

منبع: <http://physics.aps.org/articles/v6/47>

مغز بحرانی

مثال‌های شاخص این سیستم‌ها، گستره‌ی پهنای رادار بر می‌گیرد: از شبکه‌های برهمکنشی ژنی گرفته تا بازارهای مالی. در حالت بحرانی، این سیستم‌ها نه در محدوده‌ی بی‌نظم گیر می‌افتند (محدوده‌ای که برهم‌کنش‌ها بسیار ضعیفند و نطفه بر رفتار سیستم حاکم است) و نه در محدوده‌ی نظم سرتاسری می‌افتند که تمام عناصر سیستم قفل شده باشند (محدوده‌ای که برهم‌کنش‌ها بسیار قوی هستند و سیستم کاملاً ایستاست). هیچ‌کدام از این حالت‌ها آن دوگانگی‌ای را ندارد که سیستم پیچیده‌ای مانند مغز برای کارکرد درست به آن نیازی اساسی دارد: چنین سیستمی باید مقداری نظم داشته باشد تا بتواند فعالیت‌های هماهنگ انجام دهد (یعنی در پاسخ به تحریک‌های خاص، رفتاری بازتولیدپذیر نشان دهد) و در عین حال مقدار مشخصی هم بی‌نظمی داشته باشد تا انعطاف‌پذیر باشد (یعنی خود را با تغییر شرایط بیرونی تطبیق دهد). چنین دوگانگی رفتاری در حالت بحرانی وجود دارد. با این که گذار نظم-بی‌نظمی، درجات متعدد دارد، اما این تعادل ظریف بین نظم و بی‌نظمی در نقطه‌ی بحرانی، به‌طور عام ویژگی‌های آماری خاصی بروز می‌دهد: سیستم‌های بحرانی همبستگی‌های مکانی و زمانی بلندبرد بروز می‌دهند (بلندبرد یعنی در مقیاس‌هایی که بسیار بزرگتر از مقیاس برهمکنش‌های دو به دو؛ هم‌چنین، این همبستگی‌ها توزیع توانی دارند. در دهه‌ی گذشته مطالعه‌های متعدد نشان داده است که مغز در حالت استراحت خصیصه‌های متعددی بروز می‌دهد که معمولاً در حالت بحرانی دیده می‌شود، مانند مقیاس‌بندی توانی بهمین‌های شلیک‌های عصبی^۷ (فوران‌های گاه‌گاه فعالیت‌های الکتریکی‌ای که در کورتکس مغز مشاهده می‌شود) [۳ و ۲]، بستگی‌های زمانی و مکانی بلندبرد و غیربدریهی فعالیت‌های عصب‌ها [۴]، و تغییر مقیاس بی‌هنجار^۸ افت‌وخیز فعالیت‌ها با تغییر ابعاد شبکه [۵]. پژوهش‌هایی که در گروه من انجام شده است نشان داده است که شبکه‌های مغز، با بودن در حالت بحرانی، پاسخ به ورودی‌ها را بهینه می‌کند و توانایی پردازش اطلاعات خود را بیشینه می‌کند [۶].

اکنون، هایموویچی و همکاران، مدلی ساده برای مغز ارائه کرده‌اند که اگر پارامترهایش برای قرار گرفتن در حالت بحرانی تنظیم شود، با بازسازی یافته‌های اصلی به‌دست‌آمده از «تصویربرداری

مدلی که مغز را به عنوان سیستمی نزدیک به حالت گذار فاز توصیف می‌کند، می‌تواند دینامیک سرتاسری فعالیت‌های مغزی را، که در آزمایش‌های fMRI مشاهده شده است، توضیح دهد.

