

- immagini : - ippocampo
- neurone nell'ippocampo
- zona paraippocampale
- corteccia entorinale mediale
- presubiculum
- parasubiculum

KANT E LE NEUROSCIENZE

Le intuizioni di spazio e tempo – due forme kantiane a priori – esistono nei nostri cervelli perché catturano fondamentali proprietà del mondo ed esistono nelle forme base sia negli uomini adulti che negli infanti, sia nelle persone delle società occidentali che in quelle delle società tradizionali in cui l'economia di sussistenza è ancora legata alla caccia e alla raccolta, e infine nei cervelli delle altre specie, che non possiedono linguaggio verbale e forme avanzate di cultura.

GIORGIO VALLORTIGARA

Lo studio dei fondamenti biologici della cognizione dello spazio, del tempo e del numero costituisce uno dei settori di ricerca di frontiera delle neuroscienze (Dehaene, Brannon, 2010; Haun et al., 2010). Sfrondata da tecnicismi, il messaggio principale convogliato da queste ricerche è che gli esseri umani condividono con gli altri organismi un'intuizione primaria di spazio, tempo e numero, e che tale intuizione non dipende da specifiche esperienze, bensì è necessaria per il costituirsi delle esperienze.

Consideriamo come esempio paradigmatico quello della rappresentazione dello spazio. A partire dalle classiche osservazioni condotte dall'anatomico John O'Keefe e dallo psicologo cognitivo Lynn Nadel con i ratti (O'Keefe, Dostrovsky, 1971; O'Keefe, Nadel 1971), sappiamo che nell'ippocampo, una struttura localizzata in profondità nel cervello, esistono delle cellule nervose la cui attività è modulata in maniera specifica dalla posizione occupata dall'animale nello spazio.

Quando un ratto collocato in un ambiente, poniamo un'arena di forma rettangolare, attraversa una regione particolare, per esempio un certo angolo, uno specifico neurone nel suo ippocampo aumenta la sua attività elettrica, indipendentemente da com'è collocato l'animale nell'angolo (non importa se di fronte o di spalle rispetto al vertice). Oggi a queste originarie «cellule dei posti», che scarica-

no quando l'animale è in una particolare posizione nell'ambiente (con cellule differenti che scaricano in posizioni differenti), se ne sono aggiunte varie altre, che formano una molteplicità di mappe spaziali nel cervello (Burgess, 2008). Vi sono innanzitutto cellule griglia (*grid cells*), che sono state scoperte di recente nelle aree paraippocampali (nella corteccia entorinale mediale e nel presubiculum e parasubiculum) e che sono caratterizzate dal fatto di scaricare quando l'animale si trova in un numero di differenti posizioni, organizzate però con sorprendente regolarità, in foggia di griglia esagonale che ricopre l'intero spazio disponibile, come una tassellatura dell'ambiente in cui l'animale si muove. La spaziatura, la fase e l'orientamento di cellule differenti può variare, mentre la struttura a griglia rimane costante per tutta questa classe di neuroni. Nelle stesse aree paraippocampali dove trovano sede le cellule griglia si possono rintracciare altre due specie di cellule nervose dedicate all'analisi dello spazio, le cellule direzione-del-capo (*head-direction cells*) e le cellule dei bordi (*border cells*). A differenza delle cellule dei posti, che come abbiamo notato scaricano sulla base della posizione occupata dall'animale in una particolare regione dello spazio, indipendentemente dal suo orientamento entro quella regione, le cellule direzione-del-capo scaricano solo quando l'animale è orientato in una particolare direzione, e cellule differenti sono sintonizzate su direzioni differenti. Le cellule dei bordi, infine, scaricano quando l'animale è vicino a una superficie estesa, un bordo nell'ambiente, ad esempio in prossimità di una parete di un'arena.

