione di noi stessi. Da questo punto di vista le biotecnologie, in particolare le biotecnologie cellulari, quelle cioè che si occupano di colture cellulari, rigenerazione di tessuti e organi e di tecnologie riproduttive, sono tra le più rilevanti.

La clonazione

La novità più grande in questo campo, a mio parere, è che comincia a diventare evidente che ciò che è possibile (e si conosce già da tempo) per le cellule vegetali, è possibile anche per le cellule animali. Nelle piante è possibile rigenerare un individuo completo (clone) a partire da singole cellule adulte, differenziate (si pensi alle talee, ma anche alla attuale rigenerazione in vitro). Quindi le cellule adulte possono ritornare «embrionali», nel senso di totipotenti, o anche pluripotenti, o competenti a generare organi (organogenesi in vitro). Queste sono tecnologie in uso nelle piante da più di sessant'anni, sono ormai ben note e utilizzate per produrre «cloni» e l'esperienza acquisita ci ha permesso di trarre indicazioni di valore generale importanti. Ora sappiamo che è possibile reindirizzare il destino di singole cellule e quindi che la cellula biologica è un qualcosa di plastico che può cambiare la sua strada: occorre solo imparare a come fare per ridirigerla (e per questo ci vuole tempo, pazienza e fondi). La conseguenza è che si potranno produrre nuovi individui (cloni), oppure organi da qualunque tessuto; ovviamente da alcuni tessuti sarà più semplice, da altri più complicato. Sessant'anni di esperienza con le cellule vegetali hanno dimostrato però che i cloni hanno varie alterazioni, mentre l'organogenesi è più conservativa.

Queste evidenze, acquisite da tempo per le cellule vegetali, cominciano a essere verificate anche per le cellule animali. La conseguenza è che potrà essere possibile, tecnicamente, clonare individui, ma potrebbe essere poco conveniente in quanto si potrebbero produrre frequentemente individui alterati; non sarà poi conveniente utilizzare cellule embrionali (le cosiddette embrionali staminali) per rigenerare organi, meglio utilizzare le staminali «adulte», quelle presenti negli organi differenziati. In sintesi verrà messa a disposizione una medicina «sostitutiva» di organi non riparabili in altro modo (pelle, eccetera). Una conseguenza sarà il prolungamento della vita, ma quale vita? E con quali costi? E la vita di chi, di tutti? E fino a che punto? In questione quindi è cosa fonda il valore, il senso della vita di ogni uomo.

Clonazione e immortalità

Se queste sono le prospettive prossime delle biotecnologie, qual è però il loro impatto su come noi ci pensiamo, sulla nostra percezione di natura umana? La clonazione ci richiama immediatamente alla questione

dell'immortalità, la nostra fantasia ultima, la via per passare al di là della morte, clonarsi e riclonarsi all'infinito, come fanno i batteri. Siccome poi siamo consapevoli che il cervello, la mente è l'essenza di noi stessi, il problema diventa come conservare la mente (un cervello ibernato, un cd di un supercomputer, l'uomo ridotto a pura informazione), mentre la biotecnologia si preoccupa di riprodurre il nostro corpo sul quale impiantare il cervello.

Una soluzione, meno soddisfacente, ma comunque di valore, è un prolungamento significativo della vita (150-200 anni, biologicamente una sequoia vive anche più di 2.000 anni), in attesa di qualche soluzione biotecnologica che ci assicuri l'immortalità. L'immortalità d'altra parte esiste in natura. Pensiamo ai batteri: un batterio che si divide producendo due batteri figli non ha una madre che muore: la madre diventa uno dei due figli. Questa immortalità ha come caratteristica il rimanere identici: non c'è cambiamento.

Evolutivamente, quindi, la clonazione è un'involuzione, è una regressione allo stato primitivo dei viventi, associato alla eliminazione del sesso e della morte. La clonazione umana è quindi una regressione allo stato primitivo: cancella la generazione del diverso, che prevede la morte del vecchio. La storia evolutiva invece procede nel senso di generare il diverso, massimamente per le specie a riproduzione sessuata e per le specie culturali. Ne consegue l'emergere dell'individualità e, a livello cosciente, la persona.

