

La geometria oculta d'Internet

Marián Boguñá

Departament de Física Fonamental, Universitat de Barcelona

RESUM

Internet està provocant una revolució tecnològica només comparable amb el desenvolupament de l'electricitat a finals del segle XIX. Contràriament al que es pot pensar, Internet no és un sistema planificat, sinó que evoluciona de manera autoorganitzada segons les seves pròpies lleis. Resulta fonamental, doncs, si en volem preveure l'evolució i prevenir possibles col·lapses del sistema, apropar-nos al seu estudi amb els ulls d'un científic. En aquest sentit, el protocol més fonamental d'Internet, l'encarregat de redirigir els paquets d'informació, està patint una sobrecàrrega deguda al creixement desmesurat de la xarxa. En aquest article presentem una alternativa basada en les propietats dels espais hiperbòlics que té el potencial de convertir-se en una alternativa viable al protocol actual.

Doi: <http://dx.doi.org/10.2436/20.2001.01.9>

1 Introducció

En l'era de la informació, Internet s'està convertint en un bé públic, similar a carreteres, aeroports, o qualsevol altra infraestructura crítica [1]. D'acord amb la Internet World Stats, s'estima que més de tres mil milions de persones fan servir Internet cada dia per comunicar-se, cercar informació, compartir dades, o fer negocis. Un bon exemple són les xarxes socials en línia que, amb més de dos mil milions d'usuaris actius, s'estan convertint en una part integral de les activitats socials humanes [2].

Darrere de tots aquests processos hi ha la infraestructura d'Internet, un enorme i complex sistema de computadores connectades entre si amb protocols d'encaminament d'informació que permeten la comunicació entre els ordinadors dels usuaris finals. En una descripció molt simple, Internet és una xarxa composta de moltes xarxes independents, o sistemes autònoms (SA), cadascuna administrada per una mateixa organització [3]. Els SA van en grandària des de petites empreses, o fins i tot usuaris privats, fins a corporacions internacionals enormes. Cada SA és lliure d'organitzar la seva xarxa interna de la manera que cregui més convenient. Ara bé, els SA, pel sol fet de ser-ho, accepten cedir les seves infraestructures per transmetre informació que no està necessàriament destinada a cap dels seus usuaris interns. Evidentment, això només és possible si els diferents SA estan connectats entre si formant una superxarxa de xarxes, Internet.

Mentre que el disseny intern de cada SA està totalment controlat i, per tant, dissenyat per l'administrador del SA, la xarxa que connecta els diferents SA és un sistema totalment autoorganitzat. De fet, no hi ha una autoritat centralitzada que dicti als SA com han de crear les seves connexions. Aquestes són el resultat de decisions

independents locals basades en acords comercials entre parelles de SA, normalment del tipus proveïdor-client o parell-parell. Aquesta manca de control centralitzat fa que Internet sigui un veritable sistema complex autoorganitzat, més semblant als sistemes naturals que als sistemes dissenyats pels humans. Aquest fet planteja molts reptes científics, en particular el de la sostenibilitat del creixement d'Internet.

Certament, Internet ha estat creixent ràpidament d'acord amb totes les mesures [4, 5]. Per exemple, el nombre de SA augmenta en aproximadament 2.400 cada any [4] i, a finals de 2014, Internet ja contenia uns 45.000 SA actius. Malgrat el seu creixement, Internet ha de dur a terme de manera sostenible la seva tasca principal, permetre la transferència de paquets d'informació entre dos equips qualssevol, independentment del SA al qual pertanyin. Cal destacar que aquesta és la característica fonamental que fa que tots els nostres sistemes de comunicació digitals moderns funcionin: el correu electrònic, el web (*world wide web*) les comunicacions VoIP, la missatgeria instantània, etc. Però, aquesta funció pot ser realment sostinguda en un sistema que creix sense parar i on cada vegada es transfereix més i més informació?

