

FISICA DELLA CITTÀ

LA DINAMICA DEGLI INDIVIDUI NEI SISTEMI URBANI

ARMANDO BAZZANI, BRUNO GIORGINI*, SANDRO RAMBALDI

Laboratorio di Fisica della Città, Dipartimento di Fisica e CIG

Università di Bologna, Italia

INFN, Sezione di Bologna, Italia

"Triste quella vita che non vede, non ode, non sente se non che oggetti semplici" (G. Leopardi)

Nel presente articolo descriviamo brevemente cosa intendiamo per Fisica della Città, e in particolare presenteremo delle applicazioni ai problemi della mobilità urbana. Lo sviluppo di questo campo di ricerca è stata una naturale conseguenza di nuove tecnologie sperimentali per i sistemi sociali, che permettono la raccolta di dati a livello microscopico individuale. Nei modelli da noi elaborati abbiamo, oltre a una dinamica propriamente fisica, una dinamica decisionale e/o cognitiva con l'emergenza di fenomeni robusti di autorganizzazione. L'implementazione algoritmica permette la costruzione di universi urbani virtuali dove è possibile sperimentare un ampio ventaglio di situazioni, anche quando materialmente sarebbe assai difficile e/o costoso realizzarle. *In silico* possono essere rappresentate e studiate le traiettorie individuali e le configurazioni del sistema, con le eventuali transizioni di fase, mettendo in evidenza i parametri di governo e le soglie critiche. Mostriamo inoltre alcuni casi reali di dinamica di folla e pedonali studiati al Carnevale di Venezia, nonché le traiettorie automobilistiche desunte da una grande quantità di dati GPS diffusi su tutto il territorio nazionale. Lo studio delle dinamiche microscopiche attraverso metodi di ricostruzione da serie di dati temporali e i modelli della Meccanica Statistica, ha lo scopo di mettere in luce l'esistenza di leggi macroscopiche generali e la loro connessione con la complessità intrinseca del sistema.

www.physicsofthecitylab.unibo.it

www.fisicadellacitta.it

www.physycom.unibo.it

1 Introduzione

La città è per eccellenza il luogo dove nascono e si sviluppano la civiltà umana e la società, fin dagli albori dei tempi storici. E oggi oltre il 50% dell'umanità abita in città, la cui crescita in numero e taglia fu nel secolo scorso, il '900, straordinaria. Sulla città e le civiltà urbane si sono esercitati sociologi, filosofi, preti, politici, ingegneri, mercanti, strateghi, urbanisti, architetti, scrittori, poeti e quasi ogni scienza traendone teorie, sperimentazioni, costruzioni, estetiche, concezioni del mondo, teologie. Più rara è la presenza dei fisici e del loro sapere.

* brunogiorgini@bo.infn.it

Non fu sempre così. Per Aristotele la *physis* – la natura – del cosmo e della città erano la stessa, si potevano indagare con gli stessi strumenti concettuali e sperimentali: in particolare la geometria. Ma poi l'armonia – il *cosmos* – si rompe. Da una parte le scienze dell'uomo fondate sul libero arbitrio (il *free will* inglese – la libera volontà – è forse più appropriato), quindi quasi per definizione difficilmente matematizzabili e non soggette in modo stringente al paradigma causa-effetto. Dall'altra le scienze che alzano gli occhi al cielo scoprendo l'eterno ripetersi delle orbite celesti ben determinate e prevedibili, con le simmetrie che sottendono l'ordine dei corpi celesti. Si creano così la filosofia del soggetto, se si vuole il *Γνωθι Σεαυτον*, il conosci te stesso socratico, e la filosofia

naturale, essenzialmente la fisica. Una fisica profondamente deterministica, seppure Lucrezio lascia spazio al caso tramite il *clinamen*. Ma lui era un poeta e ogni licenza gli era permessa. Tale situazione cambia quando lo sviluppo tecnologico permette di acquisire importanti moli di dati per i sistemi biologici e i sistemi sociali, così che è possibile un approccio fisico basato sulla dualità teoria-esperimento. In questo modo nasce intorno agli anni '50 l'interesse delle discipline scientifiche per il traffico [1], proponendo una teoria del flusso autoveicolare. Seguono altri contributi significativi come l'approccio cinetico al traffico di Prigogine e Herman [2] e il modello microscopico ad automi cellulare di Nagel e Schreckenberg [3]. Tra i ricercatori vi era la convinzione che la città potesse essere trattata come un sistema termodinamico non troppo lontano dall'equilibrio, le cui leggi macroscopiche siano deducibili facendo la media sulle dinamiche microscopiche. Da questo punto di vista la mobilità urbana diventa la realizzazione di uno stato stazionario: da una parte la richiesta dei cittadini di muoversi secondo uno schema origine-destinazione (OD) che cresceva con l'espandersi della città, dall'altra le infrastrutture di trasporto sempre più efficienti. Tale schematizzazione veniva però contestata sia dagli urbanisti [4], che dalla nascente Scienza della Complessità, che proponeva lo sviluppo di approcci olistici allo studio dei sistemi aventi a che fare con le dimensioni della vita e dei viventi. Infine le osservazioni empiriche mettevano in luce l'inadeguatezza dei modelli [5] globali a governare le situazioni critiche di non equilibrio, a tener conto degli effetti cognitivi, a prevedere la fragilità delle reti di trasporto, in poche parole, a riprodurre la natura complessa della mobilità urbana. Sotto questo punto di vista la Fisica dei Sistemi Complessi permette di buttare un occhio e forse ben più di un occhio a quel fenomeno straordinario che è la città [6].

