

Giuseppe Longo¹

**Simmetrie e caso in biologia.
Riflettendo fra scienza e democrazia.²**

Trascrizione della registrazione audio.

Prenderò spunto, per la parte scientifica di queste riflessioni, da un articolo che Marcello Buiatti ed io abbiamo da poco finito di scrivere (“Randomness and Multi-level Interactions in Biology”, v. mia pagina web), un lavoro che ci ha impegnati di recente e che ha stretto ulteriormente il nostro antico rapporto d’amicizia, divenuto anche professionale negli ultimi anni. Ma parlerò di ciò in un secondo momento.

Inizierò invece facendo riferimento, ad un’altra passione comune, la passione democratica perché è quella che ci ha fatto incontrare e frequentare, le prime volte. Affronterò tuttavia la passione democratica non tanto parlando direttamente di politica, quanto del rapporto tra scienza e democrazia. E sono convinto che Marcello si riconoscerà nelle pratiche scientifiche a cui farò riferimento.

Democrazia e scienza

La mia prima considerazione è che la scienza, intesa come costruzione attiva del sapere scientifico, è *fragile*: e’ questa fragilità e’ dovuta in primis al fatto che il sapere scientifico, in particolare il sapere teorico, è sempre *contro il sapere comune*, sempre contro la teoria dominante. Ed è sempre un sapere *critico*: questo è ciò che lo rende fragile, ovvero il fatto che sia eccentrico rispetto al pensiero corrente di un dato mainstream epocale. Ora questo è particolarmente vero, e’ più vero in biologia, come vedremo, che in altre discipline scientifiche.

Ma non solo in biologia. Direi che quanto detto vale in ogni scienza che abbia un lato teorico, ma anche che sia alle prese con un rompicapo sperimentale. Il risultato del matematico, ad esempio, quasi sempre comincia dall’insoddisfazione, dal dire “*ma non è questo il teorema che andava dimostrato, non è questa la struttura che conta o che bisogna inventare per lavorare a tal problema*”. Anche nel momento del dettaglio, del lavoro quotidiano, anche di fronte al risultato modesto c’è questa insoddisfazione rispetto allo stato delle cose, presente tanto in chi, anche attraverso la sperimentazione, è concentrato sulla dimensione astratta, teorica, quanto in chi non ha accesso alla controparte empirica, come ad esempio in matematica, dove il voler cambiare sguardo è il motore principale dell’attività teorica. C’è sempre quella sensazione di quanclosa che non va, di una apparentemente disarmonia sul sottofondo: “*non è questa la pista da seguire ma un’altra*”.

Approssimativamente e ragionando sui tempi lunghi della storia (pur non essendo uno storico di professione) nella nostra cultura le radici di questo sapere critico, nelle sue forme essenziali in realtà iniziano nell’agorà greca, dove per la prima volta, che io sappia, si dà uno spazio di dibattito razionale. Un dibattito che è politico e democratico, e che da quell’esordio seguirà i tortuosi percorsi della storia dell’Occidente, attraverso rivoli e passaggi vari, fino al comune rinascimentale o al signore illuminato. Ovunque ci sarà uno spazio di discussione o uno spazio di pensiero, ovunque pensiero e discussione apriranno lo spazio del dissenso, lì ci sarà almeno un abbozzo di scienza, perché proprio questo è ciò che conta nel sapere scientifico. Lì, dal dissenso, potrà ad esempio nascere nel Rinascimento italiano la domanda naturalista: chiedersi come e perché quelle ali permettano all’uccello di volare, invece di guardare all’uccello solo come simbolo, il segno di

¹ <http://www.di.ens.fr/users/longo> Centre Cavallès, Cirphles, CNRS et Ecole Normale Sup., Paris

² Per gli Atti del convegno per il pensionamento di Marcello Buiatti (E. Gagliasso ed.), Pisa, aprile, 2012

una metafisica dell'ultraterreno, secondo un'ermeneutica rappresentativa della salvezza o del peccato, della fortuna o della sfortuna. La nuova domanda sul come, sottende invece la nascita di una nuova metafisica naturalizzante e, insieme, immerge la metafisica nel mondo. E con ciò andando contro la metafisica corrente, nasce lo sguardo naturalista, che aprirà alla nascita della scienza moderna.

E questi primi rivoli di un modo diverso di interrogare la natura, appena abbozzati, si sono poi ampliati e continuano in altri spazi di dibattito: nella città. Nella città italiana in primo luogo, fino ad arrivare, lo sappiamo bene, alla rivoluzione scientifica, con quel momento difficile, quello stretto passaggio epocale nevralgico che sono le vicende di Giordano Bruno e di Galileo Galilei. Giordano Bruno in fondo riprendeva idee di Nicola Cusano andando certo più lontano, ma in un diverso momento storico. Le idee sull'infinità dei mondi erano sempre meno accettate e il dibattito che ne era seguito andava scemando; c'era stata la Controriforma, donde il prezzo che pagherà Bruno, le difficoltà di Galileo e la temporanea stroncatura in realtà di tutto un filone di pensiero scientifico in controtendenza con i saperi normati del tempo.

Questa difficoltà, ma anche questa forza inventiva insita nel saper dire 'no' al pensiero dominante e al pensiero 'di prima', sono al cuore della creatività scientifica, del pensare diversamente, che è sempre necessario alla scienza come alla democrazia. Si dovrà di nuovo aspettare l'illuminismo per trovare uno spazio locale di dibattito che permetterà di nuovo l'unione della riflessione metafisica, della riflessione filosofica e di quella scientifica. Perché sempre, va detto, quando c'è una novità teorica nella scienza, c'è anche novità teorica in filosofia. Ma per arrivare a questo spazio accordato dal principe illuminato (o soltanto preteso tale dalle reazioni che verranno) quali difficoltà!

Buffon, uno dei più grandi teorici della storia naturale, dirà tra i primi che tutto il mondo vivente ha una storia, fatta di processi e di trasformazioni. Per questo sarà condannato nel 1752 dai Gesuiti della Sorbona e verrà costretto all'abiura ed al rogo delle sue opere. Ci vorrà Lamarck e la Rivoluzione Francese del 1789 per riaprire il discorso. Lamarck è un rivoluzionario, avrà una delle prestigiose dodici cattedre istituite al Museo di Storia Naturale, al *Jardin des Plantes*. Da rivoluzionario progressista, egli parlerà di "progresso delle specie", e questa accezione di evoluzione "ascendente" sarà la prima ad affermarsi.