2 El cervell d'Internet: el protocol d'encaminament BGP

Per respondre aquesta pregunta, cal entendre com funciona avui en dia el protocol de transferència de paquets d'informació entre SA, l'anomenat protocol BGP (*Border Gateway Protocol*). Cada SA té un conjunt de computadores especials que s'anomenen encaminadors BGP, encarregats de redirigir els paquets d'informació que els arriben cap als SA veïns. Per tal de prendre la decisió de quin

veí és el més adient per enviar cada paquet d'informació, l'encaminador BGP té a la seva disposició una taula d'encaminament amb totes les possibles destinacions IP a les quals es pot arribar seguint cada SA veí. Un cop el paquet d'informació ha estat transferit al nou SA, aquest repeteix el procés amb la seva taula d'encaminament, fins que el paquet arriba a la seva destinació final. Evidentment, l'eficàcia d'aquest protocol es basa en una estimació correcta de les taules d'encaminament. Aquest procés, tot i que és complex, es fa de manera col·lectiva i descentralitzada entre tots els SA basant-se en l'estat actual de la topologia global d'Internet.

El ràpid creixement del sistema implica un creixement igual de ràpid del nombre de possibles destinacions IP i, consegüentment, de la mida de les taules d'encaminament que els SA han de guardar. Aquest és un problema greu que posa en perill el rendiment i l'estabilitat d'Internet [6]. Pitjor encara, Internet no és estàtic. La seva topologia canvia constantment a causa de les fallades dels enllaços entre SA, la creació de nous SA, o bé noves connexions entre SA ja existents. Cada vegada que es produeix un canvi de la topologia de la xarxa en qualsevol lloc d'Internet, la informació sobre aquest esdeveniment ha de ser difosa a tots els SA, que han de recalculer ràpidament les noves rutes òptimes entre cadascun d'ells i la resta de la xarxa. Així doncs, el creixement d'Internet, acompanyat amb la seva dinàmica intrínseca, està provocant un deteriorament de la seva eficiència, de manera que entre els experts provoca la preocupació real que l'arquitectura d'encaminament actual d'Internet no és sostenible a llarg termini [6-9].

A nivell fonamental, les limitacions de l'arquitectura actual d'encaminament d'Internet són degudes a la necessitat de disposar en tot moment del coneixement exhaustiu de la topologia de la xarxa, tot i que distribuït mundialment entre tots els actors implicats. Aquest coneixement global és inevitable, ja que el procés d'encaminament no té una font d'informació diferent que la de la pròpia topologia de la xarxa. Fent una analogia simple, el procés de transferència d'un paquet d'informació entre dos SA amb el protocol BGP actual seria similar a intentar conduir un cotxe entre dues localitats fent servir únicament la informació que trobem a les cruïlles per les quals passem. Per arribar a la destinació desitjada, hem de suposar que la nostra destinació està llistada a totes les cruïlles i, evidentment, que la informació està actualitzada. Si per algun motiu imprevist, un tram de la ruta indicada en les cruïlles està temporalment fora de servei, serem incapaços d'arribar a la destinació final. Quan això passa a Internet, el paquet d'informació es perd. Fixem-nos, però, que amb aquesta manera d'encaminar en cap moment fem servir la informació geogràfica inherent al fet que ens movem a sobre d'una superfície bidimensional. Això suggereix que hi ha maneres més bones

de trobar camins en xarxes si aquestes estan incrustades en un espai mètric. Seguint amb el nostre exemple, donades les coordenades geogràfiques del lloc on ens trobem en cada moment i les de la destinació final, podem calcular fàcilment quina direcció és la que ens acosta al nostre destí. Veiem que un sistema de coordenades en un espai geomètric, juntament amb una representació del món en aquest espai, ens simplifica dràsticament la tasca d'encaminament.

Així doncs, per dissenyar un sistema d'encaminament simple i eficient ens cal un mapa de la xarxa. La construcció d'aquest mapa d'Internet es redueix a l'assignació a cada SA d'unes coordenades en un espai mètric.

Aleshores podem utilitzar aquest espai per dirigir en cada moment els paquets d'informació en la direcció correcta fins a assolir les destinacions finals. La implementació és simple: el SA que tingui el paquet d'informació en aquell moment llegeix l'adreça de destinació a la capçalera del paquet i el reenvia al veí que estigui més proper a la destinació final en l'espai mètric, un protocol anomenat encaminament geogràfic.