2 La Fisica della Città

Proviamo a pensare per un momento la città come un insieme molto intrecciato di *flusso/i* (di individui, di energia, di intelligenze, di conoscenze, di immaginario, di tecnologie, di violenze, di lingue, di memorie, di produzioni, ecc...), di *informazione/i* (da quelle immagazzinate nei calcolatori a quelle dei nostri vicini di casa, da quelle delle pagine gialle a quelle di una mappa, da quelle di una guida turistica a quelle degli archivi storici, da quelle dell'anagrafe a quelle di un polo tecnologico...) e di *forma/e* (la forma dei giardini e quella della cattedrale, le strade e i musei, i graffiti metropolitani e il tracciato della metropolitana, quella di un quartiere di periferia e quella del centro storico...). Se si volesse tenere di conto, magari mettendola in equazione, tutta questa complessità intrecciata, ci si troverebbe ben presto a mal partito concludendo che l'unico modello della città è la

città stessa. Oppure ci si dovrebbe limitare a un'espressione simbolica che leghi in un qualche modo flussi, informazione e forma senza alcun contenuto e significato fisico specifico. In tal caso è possibile una Fisica della Città? La radice per una possibile risposta si trova, crediamo, in una proposizione del Tractatus di Wittgenstein: "Anche se il mondo è infinitamente complesso, così che ogni fatto consta di infiniti stati di cose ed ogni stato di cose è composto d'infiniti oggetti, anche allora ci devono essere oggetti e stati di cose". Pure in un mondo infinitamente complesso possiamo separare a livello logico gli oggetti e gli stati di cose, e il concetto di stato è il mattone primario con cui costruiamo modelli, a cominciare dai sistemi dinamici, quindi estendibili ai sistemi complessi. A nostro parere in questa filosofia di pensiero sta il fondamento della Fisica della Città, per cui la città stessa diventa un laboratorio per la scoperta di leggi universali della complessità. Con questo intendiamo che la Fisica della Città si occupa di stabilire protocolli sperimentali, analizzare ed interpretare i dati, costruire modelli e derivare relazioni dinamiche tra grandezze macroscopiche con cui studiare la criticità del sistema. Si apre dunque un nuovo campo di ricerca nell'ambito della Fisica dei Sistemi Complessi con potenzialità di sviluppo sia teoriche che sperimentali. La Fisica della Città dovrà inoltre interagire con altre scienze che studiano i sistemi urbani, dall'economia alla sociologia, dalla filosofia alle scienze cognitive, dall'urbanistica all'ingegneria, dall'architettura alla psicologia del comportamento, senza dimenticare la geografia, e quant'altro. Si tratta di una interazione che tende a integrare diversi tipi di conoscenza per trovare una unità del sapere scientifico. In particolare, la Fisica della Città richiede un superamento del tradizionale concetto di modello fisico, ampliandone il significato in modo da comprendere anche i modelli utilizzati in altre discipline quali la sociologia e la psicologia. Cominciando con una domanda, formulata da Ludovico Geymonat: "Oggi i problemi dei fondamenti delle scienze empiriche coincidono con il problema del significato dei modelli. Che cosa è un modello?". Nella usuale accezione fisica il modello è stato a lungo pensato come un *medium*, una tappa intermedia, tra la natura (il fenomeno o un insieme di fenomeni) osservata e/o riprodotta in laboratorio, e la teoria, principi (classici i tre principi di Newton) e equazioni generali, che permette di descrivere, spiegare, predire il comportamento della natura stessa o di sue porzioni, il moto dei pianeti per esempio. Dove ogni ragionamento e spiegazione sono sottesi dal principio di causa e effetto, vero e proprio architrave di pensiero scientifico deterministico. Il modello non ha in questo ambito una autonomia gnoseologica e epistemologica. Aiuta l'intuizione e la rappresentazione mentale (si pensi all'elettrone visto come un'onda o come un corpuscolo, a seconda della situazione sperimentale), oppure è una specificazione particolare della