Da dove viene la selettività di risposta di questi neuroni? Si potrebbe immaginare che la loro attività rifletta un processo di apprendimento nel tempo delle caratteristiche dell'ambiente in cui l'animale è collocato. Invece, è stato documentato come l'attività di questi neuroni abbia una fortissima componente innata (Langston et al., 2010; Wills et al., 2010). Registrando l'attività delle cellule nei ratti di sole due settimane di vita, nel momento in cui per la prima volta gli animali aprono gli occhi e si avviano a esplorare l'ambiente, si è potuto osservare che i neuroni dello spazio sono già attivi e selettivi nelle loro proprietà di risposta. In particolare, l'attività delle cellule griglia nel presubiculum, che codifica la direzione, è da subito nei cuccioli indistinguibile da quella di un animale adulto. Anche gli altri tipi di cellule sono già attive, sebbene mostrino un progressivo affinamento nel corso delle successive settimane.

Delle due forme kantiane pure a priori, lo spazio e il tempo, quindi, possediamo oggi un'evidenza empirica diretta del fatto che vi sia almeno per la prima una componente innata, che precede

l'esperienza. Ponendo i ratti a differenti giorni d'età in ambienti nuovi e misurando il numero di neuroni che codificano i vari aspetti dell'ambiente si osserva infatti un aumento del numero di questi neuroni in funzione dell'età della prima esposizione a un particolare ambiente e non in funzione del numero di esposizioni a un medesimo ambiente. I processi maturativi sono quindi cruciali, non le esperienze fatte.

Questo tipo di risultati neurobiologici trova conferma negli esperimenti comportamentali. Sappiamo che una varietà di creature – insetti, uccelli, roditori, scimmie e bambini – sono capaci di riorientarsi usando la geometria dell'ambiente (Tommasi et al., 2012). L'esperimento tipo prevede che il soggetto sia collocato all'inizio in un'arena rettangolare, dove in un angolo c'è un obiettivo da raggiungere (diverso da specie a specie, come per esempio un giocattolo, un po' di cibo, un partner sociale...). Il soggetto è poi bendato temporaneamente e fatto ruotare su se stesso in modo da disorientarlo. Alla fine, sbendato, deve ritrovare l'obiettivo. In un ambiente a pianta rettangolare è possibile procedere solo a un riorientamento parziale, nel senso che vi saranno due angoli potenzialmente corretti e tra loro indistinguibili (quello originale in cui si trovava l'obiettivo è il suo equivalente rotazionale, collocato sulla diagonale opposta del rettangolo), che sono però distinti e distinguibili dagli altri due angoli del rettangolo sulla base di due semplici proprietà geometriche euclidee, la metrica dell'ambiente (per esempio, la lunghezza delle pareti) e la direzione di senso (la distinzione destra/sinistra). Tutti gli organismi studiati fin qui hanno fatto mostra di saper maneggiare una tale geometria intuitiva. Ma come riescono a farlo? Hanno bisogno di fare esperienza delle proprietà di un ambiente per apprenderle? Per scoprirlo si è proceduto sottoponendo all'esperimento animali molto giovani, che non avevano avuto accesso alle suddette fonti di informazione geometrica, oppure allevando gli animali in ambienti dotati di geometrie particolari per vedere se e come ciò influenzasse le loro capacità di riorientamento (Vallortigara et al., 2009). Gli studi condotti su una varietà di specie – dai pulcini ai pesci ai topi – hanno mostrato unanimemente che la codifica della geometria dello spazio non dipende e non è influenzata dalle esperienze precedenti. È qualcosa di cui gli animali appaiono essere già dotati alla nascita.

Un secondo dominio delle intuizioni kantiane riguarda il numero. Per Kant i giudizi matematici sono sintetici perché per poterli formulare è necessario ricorrere all'intuizione del tempo (successione) e dello spazio (estensione). In questo ambito la ricerca neuro-

