

Metodi di approssimazione per sistemi a molti corpi
(<http://physh.aps.org/concepts/a0dcc4fb34a04892a60acfb14c0f73e8>).

Dinamica browniana (<http://physh.aps.org/concepts/0ac2935f90734beebefd2d0f09f3b26e>).

Analisi dei dati (<http://physh.aps.org/concepts/9cb101d6-4b02-4f69-948e-f42b9bea9fe3>).

Equazione di Langevin (<http://physh.aps.org/concepts/0ac46efd0f434786a9988f9d0042ffd8>).

Teoria dei campi medi (<http://physh.aps.org/concepts/2d89a0767a544494973aea562f654b8e>).

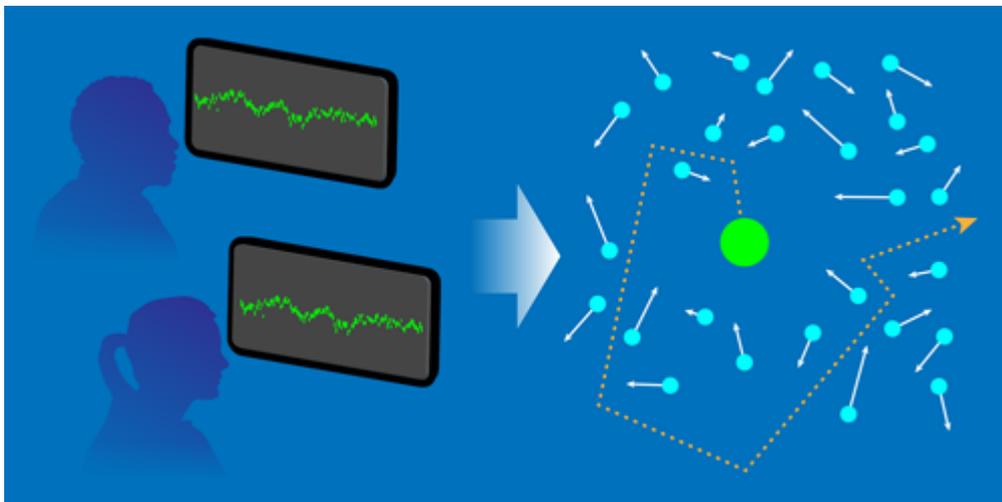
Metodi di Monte Carlo (<http://physh.aps.org/concepts/eb9bd2e1-eedd-4bd0-997d-58b44ffa3ebb>).

Analisi stocastica Analisi delle (<http://physh.aps.org/concepts/1b17688e11354ec0831ec499e0d80c1d>).

serie temporali (<http://physh.aps.org/concepts/e9607b79-fd31-4535-bbdd-afc2ab9963fb>).

Fisica statistica Fisica interdisciplinare

Physics SINOSI



Financial Brownian Motion (<https://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.120.138301>)

Pubblicato il 27 marzo 2018

Utilizzando i dati sull'attività dei singoli operatori finanziari, i ricercatori hanno ideato un modello finanziario microscopico in grado di spiegare le tendenze macroscopiche del mercato.

Vedi di più in *fisica* (<https://physics.aps.org/>).

AUTORI E AFFILIAZIONI

Kiyoshi Kanazawa (</search/field/author/Kiyoshi%20Kanazawa>)^{1,2,*}, Takumi Sueshige (</search/field/author/Takumi%20Sueshige>)², Hideki Takayasu (</search/field/author/Hideki%20Takayasu>)^{1,3} e Misako Takayasu (</search/field/author/Misako%20Takayasu>)^{1,2}

¹ Istituto di ricerca innovativa, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Giappone

² Dipartimento di scienze matematiche e informatiche, School of Computing, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Giappone

³ Sony Computer Science Laboratories, 3-14-13 Higashi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0022, Giappone

* Autore corrispondente kanazawa.k.ae@m.titech.ac.jp

ARTICOLO TESTO

INTRODUZIONE.-

In fisica, lo studio del moto browniano colloidale ha una lunga storia che inizia con la famosa opera di Einstein [1]; la comprensione del suo meccanismo è stata sistematicamente sviluppata nella teoria cinetica [2,3]. In particolare, dalla dinamica microscopica newtoniana, le equazioni di Boltzmann e Langevin sono derivate rispettivamente per la dinamica mesoscopica e macroscopica. Questa struttura è una base rigida per vari sistemi di non equilibrio (ad esempio, materia attiva, gas granulare, cricchetti Feynman e flusso del traffico[4-10]), e il suo fondamento sperimentale diretto è stato rivisitato a causa delle recenti scoperte tecnologiche [11,12].

Alla luce di questo successo, è naturale applicare questa struttura oltre la fisica alle scienze sociali [13], come la finanza. In effetti, il concetto di passeggiate casuali è stato storicamente inventato per la dinamica dei prezzi da Bachelier prima di Einstein [14], e le sue somiglianze con il movimento fisico Browniano (ad esempio, la relazione di dissipazione-fluttuazione) sono intensamente studiate dalla recente analisi dei dati ad alta frequenza [15]. Come idea nella fisica statistica, le dinamiche dei mercati finanziari dovrebbero essere chiarite dai primi principi estendendo la teoria cinetica.