teoria, come i modelli d'universo che sorgono dalle differenti soluzioni delle equazioni di Einstein [7]. Però non è sempre così. Quando Boltzmann introduce il modello di gas perfetto con l'ipotesi del caos molecolare, compie un'operazione irriducibile al semplice rapporto tra teoria e modello che illustravamo prima. Il fatto è che egli si scontra col *caso* e con sistemi dove il caso è la regola non l'eccezione. Per cui il principio di causalità non appare più così forte, e viene moderato in senso *statistico*, o per dirla con J. C. Maxwell: **“la vera logica dell'universo è il calcolo delle probabilità”**. Boltzmann è cosciente del nuovo statuto epistemologico che assume il modello, così come lo è Poincaré nello studio dei sistemi dinamici non lineari, dove vige il paradosso di equazioni deterministe che producono spesso traiettorie imprevedibili, come nei sistemi aleatori. Ovvero per i sistemi dinamici, quelli aleatori, e in ultima analisi i sistemi complessi i modelli sono costituenti la teoria. Allora possiamo definire una teoria scientifica come una popolazione di modelli corredata da varie ipotesi che collegano quei modelli con i sistemi del mondo reale) [8].

A punto è necessario notare che lo sviluppo di nuovi modelli, soprattutto nel campo della scienza della complessità, è strettamente connesso con l'enorme sviluppo delle capacità di simulazione dei moderni computer, così che in molti casi il modello esiste in quanto computabile su un calcolatore. Solo in questo modo è possibile simulare configurazioni, evoluzioni, stati critici, insomma problemi e soluzioni possibili in uno spazio virtuale dei parametri e delle variabili molto più ampio e meno sottoposta a vincoli, rispetto allo spazio reale. In questo contesto la simulazione riacquista il significato che gli attribuiscono recenti studi di neuroscienze come un modo di apprendimento e conoscenza intrinseco al nostro sistema biologico cognitivo. I modelli non saranno mai isomorfi alla realtà, ma potranno simularne alcuni aspetti e caratteristiche, considerate dall'osservatore salienti.

Una semplice osservazione ci aiuta nel processo di riduzione: qualunque sia la varietà e complessità di flussi, forme e informazioni, un sistema urbano è, in quanto è abitato. La città non è neppure definibile senza i cittadini, componenti elementari comuni a qualunque sistema urbano. Quindi la nostra Fisica della Città sarà essenzialmente una fisica della città abitata. Il che significa, dato il gran numero di componenti elementari – i cittadini –, una fisica statistica del non equilibrio (la città è un sistema aperto). Inoltre poiché i componenti elementari si muovono nello spaziotempo urbano, sarà una fisica dei sistemi dinamici. Essendo gli individui del sistema dotati di libero arbitrio, dovrà essere una fisica probabilistica (fu Pascal il primo a modellare il libero arbitrio tramite il concetto e la funzione di probabilità, fino a scommettere sull'esistenza di Dio). Per finire, poiché i componenti elementari sono dotati di memoria, capaci di assumere dall'ambiente informazioni e di processarle in

funzione di intenzioni, scelte e decisioni, la fisica della città dovrà essere una fisica intenzionale, cognitiva e decisionale. Modellare una città richiede l'integrazione di dinamiche a varie scale spazio-temporali connesse tra loro tramite interazioni sia di tipo *bottom-up* che *top-down*; queste ultime peculiari per i sistemi auto-organizzati.

La dinamica macroscopica dello spaziotempo urbano può essere caratterizzata dal concetto di *chronotopo*, agente primigenio delle attività temporali urbane, intendendo per agente primigenio quello che introduce correlazioni che non ci si potrebbe aspettare senza di lui [9].

La dinamica complessa nasce proprio dall'interazione tra il tempo individuale e quello *chronotopico*. Nel linguaggio dell'urbanistica, si intende *chronotopo* un'area dove si svolgono attività calendarizzate che attraggono i cittadini, per esempio l'università che attrae studenti otto ore al giorno, l'ospedale che attrae malati e medici a ciclo continuo, una via di *shopping* che attrae i consumatori nelle ore di apertura dei negozi eccetera. Va da sé che le due definizioni nella città virtuale coincidono. Questa metrica *chronotopica* struttura flussi dinamici mesoscopici, per esempio gli studenti che si recano in università, i visitatori a un museo, gli uomini d'affari a una fiera, i melomani a un concerto. Avremo quindi una fisica *chronotopica*. E il tempo sociale urbano sarà in qualche modo una media pesata di questi vari tempi *chronotopici* in interazione con l'agenda temporale di ciascun componente elementare [10].