scientifica ha prodotto risultati davvero sorprendenti. Il cervello dei primati non umani contiene, nella regione del lobo parietale, neuroni la cui attività è modulata in maniera selettiva dalla numerosità di un insieme. Ad esempio, questi neuroni mostrano un picco di attività alla presentazione, poniamo, di tre pallini su uno schermo di computer, oppure tre lampi di luce, o tre suoni, o tre movimenti di un arto... La risposta del neurone non è però limitata soltanto a un particolare numero cardinale (il «tre» in questo caso), ma vi è attività, progressivamente più ridotta, per i numeri vicini (il neurone risponde un po' meno al due e al quattro e ancor meno all'uno e al cinque). In pratica questi neuroni agiscono come dei filtri che sono selettivamente sintonizzati su un certo valore cardinale e la cui precisione di risposta è funzione della grandezza numerica (il neurone è molto preciso nella risposta a numerosità piccole, per esempio 2, e meno preciso per numerosità grandi, per esempio 12). Queste proprietà di risposta a livello cellulare mimano e spiegano quel che accade a livello del comportamento, sia nei primati non umani sia negli esseri umani. Se si chiede di confrontare due numerosità in condizioni tali per cui sia precluso un conteggio verbale esplicito, per esempio presentando in sequenza sullo schermo di un computer dei pallini per un tempo molto breve, e chiedendo alle persone (o alle scimmie) di discriminare quale delle due numerosità sia la più grande, si evidenziano due fenomeni caratteristici. Primo, l'accuratezza e la velocità della risposta dipende dalla distanza tra i numeri (si fa prima a dire che 6 è più grande di 2 che non a dire che 6 è più grande di 5); secondo, a parità di distanza tra i due numeri l'accuratezza e la velocità della risposta dipendono dalla grandezza dei numeri (si fa prima a dire che 5 è più grande di 4 che non a dire che 12 è più grande di 11). Nelle persone l'effetto si osserva anche utilizzando materiale di tipo simbolico, ovverossia, anziché dei pallini, dei numerali arabi (2, 3...) o i nomi di parole che indicano i numeri (due, tre...).

Queste rappresentazioni non linguistiche e non simboliche della numerosità sono in grado di supportare le operazioni combinatorie dell'aritmetica. Numerose ricerche hanno mostrato che animali di una varietà di specie, dai mammiferi agli uccelli, dagli anfibi agli insetti, sono in grado di compiere, in modo approssimato, addizioni, sottrazioni, moltiplicazioni, divisioni e operazioni d'ordine. Vi sono anche in questo caso precise indicazioni del fatto che queste capacità non sono il risultato di apprendimenti specifici. Pulcini appena nati e allevati con delle palline che fungono da oggetti d'imprinting - animali che non hanno quindi avuto esperien-

ze precedenti relative alla sottrazione o aggiunta di oggetti – spontaneamente si dirigono verso schermi opachi dietro i quali hanno visto scomparire un maggior numero di oggetti, e sono altresì in grado di tenere a mente la successiva addizione e sottrazione di oggetti, usando il numero e non le proprietà fisiche continue (area, perimetro, densità...) degli oggetti stessi (Rugani et al., 2009). Lo sviluppo della matematica simbolica e verbale ovviamente è un tratto unico della nostra storia culturale (un tratto, tra l'altro, molto recente, perché vi sono ancora nel mondo popolazioni tradizionali con un lessico che include solo parole per indicare uno e due, e che si riferiscono a tutte le altre numerosità con quantificatori generici come «molti» [Gordon 2004; Pica et al., 2004]). L'uso di simboli esterni può essere insegnato anche alle specie non umane in una certa misura ed è interessante osservare che, esattamente come accade nella nostra specie, sono i neuroni della corteccia prefrontale, che ricevono le informazioni dai neuroni del numero della corteccia parietale, a mediare la codifica simbolica (Diester, Nieder, 2007).

La dimostrazione forse più sorprendente che le rappresentazioni non verbali e non simboliche della numerosità costituiscono i fondamenti dello sviluppo del concetto di numero nella nostra specie viene dagli studi che hanno rivelato una correlazione precisa, e in alcuni casi un nesso causale, tra la capacità matematica non simbolica e quella simbolica nei vari individui. Se si sottopongono bambini di età prescolare a semplici test di stima della numerosità del tipo sopra descritto (per esempio, sullo schermo di un calcolatore compaiono per pochi istanti pallini gialli e pallini blu, con la consegna di dire se vi siano più pallini gialli o più pallini blu) si osserva una notevole variabilità individuale: alcuni bambini sono molto precisi, altri sono abbastanza precisi, altri ancora sono assai poco precisi. Se a distanza di anni si osservano gli stessi bambini, che nel frattempo hanno iniziato la scuola, e si misura la loro abilità nei test di matematica formale, dove ancora si osserva ovviamente una grande variabilità individuale, appare evidente una correlazione stretta tra le due misure: i bambini allora più bravi nei test della numerosità sono anche più bravi nella matematica formale e viceversa. Tutto ciò è per certi aspetti molto sorprendente, perché nulla di linguistico e simbolico è presente nel test dei pallini gialli e blu. Eppure la correlazione è molto precisa e riguarda solo la matematica (non vi è relazione tra l'abilità a svolgere il compito della numerosità dei pallini gialli e blu e le abilità logiche, di vocabolario o d'intelligenza generale).