علم اعصاب^۱ در آستانه‌ی پیشرفتی بی‌سابقه در ساختن تصویرهای دقیق و آنی از فعالیت عصب‌های مغز، هنگام فعالیت‌های سطح بالا مثل تشخیص اشیا و تصمیم‌گیری قرار دارد. تصور می‌شود ساخت این تصویرها که در نتیجه‌ی کاربرد سریع نتایج یک شاخه‌ی علم در شاخه‌های دیگر (زیست‌شناسی مولکولی، اپتیک، تصویربرداری، فرایندهای ریزساختی و نانوفناوری) ممکن شده است، در فهم فعالیت‌های پیچیده‌ی مغز نقشی حیاتی خواهند داشت: فعالیت‌هایی که از دل میلیاردها عصب مغز و هزاران میلیارد اتصال بین آنها بیرون می‌آید. در این زمینه‌ها پروژه‌های تحقیقاتی بین‌المللی با مقیاس‌های بزرگی در حال انجام یا در دست طرح ریزی است: پروژه‌ی کانکتوم انسانی^۲ و برین (BRAIN)^۳ در ایالات متحده و پروژه‌ی مغز بشر^۴ در اروپا و پروژه‌ی برینتوم^۵ در چین. هدف فراگیر این پروژه‌های بزرگ، جمع‌آوری و ادغام اطلاعات مفصل در مورد ساختار مغز و رفتارهای دینامیکی آن است تا بتوان گفت که مغز چگونه کار می‌کند. اما آیا این تلاش‌ها به ثمر می‌نشینند؟ اگر نتوان به‌درستی صورت رفتارهای جمعی برآمده از این فعالیت‌های جزئی در مغز را تشخیص داد، دانستن ریزه‌کاری‌های ساختارهای ظریف مغز و هم‌چنین مشاهده‌ی فعالیت‌های اعصاب، کافی نخواهد بود. در این راستا، آریل هایموویچی از دانشگاه بوینوس آیرس و همکارانش [۱] با استفاده از مدلی خاص، به شکل زیبایی نشان داده‌اند که چگونه پدیده‌های جمعی^۶، نقشی کلیدی در تعیین دینامیک مغز بازی می‌کند به این معنی که نشان داده‌اند که مغز در حالت استراحت (یعنی وقتی که هیچ وظیفه‌ی مشخصی را انجام نمی‌دهد) سیستمی در حالت بحرانی است.

سیستم‌های بحرانی سیستم‌هایی هستند که به نقطه‌ای بحرانی نزدیک‌اند، نقطه‌ای که عمده‌تاً به صورت مرز گذار از حالت منظم به حالت بی‌نظم شناخته می‌شوند. برای بیشتر سیستم‌های پیچیده‌ای که از حالت تعادل دورند و از تعداد زیادی عنصرهای برهم‌کنش‌دار تشکیل شده‌اند مدل‌های سیستم بحرانی ساخته شده است که به خوبی رفتار این سیستم‌های پیچیده را توصیف می‌کند؛

این متن درباره‌ی مقاله‌ی زیر نوشته شده است: Hydrogen Atoms under Magnification: Direct Observation of the Nodal Structure of Stark States A. S. Stodolna, A. Rouzée, F. Lépine, S. Cohen, F. Robicheaux, A. Gijsbertsen, J. H. Jungmann, C. Bordas, M. J. J. Vrakking Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 213001.

مراجع:

1. A. S. Stodolna, A. Rouzée, F. Lépine, S. Cohen, F. Robicheaux, A. Gijsbertsen, J. H. Jungmann, C. Bordas, and M. J. J. Vrakking, "Hydrogen Atoms under Magnification: Direct Observation of the Nodal Structure of Stark States," *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013) 213001.
2. J. S. Lundeen, B. Sutherland, A. Patel, C. Stewart, and C. Bamber, "Direct Measurement of the Quantum Wavefunction," *Nature* 474 (2011) 188.
3. A. I. Lvovsky and M. G. Raymer, "Continuous-Variable Optical Quantum-State Tomography," *Rev. Mod. Phys.* 81 (2009) 299.
4. J. Itatani, J. Levesque, D. Zeidler, H. Niikura, H. Pepin, J. C. Kieffer, P. B. Corkum, and D. M. Villeneuve, "Tomographic Imaging of Molecular Orbitals," *Nature* 432 (2004) 867.
5. P. Puschnig, S. Berkebile, A. J. Fleming, G. Koller, K. Emtsev, T. Seyller, J. D. Riley, C. Ambrosch-Draxl, F. P. Netzer, and M. G. Ramsey, "Reconstruction of Molecular Orbital Densities from Photoemission Data," *Science* 326 (2009) 702.
6. J. Repp, G. Meyer, S. M. Stojković, A. Gourdon, and C. Joachim, "Molecules on Insulating Films: Scanning-Tunneling Microscopy Imaging of Individual Molecular Orbitals," *Phys. Rev. Lett.* 94, (2005) 026803.
7. L. Holmegaard et al., "Photoelectron Angular Distributions from Strong-Field Ionization of Oriented Molecules," *Nature Phys.* 6 (2010) 428.
8. F. Lépine, Ch. Bordas, C. Nicole, and M. J. J. Vrakking, "Atomic Photoionization Processes under Magnification," *Phys. Rev. A* 70 (2004) 033417.
9. L. Wang, H. F. Yang, X. J. Liu, H. P. Liu, M. S. Zhan, and J. B. Delos, "Photoionization Microscopy of the Hydrogen Atom in Parallel Electric and Magnetic Fields," *Phys. Rev. A* 82 (2010) 022514.
10. L. Grill, M. Dyer, L. Lafferentz, M. Persson, M. V. Peters, and S. Hecht, "Nano-Architectures by Covalent Assembly of Molecular Building Blocks," *Nature Nanotech.* 2 (2007) 687.

زیرنویس:

1. superposition
2. entanglement
3. high-harmonic XUV spectra
4. angle-resolved photoelectron emission
5. scanning tunneling microscopy
6. tunable

بهمن‌های عصبی که از اندازه‌گیری‌های مغناطوس-انسفالوگرافی^{۱۸} [۹و۴] و از مطالعات درون موجود زنده^{۱۹} و درون لوله‌ی آزمایشگاه^{۲۰} به دست آمده است [۳] هم‌خوانی دارد.

یکی از جنبه‌های مهم این کار استفاده از جزئیات ساختار دسته تارها برای پیش‌بینی دینامیک سرتاسری مغز است. با این حال خوب است اشاره شود که داده‌های مربوط به اتصال‌های دسته تارهای عصبی که نویسندگان به کار برده‌اند از روش‌های آزمایشگاهی‌ای به دست آورده‌اند که محدودیت‌های آشکار دارد [تصویربرداری طیف پخش یا تانسور پخش (DSI/DTI)]^{۲۱}. در این روش‌ها طول اتصال‌های بلندبرد کم‌تر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود و نمی‌تواند جهت‌دار بودن دسته تارهای عصبی را تشخیص دهد؛ این وضعیت با آناتومی مغز سازگار نیست. بی‌تردید در مطالعات بعدی، مدل‌های بهتری برای دسته تارهای عصبی ساخته خواهد شد که باید در آینده به حساب آورد. جدا از این محدودیت‌ها، توزیع وزن اتصال‌ها که از این روش‌ها به دست می‌آید، به نظر «فیزیولوژیکی» می‌رسد، چون ویژگی‌های مشترک با تعدادی از سیستم‌های پیچیده دارد که به تازگی بررسی شده‌اند [۱۰].