3 La mobilità urbana e l'asino di Le Corbusier

È scontato dire che la mobilità condiziona lo sviluppo urbano e viceversa. Più intrigante e ricca appare la seguente affermazione di Le Corbusier: **“L'uomo avanza diritto per la propria strada perché ha una meta; sa dove va, ha deciso di raggiungere un determinato luogo e vi si incammina per la via più diretta. L'asino procede a zigzag per evitare le pietre più grosse, per scansare i tratti più ripidi, per cercare l'ombra (...) è l'asino che ha tracciato le piante di tutte le città d'Europa”**. Il paradosso di Le Corbusier si dispiega pienamente nelle metropoli di terza generazione [11], dove la mobilità dei cittadini assume in misura sempre maggiore configurazioni zigzaganti e/o sistematiche. Quasi fossimo tutti asini.

Nella città occidentale otto-novecentesca, l'organizzazione tayloristica del lavoro industriale coi suoi orari rigidi di entrata e uscita (le famose otto ore e più di fabbrica) metteva a sistema ben controllabile, prevedibile e quasi deterministico la mobilità dei cittadini lavoratori. In termini tecnici la mobilità O-D, dove l'origine O è abbastanza ben definita nello spazio e nel tempo, e altrettanto la destinazione D, a cui si giunge attraverso una o più strade possibili (archi). Quando la grande fabbrica capitalista si svuota e decade

anche socialmente, l'organizzazione del lavoro si trasforma, diventando più complessa, spazialmente diffusa ben oltre i tradizionali quartieri industriali, si può dire in tutta la città, e a orario flessibile. Nasce così un tempo che invece di essere come prima unico, lineare e partito in segmenti di otto ore uguali per tutti (il tempo sociale forgiato dalle officine Ford), diventa l'impasto di mille e mille tempi individuali. Questa dislocazione spaziotemporale e virtuale del lavoro propria delle metropoli attuali, induce una mobilità poco prevedibile e asistemica che prende il largo investendo strati sempre più ampi di popolazione. Qui insorge l'asino di Le Corbusier, che non va diritto ma zigzaga secondo i suoi bisogni, desideri, volontà, obiettivi, e nasce il problema se e come questa mobilità zigzagante in linea di principio imprevedibile, possa essere modellata (la fisica ha modellato sistemi zigzaganti da 100 anni). Se si possa descriverla mediante equazioni e/o algoritmi, configurandola in una città virtuale che ci permetta di vederla dispiegarsi per provare a comprenderla, e magari prevederne alcune caratteristiche dinamiche.

In questo nuovo contesto lo studio della mobilità urbana consente di affrontare due fondamentali problemi della complessità:

1. La congettura della criticità dell'auto-organizzazione secondo cui i sistemi complessi si auto-organizzano in modo da rimanere vicino a stati critici, creando un equilibrio tra la tendenza ad evolvere sotto la pressione dei cambiamenti esterni, e la necessità di mantenere uno stato ordinato per il funzionamento del sistema stesso.
2. Il problema dell'informazione nei sistemi statistici fisici, informazione non definita secondo Shannon, ma come una forma di interazione per cui un sistema (ricevente) cambia il proprio stato dinamico in funzione di un altro sistema (portante), senza che venga posta in essere una relazione deterministica di causa-effetto; i due sistemi ricevente e portante possono inoltre avere natura completamente diversa.

Nel prossimo paragrafo discuteremo alcuni modelli che sono stati recentemente proposti per affrontare il problema della mobilità urbana non basati su un principio di minima azione o se si vuole del percorso minimo, in contrasto con la premessa di Le Corbusier secondo cui gli esseri umani si muoverebbero secondo linee rette. Entrano in gioco molte componenti *evolutive* e *adattive*, oltre al *libero arbitrio*, che rendono il cammino spesso molto più simile a un *random walk*, che a una linea retta.

4 I modelli

Partendo dal concetto di domanda individuale di mobilità come propensione [12] del singolo componente elementare a muoversi su una topologia spaziotemporale, abbiamo sviluppato una serie di modelli al fine di analizzare vari aspetti

della mobilità umana.

Per di più la mobilità si esercita con *diversi mezzi*, i piedi, la bicicletta o moto, l'automobile, il mezzo di trasporto pubblico. Ciascun cittadino mescolerà questi diversi mezzi nel corso dei suoi spostamenti, per cui dallo stato di pedone potrà transire a quello di automobilista e/o a quello di utente di mezzo pubblico eccetera.