Nel diciannovesimo secolo, va ricordato il ruolo dell'università pubblica, dell'Università di Stato, come direbbero oggi alcuni con disprezzo: da questa nuova istituzione sarà garantito lo spazio del dibattito, del dissenso, e ciò permetterà una vera e propria esplosione del pensiero scientifico.

Certe volte basta poco spazio di pensiero, poco spazio di dibattito, perché frammenti di scienza possano fiorire. Pensiamo alla situazione costrittiva dell'Unione Sovietica, dove in fondo solo nell'Accademia delle Scienze si poteva discutere, un po', non troppo, talvolta persino di politica. Ebbene lì le scienze teoriche, la fisica teorica e la matematica, sapranno trovare uno spazio, ed ad alto livello, utilizzando quello spiraglio ammesso per il dibattito. Ciò invece non accadrà in biologia. La grande scuola di biologia fertile fino agli anni '20 sarà 'orientata' dalla politica del materialismo dialettico, ed i biologi sovietici non allineati subiranno una sorte tremenda.

Insomma, il nodo centrale è che questo strettissimo rapporto tra scienza e democrazia ha un'andamento interattivo. Se è vero che il pensiero scientifico originale e creativo ha bisogno del respiro della democrazia, del dibattito, della possibilità di dissentire, per potersi dispiegare, il suo effetto si espande e ritorna vivificandola, anche sulla democrazia. Questo perché, appunto, ragionare di scienza insegna a discutere, insegna ad "osare pensare" a sviluppare il pensiero critico. Proprio quello che non è accettato ed è temuto innanzitutto da chi vuole un pensiero totalitario.

Sia chiaro che ciò che però conta in questo duplice rapporto tra scienza e democrazia non è la componente - che pure è importante per la democrazia - che si basa sul voto maggioritario, il

momento del consolidarsi attorno a una maggioranza che poi va a costruire o realizzare un progetto di società. Questa è uno dei due elementi costitutivi della democrazia, ma non è il costruirsi di una maggioranza governante che conta per la scienza. No, il rapporto che più conta, tra scienza e democrazia, è quello appunto dello spazio-possibilità del dissenso, del poter non essere tutti d'accordo, del poter sempre costruire un'alternativa. E' sempre un piccolo o un grande 'no' che costituisce la novità scientifica, l'attività stessa della ricerca, e che costituisce, in breve, quello che chiamiamo il progresso scientifico. Non c'è altro modo perché abbia luogo questo 'progresso', se non un piccolo o un grande no, che potrà essere locale o globale, momento della criticità intrinseca ad ogni passaggio scientifico.

Il 'no' del continuo cambiar di punto di vista, come ad esempio, l'approccio di Copernico e della svolta copernicana: vedere il sistema planetario dal punto di vista del Sole, ovvero cambiare la prospettiva. Copernico, osserva Van Fraassen, è facilitato forse dalla costruzione prospettica nella pittura italiana, che si è diffusa in Europa, perché essa è la costruzione di un punto di vista. Se si sposta il punto di fuga prospettico nel quadro, si cambia il punto di vista sulla scena. Questo sarà un ulteriore elemento, che si unisce alla possibilità del dibattito nell'Europa rinascimentale, ed aiuterà Copernico a vedere il sistema solare dal punto di vista, 'dalla prospettiva', appunto, del Sole. Ecco come il continuo mescolarsi del sapere scientifico a un sapere critico, può venire da strade esterne alla tecnicità scientifica, come nel caso dell'esperienza dell'infinito prospettico in pittura, e ciò in quel miscuglio complesso di metafisica e di realismo, e privo di compartimentalizzazioni disciplinari che fu il Rinascimento italiano.

E poi quale sforzo, quello di Einstein, di fare quell'altro 'cambiamento di prospettiva' che consiste nel mettersi 'dal punto di vista' del fotone per cogliere il ruolo dell'invarianza della velocità della luce! E' qualcosa di assolutamente stupefacente e ancora oggi non assimilato: questa invarianza rispetto ai sistemi di riferimento della velocità della luce, che cambia totalmente, d'un sol colpo, la visione della fisica, se la si guarda dal punto di vista di questo invariante del fotone, del raggio di luce, la velocità, audacia minoritaria all'epoca.

Non sto certo dicendo che in politica non bisogna mai essere in maggioranza e costruire insieme. Ovviamente questo è importantissimo nella prassi ed è lo scopo di governo della politica, ma direi che in scienza non è questo l'elemento centrale, anzi, oso dire - non bisognerebbe mai essere in 'maggioranza'. E' infatti dallo spazio del dissenso - che può anche costituirsi attraverso od all'interno di un filone maggioritario - che si crea la novità scientifica.

E' questo direi quel che oggi il neoliberismo non tollera: ovunque nel mondo proprio questa dinamica critica è in qualche modo messa in discussione, e purtroppo temo che di questo processo l'Italia, come già avvenne nel 1922, sia tristemente all'avanguardia, producendo come conseguenza una dolorosa messa in scacco del pensiero.

Quali sono i meccanismi di questo 'disciplinamento' della forza della critica? Tanti, ma direi, uno oggi è particolarmente eminente in scienza: la *bibliometria*, i metodi di valutazione automatica della produzione scientifica. La bibliometria è una specifica tecnica in cui delle macchine contano il numero di citazioni di un dato autore. Ogni ricercatore, nel curriculum e in ogni valutazione, si porterà appresso il valore numerico associato a questo voto maggioritario della scienza. Questo è proprio il metodo tecnico per impedire quel che dicevo prima: la possibilità del piccolo gruppo o di individui anche singoli, che, nel dissenso isolato, faranno e stanno facendo veramente scienza.

Ma a questo si aggiunge la cascata di premi, in particolare per giovani, il lavorare a progetti, il fatto di rendere sempre più difficile l'averne un posto fisso. In alcune università americane, cosa nuova, si sta abolendo **la 'tenure' (il posto permanente)**: si fanno contratti per cinque anni e poi, se non si portano abbastanza soldi con progetti adeguati, principale strumento di valutazione, si deve andar via; è un fenomeno nuovo ed è gravissimo. A ciò si aggiunge questo continuo voler 'rendere la ricerca competitiva', le equipe 'competitive' e i ricercatori 'competitivi': dove, rispetto cosa, con

quali valori? Quasi sempre sarà la bibliometria, il voto di maggioranza a premiare il “competitor” vincente.