یافته‌ی اصلی نویسندگان این است که برای توضیح فعالیت مغز باید اطلاعات ساختاری و دینامیک موضعی عصب‌ها را در چارچوب بحرانی^{۲۲} ادغام کرد. از آنجا که ناوردایی مقیاس یکی از نمودهای اصلی بحرانی بودن است (این خاصیت که ویژگی‌ها و دینامیک مشابهی در تمام مقیاس‌ها دیده می‌شود)، ره یافت آنها می‌تواند به رده‌های مختلف سازمان‌یابی مغز مربوط شود و گستره‌ی ریزمدارهای قشر مغز تا ستون‌های قشر مغز و تا کل مغز را در بر بگیرد. به این ترتیب چارچوبی واحد برای تفسیر اطلاعات روزافزون در باره‌ی ساختار و دینامیک عصب‌ها به دست خواهد آمد. اگرچه در این پژوهش، نویسندگان باید پارامتر مدل را برای آستانه‌ای خاص تنظیم ظریف می‌کردند تا به حالت بحرانی برسند، چالشی بزرگ این خواهد بود که بفهمیم مغز دقیقاً با کدام سازوکارهای فیزیکی و زیست‌شناختی به حالت بحرانی می‌رود و این حالت را طی یادگیری و رشد حفظ می‌کند.

Viewpoint: The Critical Brain
Dietmar Plenz

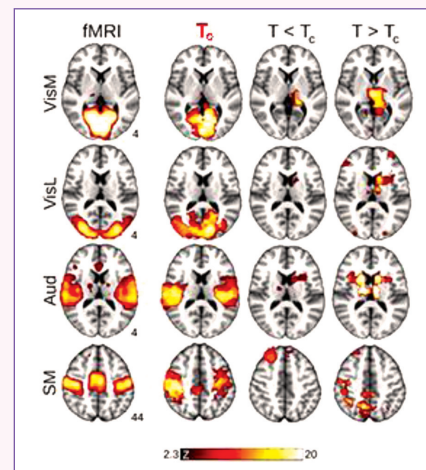
مترجم: سامان مقیمی عراقی

آشکار می‌کند. هر RSN را می‌توان به مجموعه‌ای خاص از محدوده‌های قشر مغز (کور تکس)^{۱۲} با وظایف خاص نسبت داد: مثلاً RSN‌های شناختی، حسی (دیداری، شنیداری) و RSN‌های حرکتی در مغز مشخص شده‌اند (شکل یک را ببینید).

هامیوویچی و همکاران برای ساختن مدلی از فعالیت‌های RSN از داده‌هایی استفاده کردند که نشان می‌دهد چگونه شبکه‌ی زیر قشر مغز متشکل از آن‌چه به دسته تارهای عصبی^{۱۳} معروف است ناحیه‌های مختلف قشر مغز را به هم وصل می‌کند. آنها مدل جذاب و ساده‌ی سه‌حالتی را به کار بردند که توانایی آن در توصیف دینامیک سیستم‌هایی متنوع، از فعالیت تک عصب تا شیوع بیماری در بین جمعیت‌های مختلف، شناخته شده است. هر منطقه‌ی قشر مغز در مدل این گروه، که در واقعیت صدها هزار عصب دارد، می‌تواند سه حالت داشته باشد: خاموش^{۱۴} (تحریک‌نشده ولی تحریک‌پذیر)، برانگیخته^{۱۵}، و در حال بازگشت^{۱۶} (به تازگی تحریک شده است و تا مدتی تحریک نمی‌پذیرد). گذار از حالت خاموش به حالت برانگیخته می‌تواند خودبه‌خود یا در اثر بیشتر شدن مجموع سیگنال‌ها از ناحیه‌های برانگیخته‌ی دیگر از آستانه‌ای معین رخ دهد. ناحیه‌ی برانگیخته پیش از آنکه دوباره تحریک‌پذیر شود مدت کوتاهی در حالت بازگشت قرار می‌گیرد.