Sebbene questa idea sia attraente, la descrizione cinetica non è stata stabilita per il movimento finanziario browniano. Perché questa idea non è stata ancora realizzata? Dal nostro punto di vista, il problema più grande è l'assenza di modelli microscopici stabiliti; esistono convalide empiriche di mesoscopia[15-21] e modelli macroscopici[22-28], mentre nessun modello microscopico è stato convalidato da un'analisi empirica diretta. Anzi, precedenti modelli microscopici[29-33] erano puramente teorici e non hanno prove quantitative al microscopio. Per superare questo problema cruciale come scienza empirica, è necessario collegare due anelli mancanti: (i) creazione del modello microscopico mediante osservazione diretta della dinamica dei commercianti [Fig. 1(a)] e (ii) costruzione di una teoria cinetica per mostrare la sua coerenza con i risultati mesoscopici e macroscopici [vale a dire, il libro degli ordini e la dinamica dei prezzi, Figg. 1(b), 1(c)].

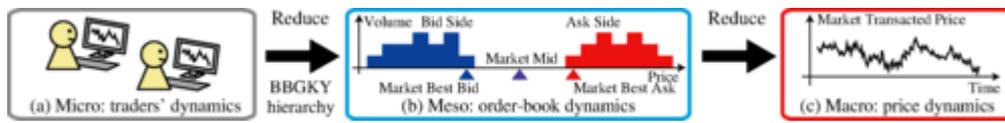


FIGURA. 1.

[+ Apri in una nuova finestra](#)

Gerarchie per i movimenti browniani finanziari per le dinamiche microscopiche, mesoscopiche e macroscopiche.

In questa lettera, presentiamo le soluzioni corrispondenti mediante l'osservazione diretta delle dinamiche del trader ad alta frequenza (HFT) in un mercato di valute estere (FX): (i) un modello microscopico di HFT è stabilito mediante prove microscopiche dirette e (ii) corrispondenti la teoria cinetica viene sviluppata per mostrare la sua coerenza con le prove mesoscopiche e macroscopiche. Abbiamo analizzato i dati degli ordini con identificatori di operatori anonimi (ID) per tracciare le traiettorie di tutti gli individui. Abbiamo trovato una legge empirica riguardante il trend seguito tra gli HFT, che non è stato catturato dai precedenti modelli di ordini. Sorprendentemente, questa proprietà induce la mozione collettiva del portafoglio ordini e conduce naturalmente la struttura stratificata del libro degli ordini [15]. Introduciamo quindi un corrispondente modello microscopico di HFT trend-following. A partire dalle loro "equazioni del moto", le equazioni simili a quelle di Boltzmann e di Langevin sono derivate dal libro degli ordini e dalle dinamiche dei prezzi. Un accordo quantitativo è finalmente mostrato con i nostri risultati empirici. Il nostro lavoro apre le porte a descrizioni sistematiche della finanza basate su prove microscopiche.

DINAMICA MICROSCOPICA OSSERVATA.-

Abbiamo analizzato i dati FX ad alta frequenza tra il dollaro USA (USD) e lo Yen giapponese (JPY) sui servizi di brokeraggio elettronico per una settimana a giugno 2016. L'unità monetaria utilizzata in questo studio è di 0,001 yen, denominata decima pip (tpip). Qui ci siamo concentrati in particolare sulle dinamiche degli HFT [34], spesso inviando o cancellando ordini secondo algoritmi (vedi Materiale supplementare [35]). Le tipiche traiettorie dei prezzi quotati bid e ask sono illustrate nelle Figg. 2(a)-2(c) per i 3 principali HFT. Modificano i loro prezzi quotati per invio e cancellazione successivi ad alta velocità in genere entro pochi secondi; quasi il 99% delle loro osservazioni è stato infine cancellato senza transazioni (vedere Materiale supplementare [35]). Con le citazioni a due facce svolgono anche il ruolo di fornitori di liquidità [40, 41] secondo la regola del mercato, mantenendo l'equilibrio tra l'offerta e il book degli ordini. Si è osservato che gli spread di vendita-vendita, la differenza tra i migliori prezzi di offerta e di domanda per un singolo HFT, fluttuavano intorno a determinate costanti di tempo (vedere gli inset per le loro distribuzioni).

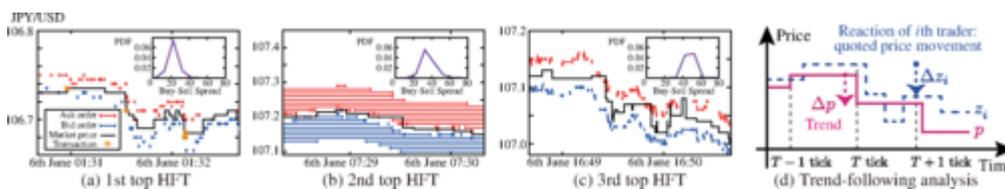


FIGURA. 2.