Quello che invece conta, ed è difficilissimo nella ricerca scientifica, è la collaborazione. È difficilissimo perché i ricercatori bravi sono molto selettivi nella scelta dei collaboratori e nel trovare il dialogo. Ma quando si collabora, il principio fondamentale che io cerco sempre di insegnare ai miei allievi, accade che in due si pensa molto più del doppio. Quando si collabora si riesce a fare, ad esempio, attività interdisciplinare: non è pensabile che uno sappia tante cose, ma se si collabora si riesce a fare quello che, secondo me, oggi è la cosa più importante. Creare cioè uno spazio di interdisciplinarietà in cui stare a più voci, sia pure con difficoltà, ma inventando, grazie all’impegno comune e nel dialogo, strade nuove, fra le discipline, che è quanto di più affascinante esista, a mio avviso, del dibattito scientifico. Solo la libertà critica consente però la vera audacia teorica, non solo tecnica, propria all’interdisciplinarietà.

Spero che in questo omaggio al lavoro contro le correnti dominanti, alla interdisciplinarietà critica, Marcello riconosca un omaggio al suo contributo alla scienza.

Biologia

E adesso vorrei venire ad alcune considerazioni di tipo scientifico che cercherò di rendere il più informali possibile, per poi arrivare a dire qualcosa del lavoro sull’aleatorio in biologia che Marcello Buiatti ed io abbiamo da poco intrapreso. E per far questo partirò dal riferimento ad uno dei più ricchi pensieri teorici del ventesimo secolo, cioè il pensiero della fisica. Prenderò spunto da un punto di vista specifico, quello delle simmetrie.

Le simmetrie in matematica sono una nozione che ha uno statuto un po’ privilegiato. E questo perché la matematica è la scienza degli invarianti e delle trasformazioni che preservano gli invarianti. Le simmetrie hanno questo duplice statuto: sono invarianti (si pensi alle regolarità di una figura, di un’immagine geometrica) e sono anche trasformazioni che possono preservare queste ed altre invarianti, cioè che preservano delle regolarità che possono essere sia geometriche sia di altro tipo, teoriche.

La nascita della nozione moderna di spazio fisico è un bellissimo gioco tra Descartes e Galileo e può essere oggi riletta in termini di costruzioni di simmetrie. Ricordiamo cosa succede a quell’epoca: da una parte, Descartes propone la nozione di sistema di riferimento e con la geometria analitica matematizza lo spazio. Questa idea è grande novità, infatti la geometria greca era una geometria della figura e non una geometria dello spazio. Dall’altra parte, Galileo propone la nozione di inerzia, un invariante. Lo spazio inerziale, il riferimento inerziale, per l’esattezza, nasce tra i due sistemi di pensiero, spazio ed inerzia, grazie a quello che verrà poi chiamato il gruppo di Galileo: si tratta di trasformazioni, di simmetrie, che permettono di passare da un sistema inerziale galileiano a un altro e definiscono la relatività galileiana. Nasce così ciò che è al cuore della teorizzazione fisica, lo spazio-tempo e la sua trattazione matematica, con il gruppo di Galileo.

In seguito, ciascuno di questi passaggi scientifici, compreso quello alla relatività contemporanea, il passaggio ad Einstein, può essere visto come un cambiamento di simmetrie: cambia cioè il gruppo di simmetrie che regolano gli invarianti spazio-temporali.

Non è più il gruppo di Galileo, sarà invece il gruppo di Lorenz-Poincaré, che terrà conto di questo fatto che già ricordavo, straordinario, incredibile: dell’invarianza della velocità della luce. Costituirà la chiave per permettere il passaggio da un sistema di riferimento a un altro. Di nuovo un cambiamento di simmetrie permette di modificare radicalmente il quadro teorico dell’ambientazione dei fenomeni fisici, cioè lo spazio-tempo.

In tutto ciò, le simmetrie hanno dunque un ruolo enorme, ma implicito, perché solo il passaggio dal XIX al XX secolo ce le farà vedere come fondanti. Cosa accade? Tutta la costruzione della matematica, della fisica matematica, che inizia con Newton e Leibniz, ma in realtà poi sarà soprattutto dovuta a Lagrange, Laplace ed Hamilton, è orientata a capire il movimento. Con questi

ultimi, si capiscono i processi fisici in termini di estremizzazioni funzionali, grazie al principio geodetico. E' l'invenzione della nozione di geodetica, che unifica la fisica matematica da Newton ad Hamilton. E questa, sappiamo oggi, è una questione di conservazione di energia e momento, ovvero di simmetrie nelle equazioni.

Questo e' uno sguardo con il 'senno di poi', come hanno già proposto tanti prima di me, leggendo a posteriori quella scienza da fine settecento a meta' ottocento, basandosi sui lavori di E. Noether e di H. Weyl della prima meta' del XX secolo. Tali lavori ci fanno capire che le simmetrie nelle equazioni rendono intellegibili, ma anche giustificano matematicamente e d'un colpo solo, tutte le grandi proprietà di conservazione della fisica. Prima fra tutte, la conservazione dell'energia, che è una simmetria di traslazione rispetto al tempo, mentre la traslazione rispetto allo spazio caratterizza la conservazione del momento.

In breve, proprio le simmetrie permetteranno nel XX secolo di leggere all'indietro e di unificare intere aree della fisica, a partire dalla costruzione, come dicevo prima, dello stesso spazio-tempo, da Descartes-Galileo ad Einstein. E proprio ciò permette oggi di capire che si può fare a meno della parola di *legge fisica* perché una legge fisica non sarà altro che l'espressione di una geodetica, cioè di un percorso ottimale, in un adeguato spazio, con una sua metrica. Uno spazio delle fasi si dirà piu' in generale, cioè uno spazio di parametri ed osservabili che non necessariamente corrispondono allo spazio-tempo, e può quindi essere una struttura matematica molto astratta, ma in cui, e di nuovo, le simmetrie rendono intellegibili, e di un colpo solo, tutte le grandi proprietà della fisica.