چیزی که نویسندگان این مقاله دریافتند این است که این مدل می‌تواند منجر به خوشه‌های فعال مشابه با خوشه‌هایی شود که در فعالیت‌های RSN‌ها مشاهده شده است. ولی همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، برای این که مدل با داده‌های آزمایشی منطبق شود، آستانه‌ی تحریک باید درست روی مقداری تنظیم شود که مدل را در حالت بحرانی قرار می‌دهد. مدل آنها در حالت بحرانی تعدادی از ویژگی‌های آماری سیستم را پیش‌بینی می‌کند که با آزمایش در توافق است: یکی شکل‌گیری خوشه‌های فعال با توزیع ابعادی که از قانون توانی با شیب منهای سه دوم تبعیت می‌کند و نشانه‌ی بهمن‌های عصبی [۲] متناظر با دومین قله در توزیع اندازه‌های خوشه‌های بزرگ در مدل تراوش^{۱۷} است [۸]؛ دیگر، طول هم‌بستگی (فاصله‌ی دو نقطه‌ی سیستم که به شکل مستقل رفتار می‌کنند) و اگرایی افت‌وخیزهایش که با داده‌های مشاهده‌شده در مغز تطابق دارد. این نتایج حتی با شواهد بسیار گسترده‌تر درباره‌ی

کارکردی تشدید مغناطیسی «fMRI) حجم وسیع مشاهدات فعالیت‌های مغز در آزمایشگاه را توضیح می‌دهد. در fMRI، که روشی جدید برای تصویربرداری از مغز است، فعالیت‌های عصبی با آشکارسازی تغییرات در شارش خون مشاهده می‌شود. به این منظور کمیتی با نام سیگنال وابسته به میزان اکسیژن خون (BOLD)^{۱۸} اندازه‌گیری می‌شود. دقت اندازه‌گیری این کمیت 1mm³ و توان تفکیک زمانی آن در حد چند ثانیه است. اگرچه فعالیت‌های عصبی چند مرتبه‌ی بزرگی سریع‌تر هستند و جزئیات فضایی ظریف‌تر از این دارند (تا حد میکرون) با پژوهش‌های fMRI نکته‌ی مهمی مشاهده شده است: مغز انسان در حالت استراحت، سازمان‌یافتگی زمانی-مکانی بزرگ‌مقیاسی از خود بروز می‌دهد به این صورت که مغز به شبکه‌های کارکردی متمایز تقسیم می‌شود. این شبکه‌ها که به شبکه‌های حالت استراحت (RSN)^{۱۹} [۷] معروف شده‌اند و در مغز کسانی مشاهده می‌شوند که هیچ کار شناختی یا زبانی یا حرکتی انجام نمی‌دهند، به این شکل مشخص می‌شوند که افت‌وخیزهای فعالیت نوروها در هر شبکه هم‌بسته است. این نکته را هم‌زمان بودن افت‌وخیزهای سیگنال BOLD



شکل ۱: (ستون چپ) تصویربرداری کارکردی با تشدید مغناطیسی (fMRI) نشان می‌دهد که مغز در حالت استراحت سازمان می‌یابد و به ناحیه‌های متعددی تقسیم می‌شود که در آنها افت‌وخیز فعالیت‌های مغز هم‌بسته است. این ناحیه‌ها شبکه‌های حالت استراحت نامیده می‌شوند (RSN). از بالا به پایین: RSN‌های بینایی میانی (VisM)، بینایی جانبی (VisL)، شنوایی (Aud) و حسی-حرکتی (SM).

(ستون‌های سمت راست) نتایج کار هامیوویچی و همکاران [۱] که نشان می‌دهد اگر پارامترهای مدلی ساده را طوری تنظیم کرد که مدل (در T_c) در حالت بحرانی قرار گیرد می‌توان ویژگی‌های آماری RSN را بازساخت.