[+ Apri in una nuova finestra](#)

(a) - (c) Le vite degli ordini sono tracciate come traiettorie per i 3 principali HFT. I commercianti tipici tendono verso citazioni continue su due lati, con la diffusione del buy-sell che fluttua intorno a una costante temporale unica per il trader. La percentuale di citazioni bilaterali tra HFT era del 48,4% (vedi Materiale supplementare [35]). (d) Quantificazione del trend seguito per i singoli operatori, dove Δp e Δz_i sono i movimenti del prezzo di mercato e il prezzo medio del *primo* trader, rispettivamente.

Riportiamo quindi la legge microscopica empirica per la strategia che segue i trend dei singoli trader. L'offerta e chiedere i prezzi quotati della parte superiore i th HFT sono indicati con b_i e a_i (vedi Supplemental materiale [35]). Abbiamo esaminato il movimento medio del prezzo medio quotato del commerciante $z_i \equiv (b_i + a_i) / 2$ tra le transazioni subordinato al movimento di prezzo del mercato precedente negoziato [Fig. 2(d)]. Qui introduciamo il tempo di battito T come tempo intero incrementato da ogni transazione. L'intervallo di transazione medio è di 9,3 secondi durante questa settimana. Poiché gli HFT tipici modificano frequentemente il loro prezzo tra le transazioni, qui si studia la tendenza degli HFT seguendo con precisione a un tick, per i primi 20 HFT (Fig. 3), abbiamo trovato che la media e la varianza del movimento $\Delta z_i(T) \equiv z_i(T + 1) - z_i(T)$ obbedivano

$$\langle \Delta z_i \rangle_{\Delta p} \approx c_i \tanh \frac{\Delta p}{\Delta p_i^*}, \quad V_{\Delta p}[\Delta z_i] \approx \sigma_i^2, \quad (1)$$

dove la media condizionale $\langle \dots \rangle_{\Delta p}$ viene presa quando l'ultima variazione di prezzo è $\Delta p(T - 1) \equiv p(T) - p(T - 1)$ e $\Delta z_i \neq 0$ (vedi Materiale supplementare [35]) e la varianza condizionale è definito da $V_{\Delta p}[\Delta z_i] \equiv \langle (\Delta z_i - \langle \Delta z_i \rangle_{\Delta p})^2 \rangle_{\Delta p}$. Qui, $p(T)$ è il prezzo di transazione del mercato altick T , e $c_i, \Delta p_i^*, \sigma_i^2$ sono costanti caratteristiche uniche per il trader e indipendenti da Δp . I loro valori tipici sono stati trovati $c_i \approx 6,0 \text{tpip}$, $\Delta p_i^* \approx 7,5 \text{tpip}$ e $\sigma_i^2 \approx 14,5 \text{tpip}$. La nostra scoperta (1) implica che la reazione dei trader è lineare per le piccole tendenze ma satura per le grandi tendenze e quantifica il movimento collettivo degli HFT. Sorprendentemente, un comportamento simile è stato riportato da un'analisi dei dati di movimento dei prezzi con precisione di un mese [42].

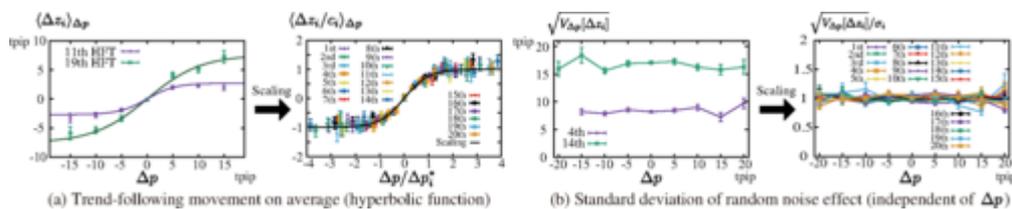


FIGURA. 3.

[+ Apri in una nuova finestra](#)

(a) Media Δz_i ipotizzando movimenti di prezzo precedenti di Δp e un operatore attivo con $\Delta z_i \neq 0$. Il comportamento può essere adattato dalla curva master (1) per i 20 principali HFT introducendo i parametri di scala Δp^*_i e c_i . (b) Deviazione standard condizionale sul movimento dei prezzi Δp , che mostra che la casualità associata al trend successivo è indipendente da Δp .