Evidentment, aquesta estratègia només pot ser eficaç si el mapa de la xarxa és congruent amb la topologia de la mateixa xarxa. En l'analogia amb el viatge amb cotxe, per exemple, aquesta condició significa que, si la congruència existeix, hi ha d'haver una ruta per carretera que es mantingui propera a la geodèsica geogràfica entre l'inici del viatge i el destí final. Si la condició de congruència es manté, llavors l'avantatge del mètode és doble. En primer lloc, l'única informació que els SA han de mantenir són les coordenades dels seus veïns, és a dir, no és necessari que els SA mantinguin taules d'encaminament. En segon lloc, una vegada que els SA tenen les coordenades assignades, aquestes no canvien quan hi ha canvis topològics a Internet. Per tant, els SA no han de intercanviar informació sobre la topologia canviant d'Internet. En conjunt, aquestes dues millores eliminen essencialment les limitacions de l'arquitectura d'encaminament actual basada en el protocol BGP.

3 Cercant la geometria d'Internet

Per construir un mapa geogràfic, primer cal modelar la superfície de la Terra, per exemple, suposant que és una esfera. De la mateixa manera, per construir el nostre mapa també necessitem un model geomètric de l'espai d'Internet. Com ja hem comentat abans, un bon mapa d'Internet ha de ser congruent amb la seva topologia. Això implica que les línies geodèsiques que connecten parelles de punts han de ser properes als camins més curts a la xarxa, comptats com el nombre mínim de connexions que els separen. Aquí ens trobem amb el primer problema.

Internet, així com la gran majoria de xarxes complexes, té la propietat del món petit; el nombre mitjà de connexions entre qualsevol parella de nodes de la xarxa és un nombre petit. Si parlem de xarxes socials de coneguts, s'estima que aquest nombre és aproximadament de sis, és a dir, dues persones triades a l'atzar d'entre els més de sis mil milions que habiten el planeta es poden connectar amb una cadena de sis persones, un fenomen conegut popularment com *els sis graus de separació*. En termes matemàtics, aquesta propietat significa que el nombre mitjà de connexions escala com el logaritme de la mida de la xarxa o, equivalentment, que el volum del sistema (comptat com el nombre de nodes que conté) creix exponencialment amb el diàmetre de la xarxa.

La congruència que demanem al nostre mapa implica que la geometria que utilitzem ha d'estar d'acord amb la propietat del món petit. Això descarta immediatament els espais euclidians com a geometries potencials. Certament, en geometria euclidiana, el volum d'una esfera creix com una potència del diàmetre i no pas exponencialment. D'altra banda, l'espai triat hauria de ser el més neutre possible, és a dir, cap punt hauria d'estar privilegiat

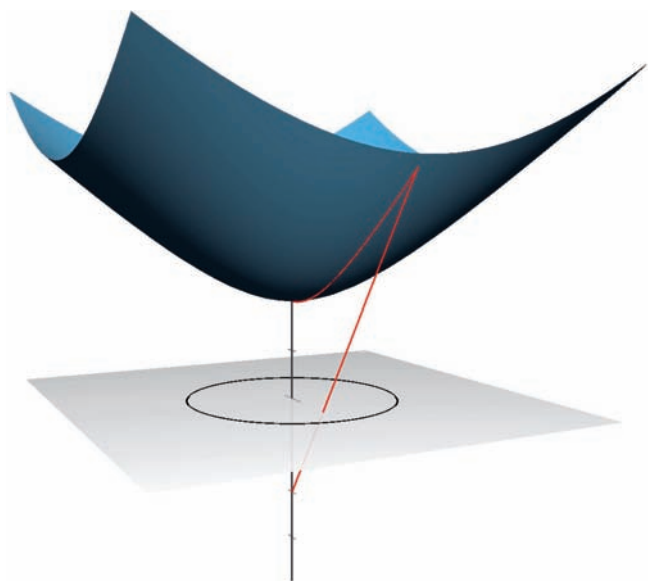


Figura 1: *Espai hiperbòlic bidimensional de curvatura constant -1 a l'espai de Minkowski tridimensional (t, x, y) . La superfície representa l'hiperboloide $t = \sqrt{1 + x^2 + y^2}$. La figura també mostra la projecció estereogràfica que dona lloc a la representació de Poincaré. Cada punt de l'hiperboloide s'uneix amb una recta amb el pol sud de l'hiperboloide $(-1, 0, 0)$. La intersecció amb el pla $(0, x, y)$ correspon al mateix punt en la representació de Poincaré. Notem que l'hiperboloide és invariant sota transformacions de Lorentz. Això implica que tots els punts de l'hiperboloide són equivalents, com correspon a un espai homogeni i isòtrop.*