Questo intero processo è parte del ricco e fecondo rapporto tra fisica e matematica, che iniziato con Descartes, Galileo, Leibniz e Newton, ha avuto una svolta ed arricchimento ulteriore tra ottocento e novecento, in quella che è stata chiamata 'la geometrizzazione della fisica e la fisicalizzazione della geometria': il doppio passaggio dovuto a Riemann e Einstein per la matematica e la fisica relativistica da una parte, ed a Poincaré per la geometria dei sistemi dinamici dall'altra.

In conclusione, si e' accennato al ruolo di strumento unificante e di intelligibilità che svolgono le simmetrie in fisica. Le stesse proprietà dell'oggetto fisico vengono capite in termini di simmetrie, ovvero di proprietà di invarianza e conservazione, che poi sono la stessa cosa.

Ho voluto dare questo ruolo chiave alle simmetrie, in parte perché lo ritengo del tutto generale, benché sia uno sguardo molto 'matematico' sulla fisica, e in parte perché ho lavorato con una collaborazione intensissima per quasi dieci anni con un fisico, che purtroppo ci ha lasciato due anni fa, e che sinteticamente si può dire fosse un fisico delle simmetrie, dotato di uno straordinario sguardo trasversale sulla fisica, Francis Bailly (si veda il libro ed i molti articoli che abbiamo scritto insieme dal 2004 al 2011, <http://www.di.ens.fr/users/longo>).

Ma la domanda a questo punto è: che fare di tutto ciò, di questo elegante e armonico apparato quando ci si rivolge alla biologia? Come passare al vivente è una questione che Bailly ed io ci siamo posti in collaborazioni crescenti con biologi, di cui l'ultima è appunto quella con Marcello Buiatti sulle questioni dell'aleatorietà, direttamente correlate a queste tematiche. In modo sintetico infatti, nelle teorie fisiche correnti, ogni evento aleatorio si può correlare, a mio avviso, ad una "rottura di simmetrie" - un tema che ho proposto ad alcuni colleghi in un progetto europeo - stranamente approvato, benché così teorico.

Si osservi che a me interessa il passaggio tra teorie dell'inerte e la teorizzazione in biologia, che è ancora in fieri, rispetto alle solide montagne teoriche su cui erge la fisica e che abbiamo alle spalle con la loro immensa ricchezza, ma anche col loro peso. Che fare in biologia?

Ripeto: il passaggio da una *teoria* dell'inerte a una *teoria* dello 'stato vivente della materia' (Buiatti, 2000) è al cuore del nostro lavoro, e non tanto il passaggio dall'inerte al vivente, che è altra cosa. L'analisi del passaggio 'dall'inerte al vivente' genera perplessità perché spesso sembra che si voglia impilare l'una sull'altra delle teorie fisiche per cercare di raggiungere, ascendendo dal basso,

il vivente. Ma, in mancanza di una teoria dell'organismo, mi domando, come si può vedere che cosa emerge dall'inerte? Occorrerà quindi prima una teoria dell'organismo: come impianto unitario, che colga l'unità dell'organismo, ecco ciò che ancora manca. Certamente abbiamo una splendida e ben corroborata teoria dell'evoluzione, da specificare ancora meglio; arricchita oggi con la riconsiderazione di aspetti lamarckiani, oltreché darwiniani; una teoria reticolare, che non dà più un "albero", un "corallo", come diceva Darwin. Tuttavia, pur con una teoria dell'evoluzione pluralista, con bei quadri di evo-devo, non abbiamo ancora una teoria dell'organismo.

Il dialogo benché difficile, è sempre più aperto con colleghi biologi che stanno ampliando un'area esistente da tempo, ma che ultimamente si è molto arricchita: la biologia matematica. Tra la biologia teorica, che mi appassiona, e la biologia matematica, c'è la stessa differenza che c'è tra la fisica teorica e la fisica matematica, una differenza tutta da approfondire, in quanto appunto si parla di campi in fieri. Avendo a lungo collaborato con un fisico teorico (Bailly) e con un fisico matematico (Thierry Paul), entrambi molto bravi e con spessore filosofico, ho potuto apprezzare la differenza nello sguardo e nella pratica scientifica, in fisica. Trasponiamole per analogia nel rapporto fra biologia teorica e matematica. La biologia matematica si basa oggi su di un lavoro crescente e di grande interesse. Due sono, fra tanti, i filoni principali: da una parte le analisi delle reti, reti cellulari di tutti i livelli, fino a quelle più complesse, le reti di neuroni; analisi sviluppate con strumenti della fisica statistica ed altri metodi raffinatissimi. Dall'altra parte (benché non del tutto separata), si può individuare l'analisi della genesi strutturale delle forme, anche questo non nuovo - percorsa già da D'Arcy Thompson, da Waddington, da Alan Turing, da René Thom. La genesi matematica delle forme ha applicazioni a svariate e lontane similarità strutturali degli organismi: dalla phyllotaxis, le forme delle piante, ad organi animali, come il polmone, con la sua struttura frattale, ed il sistema vascolare, pure derivabile, per la sua forma, da non banali equazioni non-lineari di diffusione e 'sprouting' (germogliazione). Tuttavia, si dà il caso che un tessuto, con la sua struttura certo frattale, faccia parte di un organo, che a sua volta fa parte di un organismo, e dunque non ne è in alcun modo isolato: la misura fisiologica di un'attività cardiaca, che induce lo sprouting del sistema vascolare, o di quella cerebrale che forza, sin da un terzo della gravidanza nei mammiferi, la struttura del polmone, non ha più alcun senso se si prende il cuore o il polmone e lo si chiude in un barattolo di marmellata. Così queste analisi si trovano sempre in crisi di fronte al fenomeno originale delle transizioni critiche, che ora vedremo, perché dimenticano che ogni tessuto, ogni dinamica di un organo ... è *regolato* nell'organismo in cui è *integrato*: questo salire e scendere dei rapporti causali, modifica interamente e rende impossibile l'autonomia di una analisi tutta giocata su di un unico livello di organizzazione e quindi di determinazione matematica (un sistema di equazioni, tipicamente).

Questo è, direi, il nodo centrale: tutta la fisica matematica tratta livelli di organizzazione omogenei, quindi di strutture di determinazioni omogenee, per definizione. Proprio nel caso di massima potenza, le equazioni differenziali, che sono la Rolls-Royce della matematica quando interagisce con la fisica, ebbene proprio allora si dà una struttura della determinazione che può essere di grande ricchezza e complessità tecnica, ma che inevitabilmente rende omogeneo il livello di analisi. Quindi non solo, così facendo, si analizza *un solo livello* di organizzazione, cioè il tessuto, l'organo isolato, ma per di più si analizza solo quel frammento che è totalmente esplicitabile con la struttura della determinazione proposta.