MODELLO MICROSCOPICO.-

Qui introduciamo un modello microscopico minimo di HFT che incorpora i caratteri sopra. Facciamo quattro ipotesi: (i) il numero di operatori è sufficientemente ampio; (ii) i trader citano sempre sia i prezzi bid che ask (per il i th trader, b_i e a_i) contemporaneamente con un volume unitario; (iii) gli spread buy-sell sono costanti di tempo esclusive per gli operatori con distribuzione $\rho(L)$. Le dinamiche del trader sono quindi caratterizzate dal midprice $z_i \equiv (b_i + a_i) / 2$; e (iv) le passeggiate casuali che seguono le tendenze sono assunte nella dinamica microscopica [Fig. 4(a)-4(c)].

$$\frac{dz_i(t)}{dt} = c \tanh \frac{\Delta p(t)}{\Delta p^*} + \sigma \eta_i^R(t),$$

(2)

con forza per la tendenza seguente c , movimento di prezzo precedente Δp , e rumore gaussiano bianco $\sigma \eta_{R_i}$ con varianza σ^2 . Qui, c , Δp^* e σ sono considerati condivisi per tutti i trader per semplicità. In questo modello, gli HFT modificano frequentemente il loro prezzo quotato per invio e cancellazione successivi. In effetti, questo modello può essere riformulato come un processo di modifica dei prezzi di Poisson con un alto tasso di annullamento (vedi Materiale supplementare [35]). Dopo la transazione $a_j(t) = b_i(t)$ [Fig. 4(b)], il prezzo di mercato aggiornato e il movimento corrispondente sono registrati come

$$p(t+0) = b_i(t), \quad \Delta p(t+0) = b_i(t) - p(t),$$

(3)

e si verifica un salto della requotazione [Fig. 4(c)],

$$z_i(t+0) = z_i(t) - \frac{L_i}{2}, \quad z_j(t+0) = z_j(t) + \frac{L_j}{2}.$$

(4)

Qui, $t + 0$ implica il tempo dopo la transazione. Un carattere unico di questo modello è il movimento collettivo degli ordini a causa della tendenza seguente [Fig. 4(d)]. Per $\Delta p > 0$, la variazione del volume di offerta (chiedere) tende ad essere positiva (negativa) vicino al prezzo migliore [Fig. 4(e)], coerentemente con la struttura del libro degli ordini a strati [15].

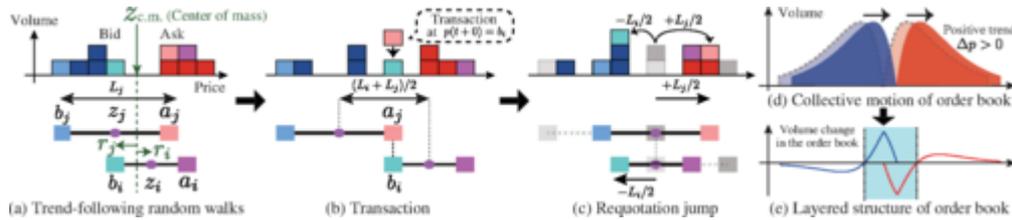


FIGURA. 4.

[+ Apri in una nuova finestra](#)

Schema del modello microscopico (2). (a) Il prezzo medio di ciascun operatore obbedisce alle passeggiate casuali che seguono la tendenza. (b) La transazione ha luogo dopo la corrispondenza dei prezzi $b_i = a_j$ con il prezzo di transazione del mercato p e il suo movimento Δp aggiornato. (c) Una coppia di trader richiede la propria offerta e chiede i prezzi simultaneamente dopo le transazioni. (d) Movimento collettivo di ordine d'ordine indotto dalla tendenza seguente. (e) Il cambio di volume nel book di negoziazione dell'offerta (chiedere) è positivo (negativo) vicino al miglior prezzo in media per $\Delta p > 0$.

FORMULAZIONE CINETICA.-

Presentiamo quindi una soluzione analitica a questo modello (2) secondo la teoria cinetica [2,3]. Per prima cosa introduciamo la distanza relativa $r_i \equiv z_i - z_{c.m.}$ dal "centro di massa" $z_{c.m.} \equiv \sum_i z_i / N$ [Fig. 4(a)], dove l'effetto trend-following nell'Eq. (2) è assorbito nella dinamica di $z_{c.m.}$. La dinamica di r_i diventare più semplice perché gli effetti che seguono la tendenza scompaiono in questo frame mobile (vedi Materiale supplementare [35]). In seguito introdurremo la distribuzione di probabilità di un corpo (due corpi) come $\varphi_L(r) [\varphi_{LL'}(r, r')$] subordinatamente agli spread di compravendita degli operatori. Dal modello microscopico (2), l'equazione gerarchia più basso ordine derivata come $\partial \Phi_{i;L} / \partial t = (\sigma^2 / 2) (\partial^2 \Phi_{i;L} / \partial r^2) N \sum_{s = \pm 1} \int dL' \rho(L') [J_{LL'}^s(r + sL/2) - J_{LL'}^s(r)]$ con $J_{sLL'}(r) \equiv (\sigma^2 / 2) |\partial_{rr'}| \varphi_{LL'}(r, r') |_{r-r'=s(L+L')/2} e |_{\sim} \partial_{rr'} | f \equiv |\partial f / \partial r| + |\partial f / \partial r'|$ (Vedi Materiale supplementare [35]). Assumendo "caos molecolare"

$$\varphi_{LL'}(r, r') \approx \varphi_L(r) \varphi_{L'}(r'),$$

(5)

deriviamo l'equazione di Boltzmann con gli integrali di collisione per il portafoglio ordini,

$$\frac{\partial \varphi_L}{\partial t} \approx \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2 \varphi_L}{\partial r^2} + N \sum_{s=\pm 1} \int dL' \rho(L') [J_{LL'}^s(r + sL/2) - J_{LL'}^s],$$