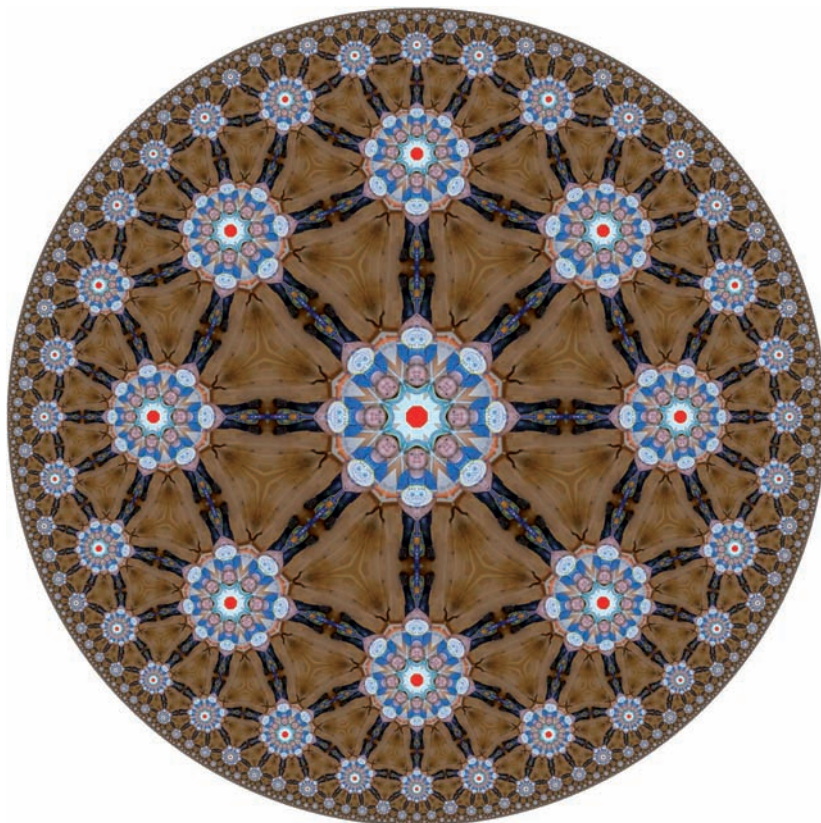
respecte als altres. En termes matemàtics, l'espai ha de ser homogeni i isòtrop. Aquests tipus d'espais són ben coneguts en geometria: els espais euclidians, amb curvatura nul·la, els espais esfèrics, amb curvatura constant positiva, i finalment, els espais hiperbòlics, amb curvatura constant negativa. Als espais esfèrics, el volum d'una esfera creix més lentament que un polinomi del diàmetre i, per tant, aquests espais tampoc són bons candidats per modelar Internet. Als espais hiperbòlics, el volum d'una esfera creix com el sinus hiperbòlic del radi i, per tant, per a radis prou grans, ho fa exponencialment. Així doncs, la geometria hiperbòlica és l'única que satisfà de manera natural la propietat del món petit.

Els espais hiperbòlics són menys coneguts que els seus equivalents de curvatura positiva, els esfèrics. Probablement això és degut a la dificultat en visualitzar-los. Una esfera bidimensional, per exemple, es pot visualitzar sense cap deformació en un espai euclidià tridimensional. Això és impossible en el cas d'un espai hiperbòlic. L'expansió exponencial de l'espai fa que aquests espais no «càpiguen» en cap espai euclidià, encara que sigui de dimensió infinita, sense deformar-los. Si bé no és possible representar-los en espais euclidians, sí que ho és en l'espai de Minkowski. Per exemple, el pla hiperbòlic bidimensional amb curvatura constant -1 està format pels punts de l'espai de Minkowski definits per l'hiperboloide $t = \sqrt{1 + x^2 + y^2}$ amb la mètrica induïda per la mètrica de Minkowski, tal com representem a la figura 1.