Invece, come dicevo, nell'organismo, il tessuto, l'organo, la cellula stessa, sono integrati e regolati da questa unità coesa, l'organizzazione globale. E' per render conto di questo continuo su e giù, di questo andirivieni causale che modifica le relative strutture di determinazione in maniera essenziale, che le stabilizza e le destabilizza, che Marcello Buiatti ed io abbiamo inventato, il termine di *bio-risonanza*. Come in tutti i fenomeni di risonanza, questi introducono un elemento di aleatorio, di destabilizzante: ad esempio, una cascata ormonale può subire una variazione al di sotto

dell'osservabile, che tuttavia può avere un ruolo visibile, addirittura catastrofico, in uno sviluppo tissutale.

Allora questo è il problema. Ci troviamo di fronte ad analisi egregie che trasportano, per esempio, quell'importante ruolo delle simmetrie, che s'è visto poc'anzi, come invarianza all'interno di sistemi di equazioni, sull'analisi di specifici livelli di determinazione biologica, ma questi sono solo parti di livelli di organizzazione. A grandi linee, manca una teoria dell'organismo nella sua unità, cui le analisi specifiche possono certo dare numerosi e illuminati contributi; tuttavia, non le si può confondere con il problema teorico centrale, pensando di avere una intellegibilità completa, né dell'organismo, né tantomeno dello stesso fenomeno locale. Infatti, le bellissime analisi che citavo possono dare la struttura (la dimensione) frattale dei polmoni, però poi, nel concreto, si sa che i polmoni rispettano la frattalità solo fino ad un certo punto: se la dimensione frattale calcolata è, per dire, 2.6 poi in realtà, a ben guardare, si vede che non si trova esattamente questo valore; che il polmone a destra è un po' diverso di quello a sinistra, che siamo tutti un po' asimmetrici, e che localmente ci sono mille piccole variazioni. E questo non è un 'errore'; primo, perché la nostra diversità è la ricchezza stessa di una specie, financo di una popolazione. Secondo, perché anche un individuo che abbia un filtraggio dell'aria diversificato, attraverso una struttura frattale un po' irregolare, in realtà è più adattivo a cambiamenti dell'ambiente. Quindi è proprio il tipo di sguardo che in biologia deve cambiare, rispetto l'invarianza imposta dalla matematica anche nell'analisi delle irregolarità frattali. La variazione, l'aleas sono consustanziali alle dinamiche biologiche, alla loro variabilità quindi alla diversità, e a causa di quest'ultima, esse sono al cuore della stessa stabilità strutturale, di una specie, di un ecosistema, di un organismo. In sintesi: in biologia l'aleatorio non è *rumore, errore* (di copiatura ad esempio, dicono i molecularisti, per cui l'evoluzione sarebbe un "errore" - peccato che il DNA, come programma non sia perfetto ...), bensì l'aleatorio implica la variabilità che implica la diversità che è una componente della *stabilità strutturale*, di un ecosistema, una specie, una popolazione, un individuo.

Come inglobare allora la continua presenza, e utilità, dell'aleatorio, centrale nell'analisi del biologico? Questo è l'oggetto del nostro lavoro recente, di Buiatti e mio.

La forza delle simmetrie, del ruolo delle simmetrie, comincia anzitutto, dalla cosiddetta *genericità dell'oggetto fisico*, che è del tutto analoga alla genericità dell'oggetto matematico; il che vuol dire che ogni oggetto concreto o astratto, grave di Galileo o quanton, è scambiabile con un altro: se la pietra di Galileo la si scambia con un'altra, se il fotone o l'elettrone lo si scambia con un altro, l'esperienza non cambia. Essi costituiscono un invariante della teoria e dell'esperienza. Possono subire, diciamo così, una *simmetria di scambio* senza problemi: ovvero, il gruppo di simmetrie di scambio si applica sia nella pratica sperimentale sia nella teorizzazione. Invece l'oggetto biologico non è affatto generico, è specifico e individuato, è il risultato di una storia che è 'precipitata' e concentrata tutta lì in quel dato ed unico oggetto biologico: la storia filogenetica della specie cui appartiene e la storia ontogenetica del suo sviluppo individuale. Ecco quindi un primo cambiamento fondamentale, ovvero quello del ruolo delle simmetrie che vanno dalla genericità dell'oggetto fisico alle sue proprietà.

In secondo luogo, e come ricordavo, le traiettorie in fisica sono delle geodetiche, sono *specifiche*, estremizzano un funzionale matematico (il Lagrangiano). Cioè, sinteticamente, in termini di simmetrie, si riesce a definire come unica la traiettoria dell'oggetto fisico, ottimale in un opportuno spazio delle fasi. Persino in fisica quantistica, dove i quanta non percorrono traiettorie, si è inventato uno spazio delle fasi, lo spazio di Hilbert, potenzialmente di infinite dimensioni, e dove un valore di probabilità, una legge di probabilità, va su una traiettoria, una geodetica, determinata dall'equazione di Schroedinger. Di nuovo, non è una particella che percorre una traiettoria derivabile dal lagrangiano, bensì una legge di probabilità, e quindi, per usare il paradigma di cui s'è detto, ci si inventa uno spazio fuori dal mondo, uno spazio di funzioni, di Hilbert, dove ciò che si 'muove' su

una traiettoria, una geodetica, è un valore di probabilità. E questa è la forza della teorizzazione fisica, la forza stessa dell'analisi fisica: l'unicità determinabile a priori e matematicamente, della traiettoria, nel senso più ampio.

Le traiettorie del vivente, le traiettorie filogenetiche, quelle embriogenetiche e ontogenetiche, sono invece generiche, sono dei possibili, solo compatibili con un ambiente co-costituito (parliamo di cio' a lungo nel libro con Bailly, di recente tradotto in inglese, v. la mia pagina web). Questa è la vera sfida: questa mano non è in alcun modo il risultato di un percorso ottimale, ma è *uno dei* percorsi possibili, come la zampa anteriore di un elefante o quella di un canguro, sono 'solo' percorsi evolutivi possibili dei vertebrati tetrapodi.