Che pensare i numeri senza nominarli sia perfettamente possibile e che, in generale, le operazioni di tipo combinatorio che riconosciamo essere presenti nel linguaggio, come la ricorsività, non siano realizzate nel medesimo substrato neuronale dedicato alle capacità numeriche è dimostrato sia da evidenze cliniche che dagli studi di neuroimmagine (Monti et al., 2012). Ad esempio, pazienti con lesioni alle aree perisilviane dell'emisfero sinistro e che sono così gravemente danneggiati nelle capacità linguistiche da non saper cogliere la differenza tra «il cane morse il gatto» e «il gatto morse il cane» sanno tuttavia risolvere problemi di algebra che implicano la ricorsività (Varley et al., 2005).

Le neuroscienze forniscono un supporto sostanziale all'idea che spazio e numero costituiscano delle intuizioni primarie, incarnate nell'attività fisica dei nostri cervelli (e lo stesso vale per aspetti quali il tempo e la causalità che non abbiamo trattato qui [Leon, Shallden, 2003; Mascalzoni et al., 2013]). In effetti queste ricerche suggeriscono anche qualcosa in più rispetto all'idea originaria di Kant. Non solo spazio, tempo e numero sono intuizioni predisposte nel nostro cervello, ma forse sono l'espressione di una sottostante e più basilare realtà, quella della rappresentazione nel cervello della «magnitudo». Gli organismi biologici hanno la necessità di rappresentarsi le quantità in una moneta comune, perché in molte circostanze devono condurre delle computazioni che riguardano simultaneamente aspetti diversi quali il numero e il tempo, o lo spazio e il tempo (si pensi, come semplice esempio, a quando gli animali devono valutare il tasso di variazione di una fonte di approvvigionamento per stabilire quando è opportuno farvi ritorno, calcolando perciò assieme numero e tempo). Molti ricercatori oggi pensano che il lobo parietale del cervello potrebbe essere la sede di un sistema generale di rilevazione della magnitudo mentale, che fornirebbe una metrica unica e comune per la stima delle quantità, che si tratti di spazio, tempo o numero.

Cosa penserebbe Kant di tutto ciò? Elizabeth Brannon e Stanislas Dehaene, che hanno curato recentemente un volume dedicato alla rappresentazione di spazio, tempo e numero nel cervello (Dehaene, Brannon, 2011), hanno scritto che se Kant fosse qui oggi sarebbe un neuroscienziato cognitivo. Tuttavia bisogna riconoscere che a priori, dal punto di vista di Kant significa «necessariamente vero», un po' come accade in matematica, e non «innato». Lo spazio, per esempio, secondo Kant costituisce una condizione trascendentale per la nostra rappresentazione del mondo. Noi oggi però riconosciamo che, come ha notato Konrad Lorenz (1985), gli a

priori kantiani sono in realtà degli a posteriori filogenetici. Quindi possiamo congetturare che, seppure continuando magari a esercitare la sua benemerita attività di filosofo, Kant sarebbe probabilmente deliziato da questi sviluppi della scienza del cervello e della cognizione. Per inciso, sviluppi che non ammettono alcuna interpretazione filosofica in senso antirealista o postmodernista. Le intuizioni di spazio, tempo e numerosità esistono nei nostri cervelli perché catturano fondamentali proprietà del mondo, ed esistono in forma basicamente simile nel cervello degli uomini adulti e degli infanti, nei cervelli delle persone delle società occidentali e in quelli delle persone delle società tradizionali in cui l'economia di sussistenza è ancora legata alla caccia e alla raccolta, ed esistono infine nei cervelli delle altre specie, che non possiedono linguaggio verbale e forme avanzate di cultura.