(6)

con $J_{sLL'}(R) \equiv (\sigma^2/2) | \partial_{rr'} | \{ \varphi_L(r) \varphi_{L'}(r') \} |_{r-r'=s(L+L')/2}$. Qui, $s = +1$ ($s = -1$) rappresenta le transazioni come offerente (richiedente). Poiché i commercianti mostrano un movimento collettivo derivante dalla tendenza a seguire, un'equazione di tipo Langevin è anche derivata dalla descrizione macroscopica del modello (2),

$$\Delta p(T+1) = c\tau(T) \tanh \frac{\Delta p(T)}{\Delta p^*} + \zeta(T),$$

(7)

dove $\tau(T)$ e $\zeta(T)$ sono intervalli di tempo della transazione e rumore casuale al T tick, rispettivamente. Il primo termine che segue la tendenza corrisponde all'inerzia del momento nell'equazione di Langevin convenzionale.

Le equazioni (6) e (7) possono essere valutate analiticamente per $N \rightarrow \infty$. Per prima cosa impostiamo la distribuzione dello spread di compravendita come

$$\rho(L) = \frac{L^3}{6L^{*4}} e^{-L/L^*},$$

(8)

con lunghezza di decadimento $L^* = 15,5 \pm 0,2$ tip, validata empiricamente nel nostro set di dati [Fig. 5(a) e materiale supplementare [35]]. La soluzione all'Eq. (6) per $N \rightarrow \infty$ è dato da $\varphi_L(r) = (4/L^2) \max\{L/2 - |r|, 0\}$. Il profilo medio del libro degli ordini $f_A(r) = \int dL \rho(L) \varphi_L(r/2)$ viene quindi dato per $r > 0$ di

$$f_A(r) = \frac{4}{3L^*} e^{-\frac{3r}{2L^*}} \left[\left(2 + \frac{r}{L^*} \right) \sinh \frac{r}{2L^*} - \frac{r}{2L^*} e^{-\frac{r}{2L^*}} \right].$$

(9)

Le statistiche di $\tau(T)$ nel modello macroscopico (7) sono derivate dal modello mesoscopico (6), e la coda del movimento dei prezzi è approssimativamente data da

$$P(\geq |\Delta p|; \kappa) \approx e^{-|\Delta p|/\kappa} \quad (|\Delta p| \rightarrow \infty),$$

(10)

con lunghezza di decadimento $\kappa \approx 2 \Delta z^* / 3$, movimento medio da trend-following $\Delta z^* \equiv c \tau^*$, intervallo medio di transazione $\tau^* \approx 3 L^{*2} / N \sigma^2$ e funzione di distribuzione cumulativa complementare (CDF) $P(\geq |\Delta p|; \kappa)$ (vedere anche Materiale supplementare [35] per la convalida numerica).

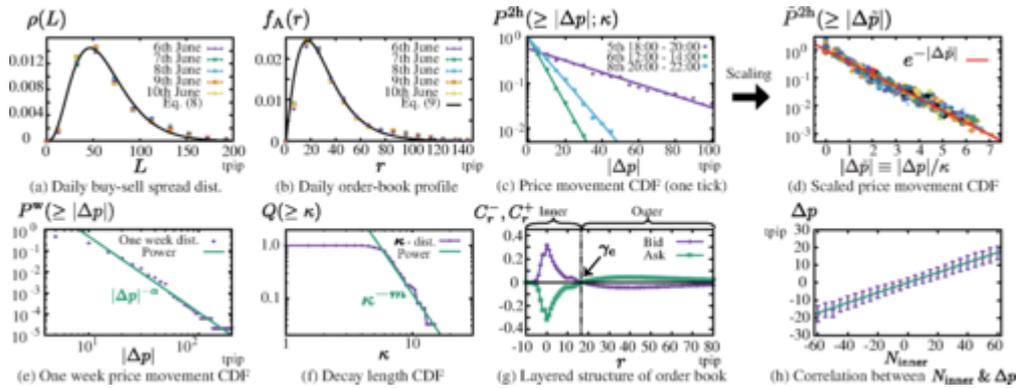


FIGURA. 5.