L'impossibilità di capire le traiettorie filo-ontogenetiche in termini di ottimalità geodetica è un grande problema teorico, perché il sapere che ha individuato le traiettorie specifiche in fisica come geodetiche, risulta da analisi in termini di simmetrie, struttura fondante, dicevo, la fisica matematica e teorica. Bisogna quindi cambiare prospettiva in biologia, in quanto si può individuare una dualità: l'oggetto generico della fisica diventa un oggetto specifico in biologia: esso è un ente individualizzato, storico. Invece, la traiettoria specifica della fisica, diventa una traiettoria generica del vivente (un "possibile" filo-ontogenetico).

Anche l'esplorazione di "tutti i possibili" che è concepibile in fisica subisce una torsione in biologia: di tutti? rispetto quale universo di possibili? Questa è la sfida di fondo dell'aleatorio biologico: in tutti gli ambiti teorici della fisica, anche in fisica quantistica, la lista dei possibili è *data prima*, dal punto di vista matematico e in astratto, può anche essere una lista infinita, ma è in maniera finita che si descrive una lista infinita di possibili: consideriamo un dado e le sue simmetrie ci dicono che i risultati possibili del lancio aleatorio sono sei. Così in tutti i settori della fisica, persino in fisica quantistica, dove si costruiscono spazi dei possibili molto astratti, di Hilbert ad esempio prima evocati, lì si può dare con una descrizione finita, grazie alle loro simmetrie. In generale, è (o serve) proprio (a) questo lo spazio fisico delle fasi. Nel caso del mondo del vivente, invece, in alcun modo noi possiamo dare la lista degli osservabili pertinenti, i fenotipi possibili, fra un milione d'anni, fra un anno e forse neanche domani.

Ancora oggi ci sono biologi molecolari che ritengono di poter dare la lista dei Dna possibili e quindi dei fenotipi. Ma pensare una cosa del genere è assurdo: per il Dna stesso (per le sue dinamiche, le sue regolazioni ed espressioni, la sua struttura mai fissa), ed ancor più per la sua correlazione al fenotipo. Se si fosse preso il Dna dei batteri di un miliardo di anni fa, nessun molecolarista avrebbe potuto dire che da lì, in uno spazio predeterminato dei possibili, sarebbe venuto fuori il naso dei mammiferi. Così in alcun modo un dato del mondo vivente può essere un pre-dato, cioè dato prima, un possibile predeterminato, come lo sono persino le infinite traiettorie possibili dell'integrale di Feynmann. Né per ciò occorre scomodare una scala di un miliardo d'anni: la lista de fenotipi di domani è *incompressibile*, la si può dare solo domani, meglio, dopodomani.

Ed è per questo che il "benevolo disordine", dello "stato vivente della materia", deve poter includere, in maniera intrinseca, un'analisi dell'aleatorio. Un aleatorio di per sé ben diverso da quello in cui la costituzione stessa dello spazio delle fasi (dei parametri ed osservabili possibili) è una componente dell'analisi dell'aleatorio, come in fisica: la biologia propone un aleatorio molto più forte, più radicale, in cui lo spazio stesso dei possibili è imprevedibile (si veda sulla mia pagina web, l'articolo in collaborazione con Stuart Kauffman). Naturalmente contro questa rottura del principio di pre-definibilità dello spazio dei possibili, delle fasi, come in fisica, si erige da tempo in vari ambiti teorici dominanti ancora oggi la restrizione della variabilità e della diversità (che stanno al cuore dell'aleatorio) nei margini di un 'errore di copiatura', 'mutazione', 'effetto di Dna spazzatura'. Confesso che quando si arriva da un'altra scienza, le prime volte che s'incontrano tali formulazioni, pur senza saperne ancora niente di preciso, ci si stupisce. Ci si stupisce anche dell'inerzialità di linguaggi su proposte oggi falsificate: il "Dogma centrale" della unidirezionalità

dal Dna all'Rna alle proteine, esauriva il suo potere esplicativo ... alla nascita. Eppure ancora oggi si incontrano alcuni colleghi biologi che pur non credendoci più non lo dichiarano ad alta voce, non lo scrivono, non osano. Venendo da altre scienze come la fisica o la matematica, costantemente autocritiche, si rimane esterefatti, come davanti a una sorta di ritorno dell'Inquisizione.

Eppure, fin dalla prima volta che l'ho letto il Dogma Centrale pensavo che, salvo qualche specifico caso nei batteri (che peraltro erano proprio l'organismo modello su cui si formula la teoria), nel mondo eucariote tale Dogma era di una rigidità poco plausibile, per semplici ragioni fisiche. Infatti, come si può pensare che una cellula eucariotica, con la situazione di turbolenza del citoplasma, con oscillazioni entalpiche quasi caotiche di macromolecole, esista qualcosa che invece va così dritta, lineare (senza interazioni e risonanze), che si trasmette in modo unidirezionale? Proprio dal punto di vista fisico, come si lo si può pensare?

Sembrerebbe quasi che il main stream della biologia molecolare, avesse un movente quasi di rivalsa contro la fisica. Per evitare il riduzionismo fisico classico ci si buttava sulla interpretazione comunicazionale: l'informazione, l'espressione, la traduzione, il segnale ... sembrano volersi differenziare dalla materialità della fisica.

Il ruolo dell'aleatorio può invece essere appunto questo: il superare questa visione del 'programma' che funziona, e che porta all'idealtipo organico come risultato, quello sì, del programma perfetto, cui, ahimé, si associano gli 'errori di copiatura'.

Invece per dirla in modo sintetico, che poi abbiamo scritto più estesamente nell'articolo con Marcello Buiatti, si può affermare che la dinamica del vivente va vista come *iterazione mai identica di un processo morfogenetico*. Ed è questo il cuore della sua specificità. Ovvero, l'esatto opposto della teorizzazione basata sulla nozione di programma, poiché questo è *l'iterazione sempre identica*, di regole di riscrittura simbolica. Insomma proprio tutt'altro mondo, basato cioè su una opposizione concettuale di fondo.

Esiste un ambito della fisica più recente che può essere di ispirazione per questa questione dei cambiamenti di simmetria. Un ambito non certo nuovo, ma che solo da quindici o vent'anni è diventato un settore teoricamente molto interessante: quello delle transizioni critiche. Se infatti torniamo a quanto detto sulle simmetrie, le transizioni critiche sono interessanti perché caratterizzate da un cambiamento improvviso e radicale di simmetrie.

