

Functional network macroscopes for probing past and present Earth system dynamics - Complex hierarchical interactions, tipping points, and beyond

Jonathan Donges

Abstract

The Earth, as viewed from a physicist's perspective, is a dynamical system of great complexity. The contemporary presence and ever-increasing magnitude of anthropogenic perturbations, such as greenhouse gas emissions and large-scale land-use changes, call for a detailed understanding of critical subsystems that can exhibit abrupt qualitative change induced by small shifts in some control parameter (tipping elements). In this context, the complex interdependency structure between tipping elements is of major interest. (i) Complimenting and (ii) connecting research techniques and results concerning the detailed processes at work in the Earth system's subdomains (e.g., the atmosphere, hydrosphere, lithosphere, or anthroposphere), the theory of complex networks provides the concepts and methods needed for a holistic and data-driven approach to Earth system analysis. Functional complex networks serving as *macroscopes*, scientific instruments that condense instead of magnify information, are either inferred from observational data and model runs or constructed on the basis of theoretical considerations. Representing statistical interdependencies or causal interactions between objects (e.g., Earth system subdomains, processes, or locations), functional complex networks are conceptually well-suited for naturally addressing some of the fundamental questions of Earth system analysis concerning, among others, major dynamical patterns, teleconnections, and feedback loops in the planetary machinery, as well as critical elements such as thresholds, bottlenecks, and switches.

The first part of this thesis offers an introduction to the basic concepts of choice: complex network theory and network-based analysis of time series data. Specifically, novel theoretical contributions to both fields are reported, which are applicable to the study of general complex network-structured systems found in nature, society, and technology. Regarding complex network theory, these include consistent frameworks for analyzing the topology of (i) general *networks of interacting networks* and (ii) *networks with vertices of heterogeneously distributed weights, size, or importance*, as well as (iii) an *analytical theory for describing the structure of spatial networks*. In the realm of time series analysis, (i) *recurrence network analysis* is put forward as a conceptually simple, but versatile, nonlinear technique for the study of single, but possibly multivariate time series, that is well-founded in classical mechanics, as well as in dynamical systems and graph theory. (ii) *Coupled climate networks* are introduced as an exploratory tool of data analysis for mapping and quantitatively characterizing the intricate statistical interdependency structure within and between several fields of time series.

The novel concepts and techniques developed in the first part are motivated by and designed for their application to real-world problems and data in the context of Earth system analysis. Consequently, the second part of this dissertation focusses on investigating tipping elements and their interactions, tipping points, and regional vulnerability. Recurrence network analysis is

employed to robustly detect dynamical transitions or tipping points in synthetic and paleoclimate data. This reveals a possible influence of large-scale shifts in Plio-Pleistocene African climate variability on events in human evolution, i.e., an interaction of climatic and biological tipping points. Finally, coupled climate networks yield insights into the atmosphere's general circulation structure and allow to quantify regional centrality and vulnerability with respect to interactions between disparate parts of the Earth system.