مشاهده‌ی واپاشی بسیار کمیاب در آشکارساز CMS آزمایش CERN

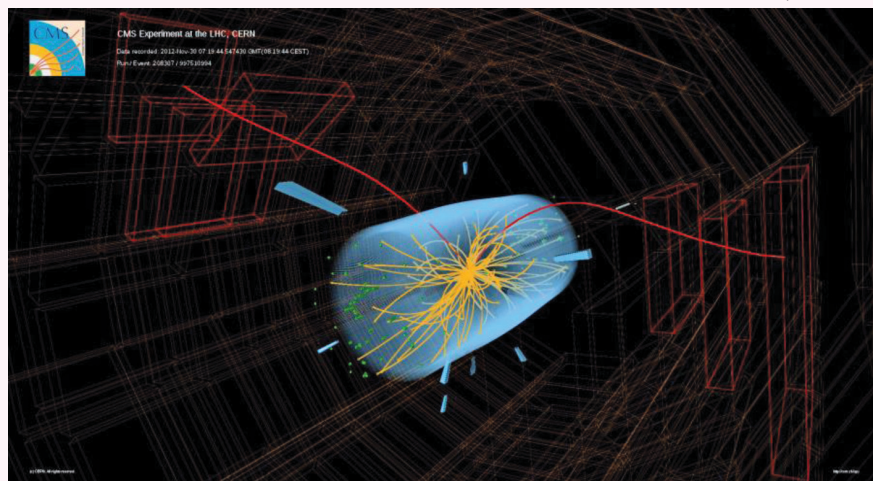
برای آهنگ این واپاشی $(3/6 \pm 0/3) \times 10^{-9}$ است در نتیجه آن چه مشاهده شده مدل استاندارد را تأیید می‌کند. بر اساس این قدر آماری احتمال این که آن چه مشاهده شده برخاسته از افت‌وخیزهای کاتوره‌ای پس‌زمینه باشد حدود ۱ در ۱۰۰۰۰ است.

در جستجوی پدیده‌ای نو

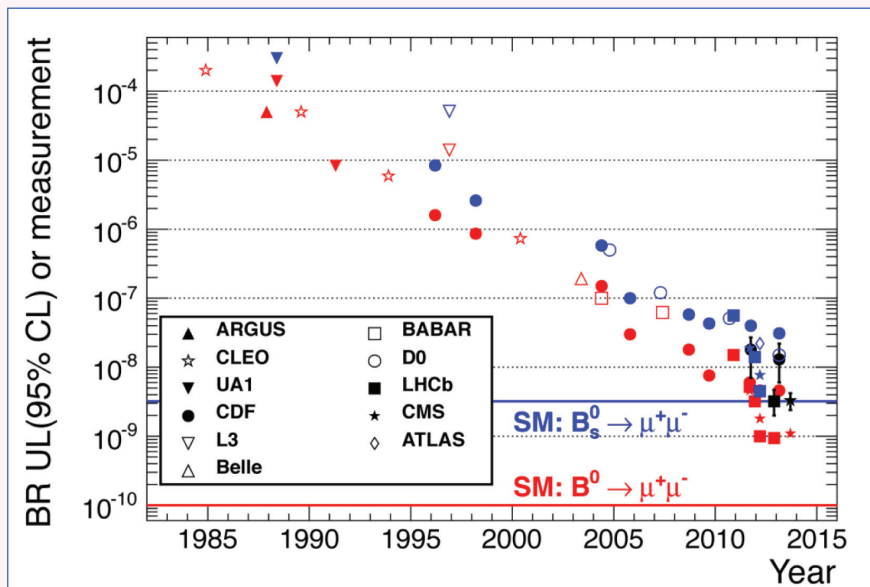
با وجود پیش‌بینی‌های دقیق می‌دانیم که مدل استاندارد فیزیک ذرات کامل نیست: ماده تاریک (که در مشاهدات نجومی وجودش به‌اثبات رسیده) و فزونی ماده بر پادماده در عالم را توضیح نمی‌دهد.