Leibniz proponeva come principio di continuità il seguente: "quel che è vero fino al limite, è vero anche al limite". In prima approssimazione, come direbbe la matematica, per le funzioni **C-infinito**, questo è vero. In realtà ciò fallisce proprio nelle transizioni critiche. Queste sono situazioni in cui c'è qualcosa, in particolare le simmetrie, che resta invariato fino al limite, e che poi *al limite cambia radicalmente*. Un esempio interessante è la formazione di un fiocco di neve. Il parametro di controllo, l'umidità o la temperatura, o una combinazione delle due, fa sì che arrivando ad un certo valore, le simmetrie dell'acqua, l'omogeneità o l'isotropia, improvvisamente cambino in altre simmetrie, totalmente diverse, quelle di un fiocco di neve; cedono il passo cioè a quella che si chiama una *struttura di coerenza*. Questa è la segnatura delle transizioni critiche: 1. cambiamento di simmetria improvviso, conservando la continuità del processo rispetto a tutti i parametri pertinenti, 2. non **analiticità** della funzione, perché qualche derivata diverge, e 3. complessità massimale, cioè la complessità di un fiocco di neve rispetto alla situazione precedente dell'umidità dell'acqua, è infinita, ed è associata ad una grande sensibilità a piccole oscillazioni dei parametri di controllo (una minima oscillazione di temperatura od umidità e si ottengono simmetrie molto diverse).

Questa è una situazione fisicamente già molto interessante. Esiste un gran bel lavoro tecnico in fisica e ci sono state trasposizioni in biologia parzialmente interessanti. Il lor limite, di nuovo, è sempre nella necessità di isolare un livello di organizzazione o addirittura di determinazione a posteriori, in cui si può osservare la transizione critica avvenuta. Per esempio, si danno esempi di processi metabolici che sottostanno a certe transizioni critiche, fenomeni critici interessanti nelle

dinamiche neuronali periferiche, come ad esempio i neuroni dell'udito che oscillano intorno ad una situazione critica, e che, attraversandola, amplificano enormemente il fenomeno uditivo. Ci sono fluttuazioni critiche nelle cellule del sangue, nell'espressione genetica, e così via. Ogni mitosi è una transizione critica in cui compaiono cambiamenti di simmetria. Osservando queste analisi, spesso i colleghi che provengono dalla fisica, rimangono stupiti di come possa il vivente permanere in una situazione critica. Insomma l'acqua diventa fiocco di neve, ma o è acqua o è fiocco di neve e il passaggio è dunque puntuale; infatti la matematica delle transizioni critiche considera la transizione un punto matematico, un punto dove si dà questa struttura di coerenza, con i suoi cambiamenti di simmetria. Ma quando ci si domanda, come fisici, come faccia il vivente a stare lì sull'orlo della transizione senza che questa si verifichi subitaneamente, ebbene si dimentica, il luogo in cui avviene la transizione: un dato tessuto, un'attività metabolica, l'interazione delle cellule del sangue tra loro, che sono dentro un organismo che mantiene e regola i livelli di criticità.

E' per queste ragioni che da qualche tempo con Francis Bailly, prima, e Maël Montevil poi lavoriamo alla nozione di *transizione critica estesa*, in cui l'attività dell'organismo la si deve capire, non su un punto matematico di transizione critica, ma su un intero intervallo. Questo è un vero cambiamento di punto di vista, perché innanzitutto fa vedere il processo del vivente non semplicemente come un processo o una dinamica, ma piuttosto come uno star sempre su una soglia. Il vivente è sempre una transizione: ogni mitosi del nostro organismo è una rottura di simmetrie, in effetti una biforcazione che è critica, e noi perdiamo circa mezzo chilo di cellule al giorno. Ad ogni evento si osserva la formazione di una nuova matrice tissutale intorno alle due nuove cellule, e questa costituisce una *nuova struttura di coerenza*: da' luogo cioè ad una nuova struttura delle simmetrie che cambiano. Si tratta miliardi di transizioni critiche, una cellula che diventa due e, cosa fondamentale, le due non sono identiche fra loro. La differenza è sempre presente. Lo è nel **proteoma**, addirittura può esserci nel Dna, e sono queste differenze che sono essenziali all'embriogenesi ed a tutta l'ontogenesi.

Noi viventi insomma siamo sempre 'in corso di', *en train de*, cambiare. Cambiamo costantemente le nostre simmetrie interne, poco ma sempre. A livello minimo si potrebbe scendere alla criticità dei processi metabolici: poi ci sono tutti i processi ricostitutivi, c'è la simmetria di massima del *Bauplan* che grosso modo è conservata, ma con simmetrie interne che cambiano continuamente. In questo modo il cambiamento di sguardo rispetto la fisica è radicale, anche se ancora tutto da verificare, e consiste in questo vedere la dinamica del vivente, proprio all'opposto dell'ottica tipica della fisica per cui le dinamiche sono capite in termini matematici come simmetrie e conservazioni, e conservazioni di simmetrie. Invece, per noi, la dinamica del vivente è una cascata di cambiamenti di simmetrie – conservandone solo alcune (il *bauplan* e poco altro).

E' qui che interviene il ruolo dell'aleatorio perché, e' una mia congettura, ogni evento aleatorio dovrebbe potersi associare a un cambiamento di simmetria. In effetti, ogni volta che c'è un evento aleatorio questo, nelle teorie fisiche, va associato, ad un qualche livello di un'analisi matematica adeguata, ad un cambiamento di simmetrie.