D'altra banda, la impossibilitat de construir una representació isomètrica ha generat un nombre considerablement gran de representacions alternatives, en què cadascuna preserva alguna propietat determinada. Una de les més conegudes és la representació de Poincaré, que no és més que una projecció estereogràfica dels punts de l'hiperboloide (vegeu la figura 1) i que preserva els angles entre línies geodèsiques. La figura 2 mostra un exemple d'aquesta representació que recorda els famosos cercles límit de M. C. Escher i que il·lustren molt clarament l'expansió exponencial de l'espai.

Un cop definida la geometria adient, ens cal un model estocàstic que generi grafs a partir de la distribució espacial dels nodes. El model més simple consisteix a distribuir els nodes homogèniament dins un cercle del pla hiperbòlic i connectar cada parella de nodes amb una probabilitat decreixent amb la distància hiperbòlica entre ells. Aquesta és la clau si es vol obtenir una bona congruència entre la topologia del graf i l'espai mètric subjacent. Certament, si dos nodes estan a prop a l'espai mètric, tenen una probabilitat molt alta d'estar connectats en el graf. Per tant, els camins més curts topològics sempre estaran a prop de les línies geodèsiques. En una sèrie de treballs [10–14] hem demostrat que aquest tipus de models no només satisfan la propietat del món petit, sinó que també generen de manera natural moltes de les propietats topològiques

Figura 2: Representació de Poincaré del pla hiperbòlic. En aquesta representació, tot el pla hiperbòlic bidimensional de curvatura -1 està contingut en un disc de radi unitat, amb el punt de l'infinit col·locat a la frontera del disc. En aquesta representació s'aprecia clarament el creixement exponencial de l'espai. Notem que la representació de Poincaré preserva els angles entre geodèsiques però no és isomètrica. En particular, tots els triangles que s'aprecien a la figura tenen les mateixes dimensions.



observades en les xarxes complexes reals, com ara la distribució del nombre de connexions per node o el nombre de triangles presents a la xarxa.

Vam fer servir aquests models [15] per tal d'inferir les coordenades hiperbòliques d'una topologia d'Internet obtinguda gràcies al projecte Archipelago [16] de juny de 2009. La figura 3 en mostra el resultat. Cal remarcar que totes les proves estadístiques que s'han fet mostren una gran congruència entre la topologia real d'Internet i la geometria hiperbòlica inferida. A més a més, disposàvem d'informació addicional sobre els SA no continguda en la topologia. En particular, la pertinença de cada SA a un país. La distribució angular de tots els SA d'un mateix país està concentrada en una regió estreta per a la gran majoria de països, tot i que aquesta informació no es fa servir en absolut a l'hora d'estimar les coordenades dels SA. A la figura 3 mostrem el nom de cada país, col·locat a la posició angular mitjana dels seus SA. Aquí també es poden apreciar clarament les proximitats geogràfiques o geopolítiques entre països. Tots aquests resultats ens donen confiança en el fet que l'assignació de coordenades obtinguda amb el nostre mètode és realista.

4 Navegant per l'espai hiperbòlic

El nostre mapa ja està preparat per encaminar informació d'un SA a un altre. Per mesurar la qualitat de l'encami-

nament geogràfic del nostre mapa fem servir dues mètriques, la taxa d'èxit entre parelles de SA —definida com la fracció de nodes que són capaços de comunicar-se a través d'un camí seguint un protocol d'encaminament geogràfic— i l'elongació —la fracció mitjana entre el nombre de passos entre dos punts a través d'un camí fent servir el mapa i el nombre de passos mínims segons la topologia. Evidentment, la situació òptima correspon a tenir una taxa d'èxit del 100 % i una elongació igual a 1. En aquest cas ideal, totes les parelles de SA estarien connectades per un camí trobat amb encaminament geogràfic i, a més a més, aquest camí tindria el mínim nombre de passos possible.