Zusammenfassung

Vom Standpunkt des Physikers aus gesehen, ist die Erde als ein dynamisches System von großer Komplexität zu betrachten. Das gegenwärtig stets zunehmende Ausmaß anthropogener Einflüsse wie Treibhausgasemissionen und großskaliger Landnutzungsänderungen erfordert ein detailliertes Verständnis kritischer Subsysteme, die auf kleine Variationen von Kontrollparametern mit abrupten, qualitativen Veränderungen in Zustand und Dynamik reagieren können (Kippelemente). Insbesondere ist dabei die komplexe Wechselwirkungsstruktur zwischen einzelnen Kippelementen von großem Interesse. Die Theorie komplexer Netzwerke stellt die Konzepte und Methoden für solch einen holistischen und datengetriebenen Zugang zur Erdsystemanalyse zur Verfügung. Der auf Ideen aus der Graphentheorie und statistischen Physik basierende Netzwerkansatz kann so (i) zur Ergänzung und (ii) zur Zusammenführung von Forschungsergebnissen zu detaillierten Vorgängen in den verschiedenen Sphären des Erdsystems, z.B. der Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre und Anthroposphäre, beitragen. Funktionale, komplexe Netzwerke können als Makroskope aufgefasst werden, die Information kondensieren anstatt immer weitere Details zu liefern. Sie werden aus Beobachtungs-, Reanalyse- und Modelldaten abgeleitet oder aufgrund theoretischer Überlegungen konstruiert. Indem sie statistische Zusammenhänge oder kausale Wirkbeziehungen zwischen der Dynamik gewisser Objekte, z.B. verschiedenen Sphären des Erdsystems, Prozessen oder geographischen Orten darstellen, bieten funktionale komplexe Netzwerke einen natürlichen Ansatz zur Bearbeitung fundamentaler Probleme der Erdsystemanalyse. Dazu gehören Fragen nach dominanten, dynamischen Mustern, Telekonnektionen und Rückkopplungsschleifen in der planetaren Maschinerie, sowie nach kritischen Elementen wie Schwellwerten, sog. Flaschenhälsen und Schaltern im Erdsystem.

Der erste Teil dieser Dissertation behandelt die ihr zugrundeliegenden Konzepte und Methoden: Die Theorie komplexer Netzwerke, ebenso wie die netzwerkbasierte Zeitreihenanalyse. Neben einer Einführung werden insbesondere neue theoretische Beiträge zu beiden Forschungsfeldern vorgestellt, die auf allgemeine, in Natur, Gesellschaft und Technologie vorkommende Systeme mit Netzwerkstruktur anwendbar sind. Die Beiträge zur Theorie komplexer Netzwerke beinhalten Sätze konsistenter Maße und Modelle zur Analyse der Topologie (i) allgemeiner *Netzwerke von wechselwirkenden Netzwerken* und (ii) *Netzwerken mit ungleichmäßig verteilten Knotengewichten, -größen oder -wichtigkeiten*, sowie (iii) eine *analytische Theorie zur Beschreibung der speziellen Eigenschaften von räumlich eingebetteten Netzwerken*. Im Bereich der Zeitreihenanalyse werden (i) *Rekurrenznetzwerke* als eine konzeptionell einfache, vielseitige und nichtlineare Methode zum Studium multivariater Zeitreihen vorgestellt, die konzeptionell in der klassischen Mechanik, der Theorie dynamischer Systeme und der Graphentheorie begründet ist. (ii) *Gekoppelte Klimanetzwerke* werden als ein exploratives Werkzeug der Datenanalyse zur Abbildung und quantitativen Charakterisierung der komplexen statistischen Interdependenzstruktur innerhalb und zwischen verschiedenen Feldern von Zeitreihen eingeführt.

Die Entwicklung der im ersten Teil der Arbeit vorgestellten, neuartigen Konzepte und Methoden war durch ihre Anwendung auf offene Forschungsfragen und Daten im Kontext der Erdsystemanalyse motiviert. So konzentriert sich der zweite Teil dieser Dissertation auf die Untersuchung von Kippelementen und ihren Wechselwirkungen, sowie von Kippunkten und regionaler Vulnerabilität. Zunächst werden Rekurrenznetzwerke zur robusten Detektion von dynamischen Übergängen oder Kippunkten in synthetischen und paläoklimatologischen

Zeitreihendaten eingesetzt. Diese Analyse deutet auf mögliche Zusammenhänge zwischen großskaligen Veränderungen der afrikanischen Klimadynamik während des Plio-Pleistozäns und Ereignissen in der Menschheitsevolution, in anderen Worten auf eine Wechselwirkung von klimatischen und biologischen Kippunkten, hin. Schließlich erlauben gekoppelte Klimanetzwerke Einblicke in die Struktur der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre und ermöglichen weiterhin, regionale Zentralität und Vulnerabilität im Hinblick auf Wirkbeziehungen zwischen verschiedenen Komponenten des Erdsystems zu quantifizieren.