[+ Apri in una nuova finestra](#)

(a) Distribuzione giornaliera degli spread di compravendita per HFTs con la curva master empirica (8). (b) Profilo medio giornaliero del libro degli ordini per i migliori prezzi degli HFT, concordando con la nostra linea teorica (9) senza parametri di adattamento. Qui la profondità relativa è misurata dal prezzo medio del mercato anziché dal cm per semplicità, il che non ha causato una grande differenza numerica rispetto alla nostra teoria (vedi Materiale supplementare [35]). (c) CDF segmentate su due ore per il movimento del prezzo con precisione one-tick per le tre regioni temporali tipiche (vedere Materiale supplementare [35]). Le CDF sono esponenziali, coerentemente con la nostra previsione teorica (10). (d) Le CDF segmentate su due ore vengono ridimensionate nella curva master esponenziale singola ogni 2 ore (62 regioni temporali). (e) Movimento dei prezzi CDF durante l'intera settimana obbedisce a una legge di potenza dell'esponente α . (f) La lunghezza di decadimento κ obbedisce a una legge di potenza $Q(\geq \kappa) \sim \kappa^{-m}$. (g) Struttura stratificata del libro degli ordini dal nostro modello HFT. Il coefficiente di Pearson $C_{-r} (C_{+r})$ è tracciato numericamente tra $N_{-r} (N_{+r})$ e Δp con punto di crossover $\gamma_c \approx 16.5$ tpiip. (h) Correlazione lineare tra la variazione numerica totale N_{interna} nello strato interno e il movimento di prezzo Δp con coefficiente di correlazione di 0.63.

ANALISI DEI DATI MESOSCOPICI E MACROSCOPICI.-

Abbiamo poi esaminato se il nostro modello microscopico è coerente con il nostro set di dati. Il profilo giornaliero empirica è stato studiato per la media chiedere portafoglio ordini per i migliori prezzi di HFTs $f_A(r)$ [Fig. 5(b) e materiale supplementare [35]]. Sorprendentemente, abbiamo

trovato un accordo quantitativo con la nostra teoria (9) senza parametri adeguati, che sostiene fortemente la validità della nostra descrizione.

Anche il CDF segmentato su due ore per il movimento del prezzo viene valutato con una precisione di una precisione $P^{2h}(\geq |\Delta p|; \kappa)$ [Fig. 5(c)], che obbedisce a una legge esponenziale che è qualitativamente coerente con la nostra previsione teorica (10). Il valore della durata di decadimento κ di due ore varia in modo significativo durante una settimana. Per rimuovere questa caratteristica non stazionaria, abbiamo introdotto il CDF P^{2ha} due ore in scala $(\geq |\Delta p|) \equiv P^{2h}(\geq \kappa |\Delta p|; \kappa) / Z$ con i parametri di scala κ e Z [Fig. 5(d)], incorporando così la legge esponenziale di due ore per l'intera settimana.

I movimenti dei prezzi obbediscono a una legge esponenziale per brevi periodi, ma contemporaneamente obbediscono a una legge di potenza per lunghi periodi con esponente $\alpha = 3,6 \pm 0,13$ [Fig. 5(e)]. Questa apparente discrepanza deriva dalla natura della legge di potenza della lunghezza di decadimento κ . Poiché κ circa obbedisce a una legge di potenza CDF $Q(\geq \kappa) \sim \kappa^{-m}$ durante la settimana con $m = 3,5 \pm 0,13$ [Fig. 5(f)], la settimana CDF $P^w(\geq |\Delta p|)$ asintoticamente obbedisce alla legge di potenza come sovrapposizione della CDF esponenziale segmentata su due ore,

$$P^w(\geq |\Delta p|) = \int_0^\infty d\kappa Q(\kappa) P^{2h}(\geq |\Delta p|; \kappa) \alpha |\Delta p|^{-m}, \quad (11)$$

con $Q(\kappa) \equiv -dQ(\geq \kappa) / d\kappa$, coerentemente con l'esponente empirico $\alpha \approx m$. Il nostro risultato è quindi coerente con la precedente legge sulla potenza riportata [24-27] come proprietà non stazionaria di κ .

Poiché il nostro modello HFT che segue le tendenze mostra il movimento collettivo degli ordini [Figs. 4(d) e 4(e)], questo modello può riprodurre la struttura del libro degli ordini stratificato [15] (vedi Materiale supplementare [35]). Definiamo c_r (c_{+r}) e a_r (a_{+r}) come il numero di offerte (ask) e annullamenti tra un tick alla distanza relativa r dal midprice del mercato. Definiamo anche il cambio di numero $N_r = c_r - a_r$ ($N_{+r} = c_{+r} - a_{+r}$) alla distanza r per il lato di offerta (chiedere). Il coefficiente di correlazione C_r (C_{+r}) è riportato in Fig. 5(g) tra N_r (N_{+r}) e Δp , mostrando correlazione positiva e negativa negli strati interno (esterno) ed esterno (interno), rispettivamente. Mostriamo inoltre una correlazione lineare tra il movimento del prezzo Δp e il numero totale di cambiamenti nello strato interno $N_{\text{interno}} \equiv \int_{-\infty}^{\gamma_c} dr (N_r^- - N_r^+)$. Il modello HFT che segue la tendenza è quindi qualitativamente coerente con i risultati precedenti [15] (vedi anche Materiale supplementare per analisi dei dati [35]), il che implica che la struttura a strati era la diretta conseguenza del movimento collettivo.