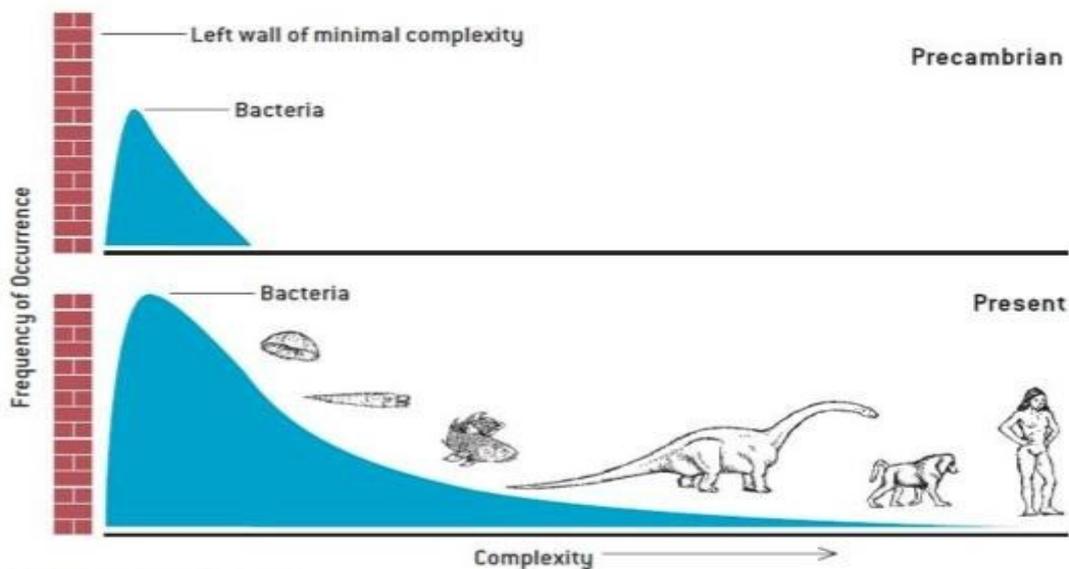
E' in questo mio progetto originario, che ci siamo collegati e ritrovati oggi con Marcello Buiatti e ciò ci permetterà spero di entrare insieme nel dettaglio di un'altra correlazione che io ritengo fondamentale: l'aleatorio che è analizzato nelle teorie fisiche, si può provare ad esportarlo anche all'analisi vivente, ogni qualvolta che è data l'irreversibilità del tempo?

L'irreversibilità del tempo significa essere in presenza di qualcosa di imprevedibile. Questo è convincente dal punto di vista psicologico, ma anche dal punto di vista tecnico, a mio avviso, l'aleatorio è la stessa cosa dell'irreversibilità del tempo. E' così in termodinamica, in fisica quantistica e anche in altri ambiti della fisica. Questo dà un ulteriore senso del ruolo dell'aleatorio, e se lo si collega all'analisi della bio-risonanza che Buiatti ed io abbiamo fatto nel nostro articolo

comune. E, come dicevo, l'analisi dell'aleatorio risulta centrale proprio nell'articolazione della variabilità e della diversità.

Contrariamente quindi a quella che è stata la forza matematica della teorizzazione in fisica, il 'dramma' scientifico e la sfida, da trattare per ora in termini teorici - e poi spero sempre più matematici, se si potrà fare - è che, a mio avviso, *l'invariante principale della biologia è la variabilità*, il che non è certo un piccolo problema concettuale. Ovviamente non è l'unico invariante, ne esistono altri, come le leggi scaling e di allometria, ma la "stabilità strutturale" non può essere considerato un invariante di tipo matematico (e qui dissento fortemente da René Thom, pur grande maestro). Anzi, come tornerò a dire, la variabilità ne è una componente essenziale.

Di conseguenza, in biologia si trovano certo degli invarianti sui generis, come i ritmi biologici o la struttura dei Bauplane, ma da capire in spazi molto astratti. È un grave limite l'ancorarsi allo spazio-tempo ordinario. Insomma bisognerebbe avere la fantasia dei fisici che fecero la fisica quantistica e, per trovare uno spazio in cui dare una determinazione, si inventarono spazi delle fasi di infinite dimensioni, di Hilbert, di Foch, che non hanno niente a che vedere con lo spazio-tempo ordinario. Quello che ancora manca in biologia, è l'invenzione di un buon spazio delle fasi, degli osservabili, tutto da inventare. Un accenno a ciò è forse rintracciabile in Gould, nel suo prezioso e semplice schema empirico (ma in realtà molto *insightfull*), della diffusione della biomassa sulla complessità (da S.J. Gould, *Full House*, 1989):



E tuttavia Gould non arriva a definire che cos'è la complessità del vivente, in generale: ha dei dati paleontologici, procede empiricamente ed inventa una diffusione su uno spazio astratto della complessità, che però non definisce. Ecco, questo è un pensiero teorico in abbozzo che contiene qualcosa di veramente innovativo. Mentre le diffusioni in fisica hanno luogo nello spazio, oppure di una materia dentro un'altra materia, e quindi in fin dei conti sempre nello spazio, Gould inventa un osservabile anche se non riesce bene a definirlo e lo indica come luogo per un'analisi dell'evoluzione estremamente originale, e proprio lì trova una regolarità della sommatoria dei percorsi aleatori: tendono, per diffusione, ad una complessità crescente, non prestabilita, non biased, ma tendenza aleatoria fondamentale di una diffusione asimmetrica. Anche su questo ho lavorato, come dicevo, con Francis Bailly e, più di recente con Maël Montévil, dando una giustificazione matematica della intuizione di Gould (v. i nostri articoli, in particolare quello presentato al recente convegno per i 10 anni della morte di Gould, scaricabili dalla mia pagina web, <http://www.di.ens.fr/users/longo>).

Ho iniziato con un discorso sul sapere minoritario, di dissenso, che fa la scienza da sempre, sull'interazione che essa ha con la democrazia, solo luogo possibile per il pensiero originale, critico. Ho avuto la fortuna di lavorare a lungo con un pensatore ebreo, profondamente ateo e con un forte gusto del pensiero "diverso", Francis Bailly – la sua morte recente e' per me, per tanti, ancora un immenso dolore.

Trovo elementi comuni con l'atteggiamento verso la conoscenza che ha Marcello Buiatti, altro ebreo ateo, in permanente ricerca di un'alternativa di pensiero, forse ancora più accanito nell'esplorare un "pensiero del no". Eva Jablonka racconta molto bene, nel suo libro "Evoluzione a 4 dimensioni" l'origine di queste pratiche intellettuali nella dialettica quasi testarda "del no" che accompagna il Talmud. Forse e' per questa comune ricerca di percorsi nuovi di pensiero che Marcello ha apprezzato il nostro lavoro e subito detto, la prima volta che ci siamo ri-incontrati, dopo 20 anni: "le transizioni critiche estese sono un'ottima idea". L'aleatorio, le rotture di simmetrie, ne sono al cuore, e su questo abbiamo di recente lavorato. Spero di continuare a lungo, con Marcello e con i nostri allievi, a percorrere queste strade esplorative, forse sbagliate, ma un contributo, speriamo, come i tanti che Marcello ha saputo dare, ad un pensiero propriamente biologico.