پس از انتظاری ۲۵ ساله واپاشی مزون B_s به زوج میوتون در آشکارساز CMS مشاهده شد. این خبر روز جمعه ۱۹ ژوئیه ۲۰۱۳ در کنفرانس دوسالانه‌ی EPS-HEP در استکهلم، سوئد اعلام شد. از هر یک میلیارد مزون B_s که در اثر برخورد پروتون‌های LHC ساخته می‌شود تنها واپاشی سه مزون انتظار می‌رود. هر مزون به دو میوتون و امی‌پاشد که ذره‌ای مشابه الکترون اما سنگین‌تر است.

آهنگ واپاشی این مزون بر اساس مشاهدات CMS، با قدر آماری $4/3$ انحراف معیار برابر است با $10^{-9} \times 2/0^{+1/0}_{-0/9}$. پیش‌بینی مدل استاندارد



شکل ۱: رویداد نامزد واپاشی $B_s \rightarrow \mu\mu$ در آشکارساز CMS که در سال ۲۰۱۲ در برخوردهای پروتون با پروتون با انرژی ۸ ترالکترون ولت ثبت شده است.



شکل ۲: تاریخچه‌ی جستجو برای B^0 و B^+ در برخوردهای کنونی و گذشته که نشان‌دهنده‌ی چهار مرتبه‌ی بزرگی بهبود در دقت اندازه‌گیری است.

مراجع:

1. A. Haimovici, E. Tagliazucchi, P. Balenzuela, and D. R. Chialvo, "Brain Organization into Resting State Networks Emerges at Criticality on a Model of the Human Connectome," Phys. Rev. Lett. 110, 178101 (2013).
2. J. M. Beggs and D. Plenz, "Neuronal Avalanches in Neocortical Circuits," J. Neurosci. 23, 11167 (2003).
3. D. Plenz, "Neuronal Avalanches and Coherence Potentials," Eur. Phys. J. Special Topics 205, 259 (2012).
4. J. M. Palva, A. Zhigalov, J. Hirvonen, O. Korhonen, K. Linkenkaer-Hansen, and S. Palva, "Neuronal Long-Range Temporal Correlations and Avalanche Dynamics are Correlated with Behavioral Scaling Laws," Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 110, 3585 (2013).
5. E. Tagliazucchi, P. Balenzuela, D. Fraiman, and D. R. Chialvo, "Criticality in Large-Scale Brain fMRI Dynamics Unveiled by a Novel Point Process Analysis," Front. Physiol. 3, (2012).
6. W. L. Shew and D. Plenz, "The Functional Benefits of Criticality in the Cortex," Neuroscientist 19, 88 (2013).
7. M. D. Fox and M. E. Raichle, "Spontaneous Fluctuations in Brain Activity Observed with Functional Magnetic Resonance Imaging," Nature Rev. Neurosci. 8, 700 (2007).
8. A. Margolina, H.J. Hermann, and D. Stauffer, "Size of Largest and Second Largest Cluster in Random Percolation," Phys. Lett. A 93, 73 (1982).
9. O. Shriki, J. Alstott, F. Carver, T. Holroyd, R. N. A. Henson, J. Smith, R. Coppola, E. Bullmore, and D. Plenz "Neuronal Avalanches in the Resting MEG of the Human Brain," J. Neurosci. 33, 7079 (2013).
10. S. Pajevic and D. Plenz, "The Organization of Strong Links in Complex Networks," Nature Phys. 8, 429 (2012).

زیرنویس:

1. neuroscience
2. Human Connectum Project
3. Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies
4. Human Brain Project
5. Brainnetome
6. collective phenomena
7. neuronal avalanche
8. anomalous
9. functional Magnetic Resonance Imaging
10. blood-oxygenation-level dependent signal
11. Resting State Network
12. cortex
13. fiber tracts
14. quiescent
15. excited
16. refractory
17. percolation
18. magneto-encephalography
19. in vivo
20. in vitro
21. Diffusion Spectrum Imaging/Diffusion Tensor Imaging
22. criticality