DISCUSSIONE.-

-

Abbiamo studiato empiricamente il trend seguito dagli HFTs, inducendo il movimento collettivo del book degli ordini. Questa proprietà non è stata acquisita nel precedente modello di ordine [16-21] ed è stato fondamentale nel riprodurre i nostri risultati empirici. In effetti, nessuna delle nostre scoperte empiriche, il profilo del libro degli ordini, il movimento esponenziale dei prezzi e la struttura stratificata del libro degli ordini [15] sono stati riprodotti dal modello del libro degli ordini precedente in parametri realistici in assenza del movimento collettivo (cfr. Materiale supplementare [35]). Ci aspettiamo che l'introduzione di questa mozione collettiva sui modelli di ordini sia la chiave per replicare queste scoperte empiriche.

CONCLUSIONE.-

Abbiamo stabilito sia un modello microscopico che una teoria cinetica per i commercianti di FX mediante l'osservazione diretta della dinamica delle HFTs, concordando quantitativamente con i risultati empirici sotto ipotesi minime. Nel flusso dell'econofisica, il nostro modello (2) è il primo modello microscopico direttamente supportato da prove microscopiche dinamiche e che mostra accordo con reperti mesoscopici e macroscopici. Ci aspettiamo che si verifichi un nuovo flusso verso descrizioni sistematiche del mercato finanziario basate su prove microscopiche. I lettori interessati sono riferiti a Rif. [43] per ulteriori dettagli matematici.

RINGRAZIAMENTI

Apprezziamo molto la NEX per la fornitura dei dati EBS. Apprezziamo anche M. Katori, H. Hayakawa, S. Ichiki, K. Yamada, S. Ogawa, F. van Wijland, D. Sornette, M. Sano, T. G. Sano e T. Ito per discussioni fruttuose. Questo lavoro è stato supportato da JSPS KAKENHI (Grants No.

MATERIALE SUPPLEMENTARE

CLICCA PER ESPANDERE

RIFERIMENTI

1. A. Einstein, *Ann. Phys. (Berlino)* **322**, 549 (1905). (<http://dx.doi.org/10.1002/andp.19053220806>).
2. S. Chapman e T. G. Cowling, *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases* (Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1970).
3. N. G. van Kampen, *Processi stocastici in Fisica e Chimica*, 3a ed. (Elsevier, Amsterdam, 2007).
4. E. Bertin, M. Droz e G. Grégoire, *Phys. Rev. E* **74**, 022101 (2006). (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.74.022101>); *J. Phys. A* **42**, 445001 (2009). (<http://dx.doi.org/10.1088/1751-8113/42/44/445001>).
5. N. V. Brilliantov e T. Pöschel, *Teoria cinetica dei gas granulari* (Oxford University Press, New York, 2004).
6. C. Van den Broeck, R. Kawai e P. Meurs, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 090601 (2004). (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.93.090601>).

7. C. Van den Broeck e R. Kawai, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 210601 (2006).
(<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.96.210601>).
8. D. Helbing, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 1067 (2001).
(<http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.73.1067>).
9. A. Schadschneider, D. Chowdhury e K. Nishinari, *Trasporto stocastico in sistemi complessi: da Molecules a Vehicles* (Elsevier, Amsterdam, 2010).
10. I. Prigogine e R. Herman, *Teoria cinetica del traffico veicolare* (American Elsevier, New York, 1971).
11. R. Huang, I. Chavez, K. M. Taute, B. Lukić, S. Jeney, M. G. Raizen e E.-L. Florin, *Nat. Phys.* **7**, 576 (2011) (<http://dx.doi.org/10.1038/nphys1953>).
12. T. Li, S. Kheifets, D. Medellin e M. G. Raizen, *Science* **328**, 1673 (2010).
(<http://dx.doi.org/10.1126/science.1189403>).
13. L. Pareschi e G. Toscani, *Interacting Multiagent Systems: Equazioni cinetiche e metodi Monte Carlo* (Oxford University Press, Oxford, 2013).
14. L. Bachelier, *Ann. Sci. Ec. Norma. Super.* **17**, 21 (1900).
(<http://dx.doi.org/10.24033/asens.476>).
15. Y. Yura, H. Takayasu, D. Sornette e M. Takayasu, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 098703 (2014).
(<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.112.098703>); *Phys. Rev. E* **92**, 042811 (2015).
(<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.92.042811>).

ASTRATTO

16. F. Slanina, *Essentials of Econophysics Modeling* (Oxford University Press, Oxford, 2014).

NOTIZIE E

COMMENTI DI

FISICA

17. S. Maslov, *Physica (Amsterdam)* **278A**, 571 (2000) ([http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371\(00\)00067-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371(00)00067-4)).

AUTORI

18. M. G. Daniels, J. D. Farmer, L. Gillemot, G. Iori, e E. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 108102 (2003) (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.90.108102>).

ARTICOLO

TESTO

19. E. Smith, J. D. Farmer, L. Gillemot e S. Krishnamurthy, *Quant. Finanza* **3**, 481 (2003).
(<http://dx.doi.org/10.1088/1469-7688/3/6/307>).