OPERE CITATE

- N. BURGESS, 2008, «Spatial Cognition and the Brain», *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124, pp. 77-97.
- S. DEHAENE, E.M. BRANNON, 2010, «Space, Time, and Number: A Kantian Research Program», *Trends in Cognitive Sciences*, 14, pp. 517-519.
- S. DEHAENE, E.M. BRANNON, 2011, *Space, Time and Number in the Brain*, Elsevier, London.
- I. DIESTER, A. NIEDER, 2007, «Semantic Associations Between Signs and Numerical Categories in the Prefrontal Cortex», *PLoS Biology*, 5, 11, e294.
- P. GORDON, 2004, «Numerical Cognition without Words: Evidence from Amazonia», *Science*, 306, pp. 496-499.
- D.B.M. HAUN, F. JORDAN, G. VALLORTIGARA, N. CLAYTON, 2010, «Origins of Spatial, Temporal and Numerical Cognition: Insights from Animal Models», *Trends in Cognitive Sciences*, 14, pp. 477-481.
- R.F. LANGSTON, J.A. AINGE, J.J. COUEY, C.B. CANTO, T.L. BJERKNES, M.P. WITTER, E.I. MOSER, M-B. MOSER, 2010, «Development of the Spatial Representation System in the Rat», *Science*, 328, pp. 1576-1580.
- M.I. LEON, M.N. SHADLEN, 2003, «Representation of Time by Neurons in the Posterior Parietal Cortex of the Macaque», *Neuron*, 38, pp. 317-327.
- K. LORENZ, 1985, «La dottrina kantiana dell'a priori e la biologia contemporanea», in *Natura e destino*, Mondadori, Milano, tr. di *Das Wirkungsgefüge der Natur und das Schicksal des Menschen*, Piper, München 1978; ristampa dell'originale «Kants Lehre vom Apriorischen im Lichte gegenwärtiger Biologie», *Blätter für Deutsche Philosophie*, 15, 1941, p. 194.

E. MASCALZONI, L. REGOLIN, G. VALLORTIGARA, F. SIMION, 2013, «The Cradle of Causal Reasoning: Newborns' Preference for Physical Causality», *Developmental Science*, 16, pp. 327-335.

M.M. MONTI, L.M. PARSONS, D.N. OSHERSON, 2012, «Thought beyond Language: Neural Dissociation of Arithmetic and Natural Language», *Psychological Science*, 23, pp. 914-922.

J. O'KEEFE, J. DOSTROVSKY, 1971, «The Hippocampus as a Cognitive Map. Preliminary Evidence from Unit Activity in the Freely-Moving Rat», *Brain Research*, 34, pp. 171-175.

J. O'KEEFE, L. NADEL, 1987, *The Hippocampus as a Cognitive Map*, Oxford University Press, Oxford.

P. PICA, C. LEMER, V. IZARD, S. DEHAENE, 2004, «Exact and Approximate Arithmetic in an Amazonian Indigene Group», *Science*, 306, pp. 499-503.

R. RUGANI, L. FONTANARI, E. SIMONI, L. REGOLIN, G. VALLORTIGARA, 2009, «Arithmetic in Newborn Chicks», *Proceedings of the Royal Society of London. Biological sciences*, 276, pp. 2451-2460.

L. TOMMASI, C. CHIANDETTI, C., V.A. SOVRANO, T. PECCHIA, G. VALLORTIGARA, 2012, «From Natural Geometry to Spatial Cognition», *Neuroscience and Biobehavioural Reviews*, 36, pp. 799-824.

G. VALLORTIGARA, V.A. SOVRANO, C. CHIANDETTI, 2009, «Doing Socrates Experiment Right: Controlled Rearing Studies of Geometrical Knowledge in Animals», *Current Opinion in Neurobiology* 19, pp. 20-26.

R.A. VARLEY, N.J.C. KLESSINGER, C.A.J. ROMANOWSKI, M. SIEGAL, 2005, «Agrammatic but Numerate», *Proceedings of the National Academy of Sciences Usa*, 102, 2005, pp. 3519-3524.

T.J. WILLS, F. CACUCCI, N. BURGESS, J. O'KEEFE, 2010, «Development of the Hippocampal Cognitive Map in Preweanling Rats», *Science*, 328, pp. 1573-1576.