Nel seguito ci riferiamo a due tipologie di modello: i modelli *chronotopici* e i modelli *ad automi*. Nel primo caso si tratta di modelli *mesocopici* in cui viene simulata la dinamica degli individui a scala urbana, dal quartiere ad un'intera città, tenendo conto dell'interazione tra la dinamica dei *chronotopi* e la mobilità di alcune categorie di cittadini (p. es. lavoratori, *city user*, turisti,...). La *microdinamica* non viene risolta rappresentando lo spazio mediante la sovrapposizione di diversi reticoli discreti di punti, ciascuno associato ad una diversa tipologia di mobilità e comunicanti attraverso punti particolari detti "stazioni". Si introduce quindi un'interazione *chronotopica* mediante un campo di "forze sociali" [13] che agisce sugli individui determinandone la domanda di mobilità e quindi un'agenda giornaliera. In questo modo si riescono a studiare:

1. la dinamica del componente elementare nel caso sia del tutto *libera* (senza meta), e quando sia *finalizzata* dalla necessità/scelta di recarsi in uno specifico *chronotopo*;
2. la dinamica degli aggregati di componenti elementari che hanno propensione verso lo stesso *chronotopo*, cioè la dinamica *mesoscopica*;
3. la dinamica del componente elementare quando *sceglie/decide* tra diversi mezzi e/o diversi percorsi e/o diversi *chronotopi* sulla base delle sue *intenzioni* (la sua agenda) e dell'ambiente circostante, con anche una capacità *adattiva* di fronte agli imprevisti;
4. da ultimo le *interazioni* tra i diversi sistemi di mobilità, pedonale, automobilistico, di trasporto pubblico.

Nel caso dei modelli *ad automi*, un concetto introdotto da Van Neumann [14] costruiamo un gas di particelle intelligenti con proprietà fisiche e cognitive (in grado di processare informazione)[15]. In questo modo costruiamo una *microdinamica* che è il risultato di interazioni fisiche e comportamenti cognitivi in grado di simulare la mobilità umana, in modo prioritario quella di tipo pedonale. Più precisamente questo modello mette in evidenza i fenomeni di auto-organizzazione come equilibrio critico tra dinamica fisica e cognitiva.

La dualità tra queste dinamiche strettamente correlate è una possibile chiave di volta per la complessità. Infatti per tempi brevi la dinamica fisica è fortemente dominata da effetti stocastici causati dalle interazione tra le particelle, mentre la dinamica cognitiva è deterministica in quanto risulta dall'applicazione di strategie di comportamento sociale ben consolidate (teoria delle forze sociali). Per tempi

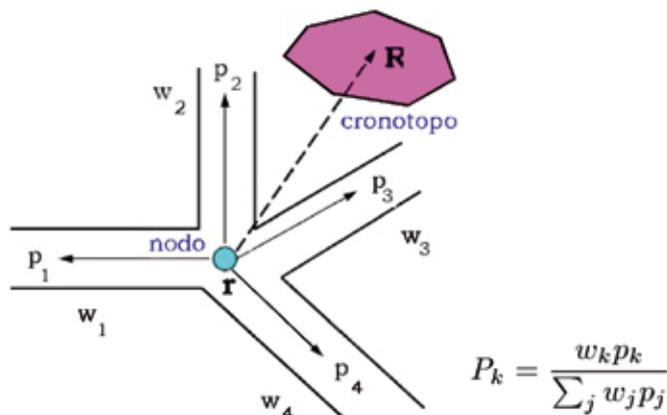
lunghe la dinamica fisica è modellabile in modo deterministico in quanto realizza la mobilità di flussi su vasta scala, mentre la dinamica cognitiva risulta stocastica poiché è il risultato di decisioni individuali (*free will*) con un sistema di *retroazione* e di *memoria*, che permettono *evoluzione* e *adattamento*. Specifichiamo ora come la decisione avviene nel modello cronotopico, basandoci sul concetto di probabilità soggettiva di Bayes-de Finetti [16]. Con questa probabilità in tasca il nostro individuo si trova nel mezzo di un quadrivio, *attirato* da un *chronotopo*, e deve scegliere quale strada imboccare, strada che non è univocamente determinata dalla forza che il *chronotopo* esercita. Ebbene, la probabilità che si avvii lungo una strada sarà data da una combinazione tra le probabilità definite per ogni direzione in base alle sue soggettive esigenze di mobilità (il percorso minimo nel tempo per esempio è la più facile ma certamente non l'unica, e spesso non prevale) e un coefficiente di qualità assegnato alle strade, nel caso specifico *l'accessibilità, la sicurezza, l'estetica* (fig. 1). Così si realizza una dinamica probabilistica su *network*.

Tale modello è stato applicato alla simulazione della mobilità pedonale e di trasporto pubblico nel centro storico di Rimini, ottenendo un buon accordo con le osservazioni empiriche [17].