20. J.-P. Bouchaud, M. Mézard e M. Potters, *Quant. Finanza* **2**, 251 (2002).

(<http://dx.doi.org/10.1088/1469-7688/2/4/301>).

MICROSCOPICA

OSSERVATA

21. J. D. Farmer, P. Patelli e I. Zovko, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **102**, 2254 (2005).

(<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0409157102>).

MODELLO

MICROSCOPICO

22. R. N. Mantegna e H. E. Stanley, *Nature (London)* **376**, 46 (1995).

(<http://dx.doi.org/10.1038/376046a0>).

FORMULAZIONE

CINETICA

23. R. N. Mantegna e H. E. Stanley, *Introduzione all'econofisica* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1999).

DATI

MESOSCOPI

24. T. Lux, *Appl. Bilancio. Econ.* **6**, 463 (1996) (<http://dx.doi.org/10.1080/096031096333917>).

E MACROSCOPICI

...

25. V. Plerou, P. Gopikrishnan, L. A. Nunes Amaral, M. Meyer e H. E. Stanley, *Phys. Rev. E* **60**, 6519 (1999) (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.60.6519>).

DISCUSSIONE

26. D. M. Guillaume, M. M. Dacorogna, R. R. Davé, U. A. Müller, R. B. Olsen e O. V. Pictet, *Finance Stoch.* **1**, 95 (1997) (<http://dx.doi.org/10.1007/s007800050018>).

CONCLUSIONE

27. F. M. Longin, *J. Business* **69**, 383 (1996) (<http://dx.doi.org/10.1086/209695>).

RINGRAZIAMENTI

28. M. Takayasu, T. Mizuno e H. Takayasu, *Physica (Amsterdam)* **370A**, 91 (2006).

(<http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2006.04.041>).

SUPPLEMENTARE

29. A. S. Kyle, *Econometrica* **53**, 1315 (1985) (<http://dx.doi.org/10.2307/1913210>).

RIFERIMENTI

30. H. Takayasu, H. Miura, T. Hirabayashi e K. Hamada, *Physica (Amsterdam)* **184A**, 127 (1992) ([http://dx.doi.org/10.1016/0378-4371\(92\)90161-l](http://dx.doi.org/10.1016/0378-4371(92)90161-l)).

31. P. Bak, M. Paczuski e M. Shubik, *Physica (Amsterdam)* **246A**, 430 (1997).

([http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00401-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00401-9)).

32. T. Lux e M. Marchesi, *Nature (London)* **397**, 498 (1999) (<http://dx.doi.org/10.1038/17290>).

33. K. Yamada, H. Takayasu, T. Ito e M. Takayasu, *Phys. Rev. E* **79**, 051120 (2009). (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.79.051120>).
34. T. Hendershott, cap. M. Jones e A. J. Menkveld, *J. Finance* **66**, 1 (2011). (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1540-6261.2010.01624.x>).
35. Vedi Materiale supplementare su <http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevLett.120.138301> (<http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevLett.120.138301>) per i dettagli dei dati e analisi teoriche, che include i Rif. [36-39].
36. A. B. Schmidt, *Ecologia del moderno spot istituzionale FX: il mercato EBS nel 2011*, SSRN 1984070, 2011.
37. C. W. Gardiner, *Manuale di metodi stocastici per la fisica*, 4a ed. (Springer-Verlag, Berlino, 2009).
38. E. A. Novikov, *Sov. Phys. JETP* **20**, 1290 (1965); W. Horsthemke e R. Lefever, *Transizioni indotte dal rumore: teoria e applicazioni in fisica, chimica e biologia* (Springer-Verlag, Berlino, 1984); R. F. Fox, *Phys. Rev. A* **33**, 467 (1986). (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.33.467>).
39. H. A. David e H. N. Nagaraja, *Order Statistics*, 3a ed. (Wiley, New York, 2003).
40. A. J. Menkveld, *J.* (<http://dx.doi.org/10.1016/j.finmar.2013.06.006>) *Financ* . (<http://dx.doi.org/10.1016/j.finmar.2013.06.006>) *Marchio*. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.finmar.2013.06.006>) **16** (<http://dx.doi.org/10.1016/j.finmar.2013.06.006>), 712 (2013). (<http://dx.doi.org/10.1016/j.finmar.2013.06.006>); *Annu. Rev. Financ. Econ.* **8**, 1 (2016). (<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-financial-121415-033010>).
41. Regole di negoziazione EBS-Appendice-Mercato EBS (al momento di giugno 2016).
42. Y. Lempérière, C. Deremble, P. Seager, M. Potter e J.-P. Bouchaud, *J. Investment Strategies*. **3**, 41 (2014). (<http://dx.doi.org/10.21314/JOIS.2014.043>).
43. K. Kanazawa, T. Sueshige, H. Takayasu e M. Takayasu, *arXiv: 1802.05993* (<http://arxiv.org/abs/1802.05993>).

Problema

[Vol. 120, Iss. 13 - 30 marzo 2018 \(/prl/issues/120/13\)](#)



Riutilizzo e permessi