El nostre mapa té unes propietats d'encaminament que estan molt a prop de les òptimes. En particular, la taxa d'èxit és del 97 % i, amb petites modificacions, pot arribar fàcilment al 100 %. L'elongació és 1,1, és a dir, de mitjana els camins seguits pel protocol d'encaminament geogràfic són només un 10 % més llargs que els camins topològics més curts. Hem de tenir en compte, però, que per trobar els camins més curts segons la topologia cal tenir informació global de la xarxa, mentre que l'encaminament geogràfic només té en compte les coordenades de la destinació final i les dels veïns dels nodes que es van visitant, és a dir, informació quasi local. El nostre mapa també mostra unes propietats de robustesa excel·lents. Per exemple, en un experiment sintètic, després d'eliminar el 30 % dels nodes de la

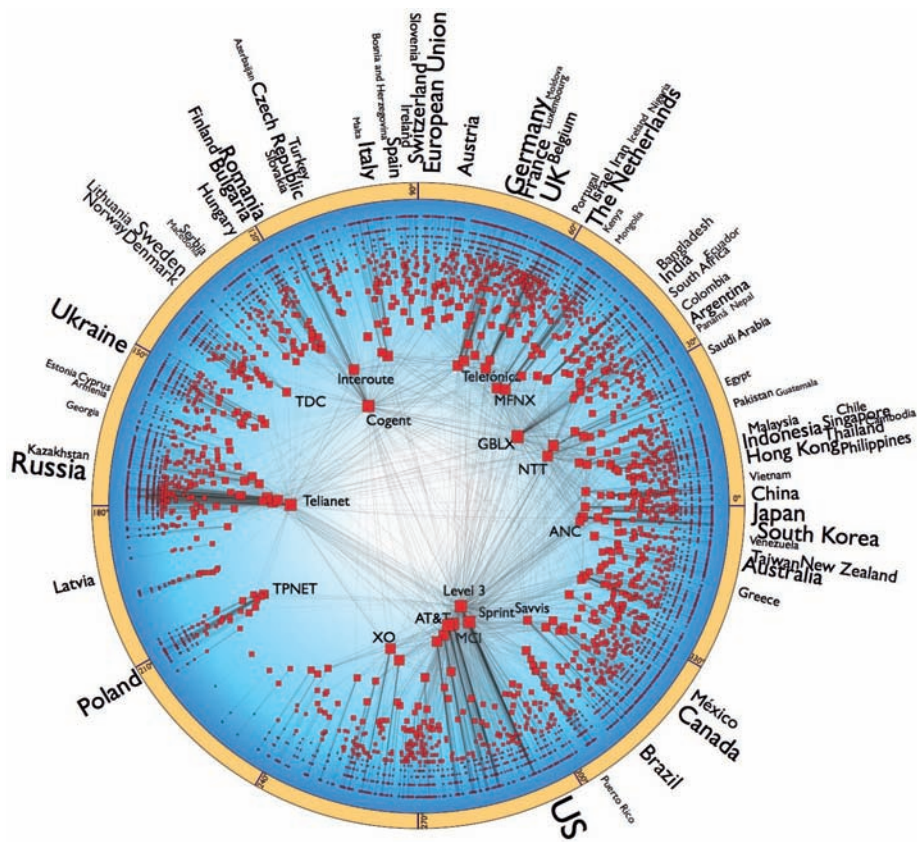


Figura 3: Mapa hiperbòlic d'Internet. El nom dels països està col·locat en la posició angular mitjana de tots els SA del país corresponent. En aquesta representació, els SA més grans estan col·locats a prop del centre de la figura, mentre que els petits estan a la perifèria.

xarxa, la taxa d'èxit es manté per sobre del 85 % mentre que l'elongació es manté en 1,1, tot i que no hem recalculat les coordenades de la xarxa. El mapa també és robust respecte al creixement de la xarxa ja que les coordenades dels nodes existents poden quedar congelades durant períodes de temps molt llargs, així que només cal calcular coordenades dels nous nodes de la xarxa.

