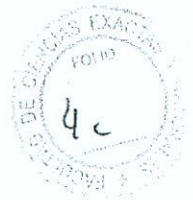


CD - 0764 - 17

F 2017

9



Nolocalidad y Contextualidad: Fundamentos y aplicaciones

Dr. Ana Belén Sainz

La nlocalidad es uno de los aspectos más fundamentales y contraintuitivos de la física cuántica. El fenómeno demuestra que ciertas suposiciones sobre la Naturaleza, que parecen obvias y naturales (usualmente denominadas “localidad” y “realismo”), son incompatibles con la mecánica cuántica. La teoría formal que explica el fenómeno fue iniciada de manera rigurosa por J. Bell en 1964 [1] y desde entonces varios experimentos lo han corroborado [2-5], siendo el 2015 el año en que los resultados definitivos fueron publicados [6-8].

Más allá de su relevancia fundamental y filosófica, la nlocalidad juega un rol fundamental en la información cuántica, más precisamente en protocolos de tareas “device independent”. En otras palabras, la nlocalidad es el recurso que permite hacer “distribución cuántica de claves” [9,10] y “amplificación de aleatoriedad” [11,12], entre otras, de manera segura en escenarios criptográficos.

Contextualidad es un fenómeno similar a la nlocalidad, en el sentido que desafía nuestra intuición clásica sobre los resultados obtenibles al hacer mediciones conjuntas en un sistema físico. Este fenómeno fue descubierto por Kochen y Specker en 1967 [13], y desde entonces diferentes aspectos del mismo han sido desarrollados en varios formalismos [14,15,16]. El estudio de las posibles aplicaciones de la contextualidad no fue profundizado sino hasta recientemente, cuando se descubrió que es un recurso necesario para desarrollar computaciones cuánticas [17, 18].

Este curso está destinado a estudiantes del doctorado en física o del último año de la licenciatura. Nociones básicas de mecánica cuántica son requeridas, aunque en la primera unidad los conceptos necesarios serán revisados.

El objetivo del curso es presentar los fenómenos de nlocalidad y contextualidad, sus aplicaciones y conceptos básicos sobre la historia experimental. Parte del curso se destinará a explorar estos fenómenos “mas allá de la mecánica cuántica”, es decir, sin asumir que la física cuántica es la teoría que describe a la Naturaleza. A continuación, presento un temario tentativo por clase, de aproximadamente tres horas cada una.

Unidad 1: Nlocalidad de Bell – correlaciones

En esta unidad se presentan los escenarios de Bell y las condiciones que los sistemas clásicos satisfacen. Las hipótesis de Bell son presentadas en terminos de “causalidad local”, y se derivan las desigualdades de Bell. El ejemplo que se trabaja en esta unidad es el escenario de Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH).

Luego se introducen (recuerdan) algunas nociones básicas de mecánica cuántica, como espacios de Hilbert, estados puros/mezcla/entrelazados, y mediciones. Las correlaciones cuánticas son presentadas (junto al dilation theorem), y así ejemplos de violaciones de desigualdades de Bell.

Al final se comenta sobre diferentes nociones de correlaciones cuánticas y se menciona el problema de Tsirelson.

Unidad 2: Nlocalidad cuántica

En esta unidad se presentan resultados sobre el fenómeno de nlocalidad en sistemas cuánticos. Se demuestra que no todo estado entrelazado exhibe correlaciones nlocales, pero que todo estado puro entrelazado es nlocal. Se presenta a su vez la activación de la nlocalidad y los “testigos de dimensión”.

Luego se presenta una breve recopilación de experimentos realizados, desde los pioneros de Aspect en los '80, hasta los definitivos del 2015, haciendo hincapié en los tecnicismos (loopholes) que fueron superados.

Unidad 3: Correlaciones más allá de la mecánica cuántica: la matemática de la no-localidad

En esta unidad se presenta la noción de correlaciones más allá de lo que la mecánica cuántica puede explicar. Primero se presenta la pregunta de Popescu y Rohrlich, y se introducen las cajas "PR". Luego, se presenta el formalismo para estudiar correlaciones no-signalling, y así el politopo local, el conjunto cuántico, y la interpretación geométrica de las desigualdades de Bell. Al final se mencionan las posibles consecuencias (físicas y en teoría de la información) de la existencia de estas correlaciones más poderosas que las cuánticas.

Unidad 4: Correlaciones casi-cuánticas y escenarios de Bell multipartitos

En esta unidad se presenta el problema de caracterizar la forma del conjunto de correlaciones cuánticas, en particular su borde. Se presenta primero la jerarquía de relajaciones propuesta por Navascués, Pironio y Acín (NPA), y luego los principios físicos y de teoría de la información que intentan recuperar el borde. Se introduce entonces el conjunto de correlaciones casi-cuánticas, y se discute por un lado su viabilidad para describir la naturaleza, y por el otro las posibles limitaciones de este enfoque de investigación.

Finalmente se generalizan los escenarios de Bell a situaciones multipartitas. Se presentan las particularidades de estos casos, como ser la monogamia de las correlaciones y las diferentes clases de no-localidad, haciendo hincapié en las multipartitas-genuinas y desigualdades de Svetlichny.

Unidad 5: Contextualidad

En esta unidad se introduce contextualidad mediante el teorema de Kochen-Specker y el cuadrado mágico de Mermin, y se presentan las desigualdades que evidencian contextualidad. Se menciona la conexión cualitativa con escenarios de Bell, y se reinterpretan los experimentos de no-localidad como de contextualidad. Se presentan otras propuestas experimentales y se discuten sus limitaciones. Al final se presentan las bases del formalismo de Abramsky y Brandenburger, y se desarrolla el enfoque de Cabello-Severini-Winter (CSW).