Clonazione e individualità biologica

Ma allora, la clonazione fa perdere all'uomo la sua individualità biologica? La domanda nasce da quanto detto sulle potenzialità delle biotecnologie riproduttive e dalla constatazione che in natura in molte specie la clonazione, cioè la produzione di individui geneticamente identici, è un fatto non infrequente.

Dal punto di vista strettamente biologico non è vero, contrariamente a quanto si crede, che il clone sia identico all'originale. Bisogna tener conto che il fenotipo non è determinato dal genotipo: il genoma fornisce gli strumenti e la vita insegna come usarli e cosa fare con gli strumenti a disposizione (concetto di plasticità fenotipica). Il genoma come essente operante permanente e stabile (informazione immortale) dà la possibilità di operare, ma non determina il tutto dell'operazione.

La plasticità fenotipica è tanto più elevata, quanto più complesso è l'organismo vivente (i batteri sono poco plastici, cambiano solo per mutazione casuale o adattativa, gli organismi più complessi cambiano per modificazioni epigenetiche e, ai livelli più elevati, si cambia per contesto culturale). La clonazione quindi non distrugge l'individualità biologica, il soggetto biologicamente resta individuale, ha consapevolezza della pro-

pria individualità, agisce e reagisce in modo individuale: riduce tuttavia la biodiversità a livello della popolazione. In questo senso è involutiva. La domanda quindi è: perché clonare, a che scopo, per quale obiettivo? Non credo ci siano problemi per quanto riguarda la rigenerazione di tessuti e organi a partire da cellule differenziate (staminali adulte): si tratta di una forma di autotrapianto, che non passa attraverso la produzione di un embrione. I problemi in questo caso si pongono sul piano del prolungamento della vita e dell'invecchiamento.

Perché clonare l'individuo

Ma perché allora clonare l'individuo? Per quale motivo? Con quale fine? Perché si può fare, si deve fare?

È a questo punto che si deve considerare cosa c'è in gioco. Ma c'è un altro elemento di riflessione: oggi usiamo un altro termine per definire ciò che permette lo sviluppo di queste tecnologie: non è più la tecnica, ma la «tecnoscienza», una fusione di metodologia della ricerca scientifica con la sua applicazione tecnologica.

La tecnica come mezzo, strumento, prevede un soggetto, un uomo che la usa per determinati scopi definiti dall'uomo stesso, mentre la tecnoscienza, l'operatore razionale della metodologia scientifica, tende a svincolarsi dalla dipendenza dell'uomo che l'ha creata, in quanto proprio il metodo della scienza esclude dal suo orizzonte i giudizi di valore. In quest'ottica, la tecnica da mezzo diventa fine, il fine della tecnoscienza. Come il denaro, quando diventa mezzo per raggiungere ogni fine; allora avere denaro diventa il fine in quanto i fini secondi sono a lui subordinati. Se la tecnica diventa il fine, allora l'etica, l'agire (azione risultante da scelta di finalità) in vista di un fine perde il suo valore nel mondo della tecnoscienza.

Ciò che conta è il fare (conseguimento di risultati conseguenti a procedure), produrre effetti, risultati. Il fine della tecnica è produrre risultati, dietro ai quali l'etica continua a rincorrere. In quest'ottica l'oggetto e lo strumento costruito per conoscerlo prendono il sopravvento sul soggetto, che perde la sua funzione egemonica. ❖

Il presente contributo è tratto da una lezione tenuta al corso di formazione per docenti *Natura e persona nell'epoca delle tecnoscienze* organizzato da Diesse Lombardia in collaborazione con *Euresis e Prologos*, svoltosi presso il Dipartimento di filosofia dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano nei mesi di marzo e aprile 2008.

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- Charlesworth B., *The good fairy godmother of evolutionary genetics*, Curr. Biol. 6, 220, 1996.
 Monod J., *Il caso e la necessità*, Mondadori, Milano 1970.
 Jablonka, E., Lamb, M.J., *L'evoluzione in quattro dimensioni*, UTET, Torino 2007.
 Wright, B., *A biochemical mechanism for nonrandom mutations and evolution*, J. Bacteriol., 182, 2993, 2000.