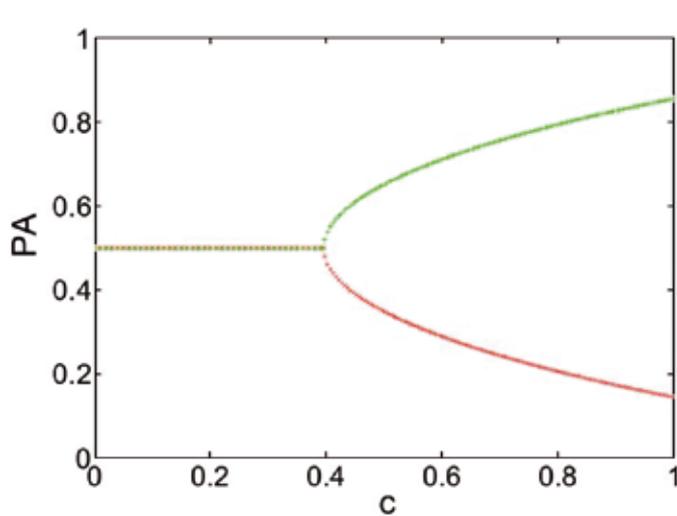
Nel modello di gas di automi si introduce una dinamica fisica ispirata al moto di un fluido granulare con collisioni anelastiche, un meccanismo di visione che consente di sviluppare una strategia per evitare gli urti e infine una capacità di decisione e apprendimento individuale. La messa in equazione di questo discorso si legge:

$$dX = \frac{\partial V}{\partial X}(X; I) dt + \sqrt{2T} dw_t,$$

dove X rappresenta lo stato cognitivo della particella al tempo t , $V(X; I)$ è un potenziale di utilità che dipende dall'informazione I nel senso definito in precedenza, T è una temperatura sociale che misura l'attitudine a cambiare decisione, infine dw_t rappresenta il differenziale del rumore di Wiener. Con questo meccanismo abbiamo studiato la dinamica di folla in particolare al crescere della densità, trovando che in compresenza di strategie diverse quali quella cooperativa e quella egoista (*selfish*), si ottiene una soglia oltre la quale la dinamica diventa caotica innescando il panico[18]. In fig. 2 si illustra schematicamente un meccanismo di auto-organizzazione cognitiva basato su



1



2

Fig. 1 Il pedone decide quale strada prendere, sulla base della direzione e del verso della forza cronotopica, delle probabilità p_k associate a ciascuna strada possibile e ai coefficienti di qualità w_j propri di ciascuna via, ottenendo una probabilità di scelta P_k composta secondo la formula.

Fig. 2 Biforcazione per un gas di automi cooperativi con un sistema binario di decisione. Il sistema si auto-organizza secondo un meccanismo probabilistico quando il parametro di cooperazione C raggiunge una soglia critica.



3



4

Fig. 3 Ricostruzione della densità pedonale durante il Carnevale di Venezia 2007 nell'area di San Marco mediante segnali GPS.

Fig. 4 Ricostruzione del campo di velocità nella rete viaria bolognese durante il mese di giugno 2006. I diversi colori corrispondono a diverse velocità medie di percorrenza (rosso tra 0 e 30 km/h, giallo tra 30 e 60 km/h, verde tra 60 e 90 km/h e blu sopra i 90 km/h).

Fig. 5 Distribuzione della lunghezza delle traiettorie per un mese di dati: in rosso a Roma, in verde a Bologna e in blu a Senigallia. Le traiettorie corte (ordine 500 m) sono affette da patologie di misura. Al di là di questo le curve sperimentali hanno la stessa pendenza nelle

tre città (molto diverse tra loro, suggerendo l'esistenza di una attitudine comune degli individui indipendentemente dalla topologia e dalla densità di traffico).

un biforcazione per un valore critico del parametro di cooperazione.

5 Osservazioni esperimenti misure e dati

Uno dei problemi più difficili per lo studio dell'evoluzione di sistemi complessi è quello di reperire serie temporali di dati abbastanza lunghe e ripetibili, essendo l'esperimento in genere non riproducibile. Parafrasando Tolstoj possiamo dire che: "Tutti i sistemi semplici si assomigliano, ma ogni sistema complesso è complesso a modo suo" [19]. Inoltre dall'osservazione dei fenomeni macroscopici complessi si vorrebbe derivare una conoscenza della dinamica microscopica, il che costituisce un autentico rompicapo (i matematici lo chiamano problema malposto, ma i fisici non possono esimersi dall'osservazione della natura, e dalle domande che da questa nascono). Nel corso del nostro lavoro abbiamo analizzato diverse situazioni empiriche:

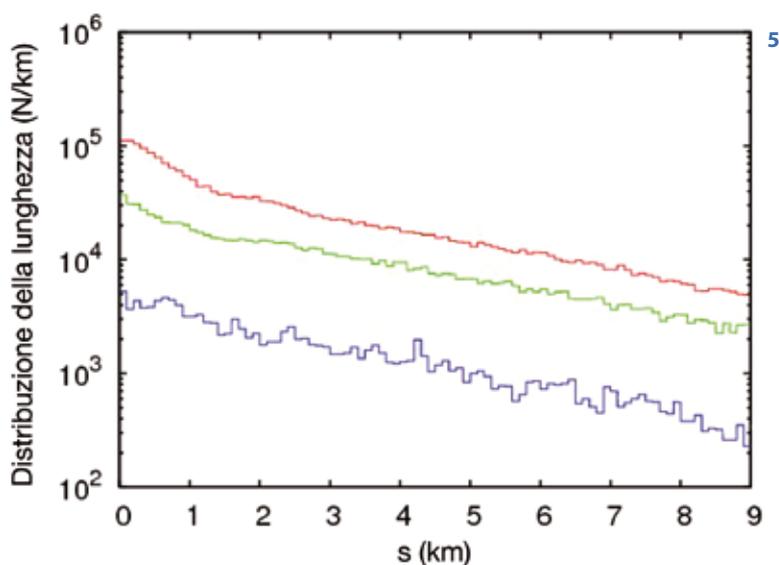
1. ricostruzione di traiettorie pedonali tramite osservatori muniti di GPS,
2. studio di dinamica di folla tramite dati acquisiti da video riprese,
3. ricostruzione di traiettorie autoveicolari da dati GPS.

Senza entrare nei particolari, mostriamo in [fig. 3](#) i risultati ottenuti per il carnevale di Venezia che evidenziano la densità nell'area di San Marco [20].

Per quanto riguarda la mobilità automobilistica, per la prima volta si possono analizzare dati diffusi attinenti il singolo veicolo, su cui viene montato un GPS [21]. Il campione a nostra disposizione corrisponde a circa il 2% di tutti gli autoveicoli circolanti, e assumiamo non sia affetto da patologie (per esempio una forte preminenza di giovani, o di un'altra categoria sociale o professionale o generazionale). La precisione media della posizione è di circa 10 m, e il campo di velocità è molto accurato mentre la misura della densità risente della numerosità insufficiente del campione rispetto all'estensione della rete viaria. Quindi abbiamo sviluppato metodi per ricostruire le traiettorie in aree urbane, per farne una statistica su tempi lunghi.

Nelle [fig. 4](#) e [5](#) mostriamo alcuni esempi del tipo di conoscenza che l'analisi da noi compiuta ci ha dato.

Qui per finire vorremmo porre il problema della previsione. Ora è evidente che, in linea di principio, non conosciamo la predicibilità del sistema, in particolare non sappiamo come l'errore, o incertezza che dir si voglia, si



propaga e cresce nel tempo. Però la scoperta di regolarità, quali quella graficata in fig. 5, permette almeno di avere una visione statistica coerente e robusta, e quindi di delimitare il perimetro di indagine in vista di un modello ragionevolmente predittivo.

6 Conclusioni

Come abbiamo cercato di mostrare la Fisica della Città ha sia una dimensione di ricerca teorica, la evoluzione di un gas d'automati, che un ampio campo di applicazioni, per ora soprattutto sulla mobilità, problema intricato e di rilevanza sociale. Inoltre sviluppa non solo una collezione di modelli e di esperimenti virtuali, ma sta raccogliendo e analizzando un ampio insieme di dati osservativi che rendono la possibilità di previsione non più inscritta nel libro dei sogni, ma invece tracciata nei quaderni di laboratorio.

Per finire ci piace citare una frase di Ettore Majorana, laddove scrive: "Il determinismo che non lascia alcun posto alla libertà umana e obbliga a considerare come illusioni (...) tutti i fenomeni della vita, racchiude una reale causa di debolezza: la contraddizione immediata e irrimediabile con i dati più certi della nostra coscienza (...). Sarà nostro scopo ultimo l'illustrare il rinnovamento che il concetto tradizionale delle leggi statistiche deve subire in congruenza del nuovo indirizzo della fisica contemporanea."