5 Conclusions

Com hem vist en aquest article, la geometria hiperbòlica es pot utilitzar per a l'encaminament eficient d'informació a Internet, independentment de quina sigui la mida del sistema. Això és degut, principalment, al fet que la quantitat d'informació que cada SA ha de mantenir és proporcional al nombre de connexions del SA, teòricament la mínima possible. A més a més, el cost de l'algoritme és mínim una vegada el mapa està construït ja que els SA no intercanvien informació sobre els canvis dinàmics de la topologia de la xarxa. Així doncs, el nostre mètode representa una solució òptima i assoleix propietats d'encaminament properes a les teòricament millors possibles. La nostra recerca representa, doncs, una solució realista i viable dels problemes d'encaminament als quals Internet s'enfronta avui en dia.

Bibliografia

- [1] V. GEHRING. The Internet in Public Life. Rowman & Littlefield, Washington (2004).
- [2] D. LAZER, A. PENTLAND, L. ADAMIC, S. ARAL, A.-L. BARABÁSI, D. BREWER, N. CHRISTAKIS, N. CONTRACTOR, J. FOWLER, M. GUTMANN, T. JEBARA, G. KING, M. MACY, D. ROY, and M. VANALSTYNE. Computational social science. Science, **323(6)**, 721-723 (2009).
- [3] J. HAWKINSON AND T. BATES. RFC1930. The Internet Engineering Task Force, Fremont (1996).
- [4] AMOGH DHAMDHERE and CONSTANTINE DOVROLIS. Ten years in the evolution of the Internet ecosystem. In Konstantina Papagiannaki and Zhi-Li Zhang, editors, Proceedings of the 8th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement 2008, Vouliagmeni, Greece, October 20-22, 2008, pages 183-196. ACM (2008).
- [5] B. CARPENTER. Observed relationships between size measures of the Internet. Comput Commun Rev, **39(2)**, 6-12 (2009).
- [6] D. MEYER, L. ZHANG, and K. FALL, editors. RFC4984. The Internet Architecture Board, Amsterdam (2007).

- [7] R. ATKINSON AND R. BENNETT. The Future of the Internet and Broadband . . . and How to Enable It. Federal Communications Commission, Washington (2009).
- [8] P. GODFREY, I. GANICHEV, S. SHENKER, and I. STOICA. Pathlet routing. *Comput Commun Rev*, **39(4)**, 111-122 (2009).
- [9] K. GAMMON. Networking: Four ways to reinvent the Internet. *Nature*, **463**, 602-604 (2010).
- [10] M. BOGUÑÁ, D. KRIOUKOV, and K. CLAFFY. Navigability of complex networks. *Nature Physics*, **5**, 74-80 (2009).
- [11] M. BOGUÑÁ and D. KRIOUKOV. Navigating ultrasmall worlds in ultrashort time. *Phys Rev Lett*, **102**, 058701 (2009).
- [12] D. KRIOUKOV, F. PAPADOPOULOS, A. VAHDAT, and M. BOGUÑÁ. Curvature and temperature of complex networks. *Phys Rev E*, **80**, 035101(R) (2009).
- [13] D. KRIOUKOV, F. PAPADOPOULOS, M. BOGUÑÁ, and A. VAHDAT. Greedy forwarding in scale-free networks embedded in hyperbolic metric spaces. *ACM SIGMETRICS Perf E R*, **37(2)**, 15-17 (2009).
- [14] FRAGKISKOS PAPADOPOULOS, DMITRI KRIOUKOV, MARIÁN BOGUÑÁ, and AMIN VAHDAT. Greedy forwarding in dynamic scale-free networks embedded in hyperbolic metric spaces. In *INFOCOM 2010. 29th IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 15-19 March 2010, San Diego, USA, pages 1-9. IEEE (2010).
- [15] MARIÁN BOGUÑÁ, FRAGKISKOS PAPADOPOULOS, and DMITRI KRIOUKOV. Sustaining the internet with hyperbolic mapping. *Nat Commun*, **1** (2010).
- [16] KIMBERLY CLAFFY, YOUNG HYUN, KEN KEYS, MARINA FOMENKOV, and DMITRI KRIOUKOV. Internet mapping: From art to science. In *CATCH '09: Proceedings of the 2009 Cybersecurity Applications & Technology Conference for Homeland Security*, pages 205-211, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society (2009).