Unidad 6: Un formalismo de Teoría de Hypergrafos para Contextualidad

En esta unidad se presenta el formalismo de hypergrafos de Fritz *et al.* Se introducen el concepto de modelos probabilísticos, entre ellos los clásicos (no-contextuales), cuánticos y generales, los politopos y conjuntos de correlaciones y la interpretación geométrica de las desigualdades de contextualidad. Se desarrolla luego la correcta representación de escenarios de Bell en el formalismo de contextualidad, y se presenta el problema de caracterizar el conjunto de modelos probabilísticos cuánticos. Luego se introduce una jerarquía de relajaciones del conjunto cuántico y los modelos probabilísticos casi-cuánticos.

Finalmente se hace la conexión con teoría de grafos, mostrando como diferentes graph-invariants caracterizan ciertos conjuntos de modelos probabilísticos.

Unidad 7: Herramientas para el estudio de no-localidad y contextualidad – escenarios con muchas partes



La primer parte de esta unidad está enfocada a presentar las herramientas computacionales para estudiar correlaciones. A través de ejemplos, se muestran scripts para calcular puntos extremos de polytopos, desigualdades de Bell/contextualidad, y la caracterización de las correlaciones casi-cuánticas mediante programas semidefinidos (SDP).

Luego se presenta el problema de la “intractabilidad de sistemas con escenarios grandes”, y se mencionan propuestas (teóricas y experimentales) para detectar no-localidad en many-body systems.

Unidad 8: Aplicaciones de estos fenómenos no-clásicos y problemas abiertos

En esta unidad se presentan algunas aplicaciones de los fenómenos de no-localidad y contextualidad. Primero se discute la necesidad de protocolos “device-independent” en tareas criptográficas, y se presentan la distribución cuántica de claves device-independent, y la amplificación y expansión de aleatoriedad de manera device-independent.

Luego se presentan los últimos resultados en contextualidad, sobre su rol en la distilación de “estados mágicos” (que habilitan computaciones cuánticas universales a prueba de errores) y como recurso necesario en el paradigma de computación cuántica basada en mediciones.

Finalmente se presentarán y discutirán problemas abiertos, orientados según los intereses de los asistentes.

La literatura para este curso:

- Quantum Computation and Quantum Information, Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, Cambridge University Press; 1 edition (2000).
- Lecture Notes for Physics 229: Quantum Information and Computation. John Preskill, Caltech, Set 1998. <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph219/>
- Nicolas Brunner, Daniel Cavalcanti, Stefano Pironio, Valerio Scarani, Stephanie Wehner. Bell nonlocality. Rev. Mod. Phys. 86: 419, 2014.

El material más específico será revisado de artículos científicos.

Referencias:

- [1] John S. Bell. On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics*, 1:195–200, 1964.
- [2] Stuart J. Freedman and John F. Clauser. Experimental test of local hidden-variable theories. *Phys. Rev. Lett.*, 28:938–941, Apr 1972.
- [3] Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gérard Roger. Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities. *Phys. Rev. Lett.*, 49(2):91–94, Jul 1982.
- [4] M. A. Rowe, D. Kielpinski, V. Meyer, C. A. Sackett, W. M. Itano, C. Monroe, and D. J. Wineland. Experimental violation of a Bell’s inequality with efficient detection. *Nature*, 409:791, 2001.
- [5] D. N. Matsukevich, P. Maunz, D. L. Moehring, S. Olmschenk, and C. Monroe. Bell inequality violation with two remote atomic qubits. *Phys. Rev. Lett.*, 100:150404, Apr 2008.
- [6] B. Hensen et al. Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature* 526:682–686, 29 October 2015.
- [7] M. Giustina et al. Significant-loophole-free test of Bell’s theorem with entangled photons. *Phys. Rev. Lett.* 115:250401, 2015.
- [8] L. K. Shalm et al. A strong loophole-free test of local realism. *Phys. Rev. Lett.* 115:250402, 2015.

-
- [9] Antonio Acín, Nicolas Brunner, Nicolas Gisin, Serge Massar, Stefano Pironio, and Valerio Scarani. Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks. *Phys. Rev. Lett.*, 98:230501, Jun 2007.
- [10] Umesh Vazirani and Thomas Vidick. Fully device independent quantum key distribution. *Phys. Rev. Lett.* 113:140501, 2014.
- [11] S. Pironio et al. Random numbers certified by Bell's theorem. *Nature*, 464:1021, 2010.
- [12] Umesh Vazirani and Thomas Vidick. Certifiable quantum dice: or, true random number generation secure against quantum adversaries. In *Proceedings of the 44th symposium on Theory of Computing*, pages 61–76. ACM, 2012.
- [13] Simon Kochen and E. P. Specker. The problem of hidden variables in quantum mechanics. *J. Math. Mech.*, 17:59–87, 1967.
- [14] Samson Abramsky and Adam Brandenburger. The sheaf-theoretic structure of non-locality and contextuality. *New Journal of Physics*, 13(11):113036, 2011.
- [15] A. Cabello, S. Severini, and A. Winter. (Non-)Contextuality of Physical Theories as an Axiom. October 2010. Preprint at <http://arXiv.org/abs/1010.2163>.
- [16] Antonio Acín, Tobias Fritz, Anthony Leverrier, Ana Belén Sainz. A Combinatorial Approach to Nonlocality and Contextuality. *Comm. Math. Phys.* 334(2):533-628, 2015.
- [17] M. Howard, J. Wallman, V. Veitch, and J. Emerson. Contextuality supplies the ‘magic’ for quantum computation. *Nature* 510:351, 2014.
- [18] R. Raussendorf. Contextuality in measurement-based quantum computation. *Phys. Rev. A* 88:022322, 2013.