Bibliografia

- [1] J. G. Wardrop, "Some theoretical aspects of road traffic research", *Proc. Inst. Civil Engin.*, 1-2 (1952) 325.
- [2] I. Prigogine, R. Herman, "Kinetic theory of vehicular traffic" (Elsevier, New York) 1971.
- [3] K. Nagel, M. Schreckenberg, "A cellular automaton model for freeway traffic", *J. Phys. I*, 2 (1992) 22221.
- [4] D. B. Lee Jr., "Requiem for Large-Scale Models", *J. Am. Inst. Planners*, 39, no. 3 (1973) 163.
- [5] M. Batty "Modelling cities as dynamic systems", *Nature*, 231 (1971) 425.
- [6] S. Albeverio, D. Andrey, P. Giordano, A. Vancheri (Editors), "The Dynamics of Complex Urban Systems— An Interdisciplinary Approach" (Springer, Heidelberg, New York) 2007.
- [7] B. Giorgini, "Philosophie naturelle de la causalité et du hasard dans un modèle de mobilité urbaine", *Chaos*, a cura di S. Franceschelli, T. Roque, M. Paty (Herman, Paris) 2007, p. 259.
- [8] R. N. Giere, "Explaining Sciences. A Cognitive Approach" (The University of Chicago Press) 1988.
- [9] B. Giorgini, "Il tempo del caos" in "Il tempo e la città tra natura e storia. Atlante dei progetti sui tempi della città", a cura di S. Bonfiglioli e M. Mareggi (Urbanistica Quaderni INU, Roma) 1997, p. 325.
- [10] B. Giorgini, A. Bazzani e S. Rambaldi (Guest Editors) "Physics and the City", *Advances in Complex Systems*, 10, Suppl. no. 2 (2007).
- [11] G. Martinotti, "Metropoli: la nuova morfologia sociale della città", (Il Mulino, Bologna) 1997.
- [12] K. R. Popper, "A World of Propensities" (Thoemmes Antiquarium Books, Bristol) 1990.
- [13] D. Helbing "Traffic and Related Self-Driven Many Particles Systems", *Rev. Mod. Phys.*, 73 (2001) 1067.
- [14] J. Van Neumann, "The General and Logical Theory of Automata", *Collected Works*, Vol. V (Pergamon Press) 1963.
- [15] G. Turchetti, F. Zanlungo e B. Giorgini, "Dynamics and thermodynamics of a gas of automata", *Europhys. Lett.*, 78 (2007) 58003.
- [16] B. de Finetti, "Theory of Probability" (Wiley, New York) 1974-5.
- [17] A. Bazzani et al. "Un modello per la mobilità asistematica nel centro storico di Rimini", *Trasporti e Territorio*, 16 (2003) 141.
- [18] A. Bazzani, B. Giorgini, F. Zanlungo e S. Rambaldi, "Cognitive dynamics in an automata gas", *Atti del Workshop Italiano su Vita Artificiale e Computazione Evolutiva (Wivace'08), Venezia (Italy)*, a cura di R. Serra, M. Villani e I. Poli (World Scientific, Singapore) 2008.
- [19] G. Boffetta, M. Cencini, M. Falcioni e A. Vulpiani, "Predictability: a way to characterize complexity", *Phys. Rep.*, 356 (2002) 367.
- [20] G. Melchiorre et al., "Walking in Venezia Carnival: Crowd dynamics and pedestrian trajectories", a cura di M. Pezzagno, E. Chiaf (Editors). "Space for public shows and trade fairs". XIV International Conference Living and Walking in Cities, Brescia: www.polibrixia.it (Polibrixia srl., Brescia) 2007, pbx003.
- [21] S. Rambaldi, A. Bazzani, B. Giorgini, L. Giovannini, "Mobility in modern cities: looking for physical laws", *ECCS07-132* (Complex System Society) 2007.

Il laboratorio di Fisica della Città ha operato fino al 2008 con il sostegno finanziario di Volvo Auto Italia. I dati per la mobilità autoveicolare sono forniti, per scopi scientifici e senza fini di lucro, dalla OctoTelematics. I dati del Carnevale di Venezia sono stati acquisiti sul campo nel 2006, 2007 nell'ambito di un progetto PRIN 2005-2007 coordinatore nazionale Guido Martinotti.

Bruno Giorgini

È Ricercatore Universitario al Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, incaricato di ricerca INFN-gruppo IV-sezione di Bologna, membro del Comitato Scientifico del MO.VE (Mobility Venice), membro del Cantiere della Biennale di Venezia "Città Mobilità Cultura", docente del Laboratorio di Fisica dei Sistemi Complessi-Facoltà di Scienze, corso di laurea magistrale in Fisica.

Ha fatto ricerca nel campo della astrofisica relativistica, in cosmologia multidimensionale e in meccanica quantistica su spaziotempi curvi.

In seguito si è dedicato allo studio dei sistemi caotici e complessi e in particolare all'evoluzione delle epidemie e alla teoria delle fratture, fondando infine il Laboratorio di Fisica della Città di cui è stato coordinatore dal 2004 al 2007.

Ha lavorato, oltre che all'Università di Bologna, all'Université Paris VI "P. et M. Curie" – Laboratoire de Mécanique Relativiste, all'Université Paris VII – Laboratoire de Physique, Théorique et Mathématique, all'ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles), Laboratoire de Mécanique des Milieux Hétérogènes del CNRS e al Politecnico di Milano – Laboratorio dei Tempi e dei Luoghi della Città.

Ha pubblicato numerosi articoli scientifici e alcuni libri.