

ENTREVISTA A

CRISTIANO NISOLI

EXPLORANDO EL FASCINANTE MUNDO DE LOS HIELOS DE ESPÍN ARTIFICIALES



“Si alguien quiere nadar con los tiburones, debería haberse ido a Wall Street. Si eliges la ciencia, deberías ser una persona decente. La competencia es buena, pero la ciencia debe ser, en su mayoría, colaborativa. La ciencia es un regalo increíble, y debemos asegurarnos de ser dignos de él.”

¿Se imaginan un laboratorio científico y tecnológico que abarque una superficie de aproximadamente 100 km², formado por 900 instalaciones individuales, 13 instalaciones nucleares, y 8,4 millones de pies cuadrados en edificios? Pues bien, el Laboratorio Nacional de Los Álamos (LANL, por sus siglas en inglés) en Los Álamos Estados Unidos reúne estas impresionantes características. Para dimensionar el tamaño de este laboratorio, podemos mencionar que Puente Alto tiene aproximadamente 80 km² de superficie mientras que Maipú abarca 135 km², por lo que LANL sería de un tamaño similar a estas comunas de Santiago. ¿Tienes curiosidad por saber más? En IAD tuvimos la oportunidad de compartir con un científico staff principal de este laboratorio, nos referimos al Doctor Cristiano Nisoli, destacado físico teórico y Científico de Planta en el Laboratorio Nacional de Los Álamos desde el año 2008. El Prof. Nisoli ha explorado el mundo de los sistemas magnéticos artificiales frustrados, conocidos como hielos de espín artificiales. Su trabajo no se queda solo en la teoría: su equipo ha propuesto diversas geometrías innovadoras que han sido materializadas a escala nanométrica utilizando materiales magnéticos, coloides atrapados e incluso skyrmions en cristales líquidos.

¿La gran idea? Descubrir comportamientos emergentes exóticos manipulando la dinámica colectiva de variables binarias, como los momentos magnéticos de nanoislas o incluso qubits. Pero no se ha limitado solo al nanomagnetismo; su investigación abarca cristales líquidos, física coloidal y metamateriales mecánicos, ampliando los límites de nuestro conocimiento. Algunos de sus trabajos más emocionantes incluyen orden impulsado por entropía,

transiciones topológicas cinéticas y realizaciones en quantum annealers (recocidos cuánticos), descubrimientos revolucionarios que están causando impacto en la física.

Recientemente el **Dr. Nisoli** estuvo en Chile, invitado por la Universidad de la Frontera (UFRO) y por la Universidad Central (UCEN) realizando charlas plenarias de su trabajo científico en nuestra institución y en el Simposio Nacional de Física que se realizó en la UFRO a fines del 2024. Al respecto le consultamos a Cristiano, sobre esta visita a nuestro país:

¿Cuál es tu opinión sobre nuestros laboratorios e instalaciones en la Universidad Central, CEDENNA y la Universidad La Frontera?

Me quedé muy impresionado tanto por el campus, las instalaciones, el equipamiento de última tecnología y, por supuesto, el cuerpo académico.

¿Cómo fue tu experiencia participando en el Simposio Chileno de Física?

Disfruté cada momento. Para mí fue un gran honor haber participado en la sesión plenaria de la ceremonia de apertura. La vista desde el escenario era increíble: cientos de jóvenes físicos, muchos estudiantes y postdoctorantes. Tuve conversaciones muy interesantes con profesores, pero especialmente con los estudiantes.

¿Qué opinas sobre los estudiantes de física chilenos? ¿Tuviste la oportunidad de compartir con ellos?

Siempre que doy una charla general a una audiencia no especializada, mi objetivo principal son los estudiantes. Esto se debe a que 1) ellos son el futuro y 2) generalmente son los más interesados en lo que hacemos. Creo que mencioné esto al comienzo de mi charla. Como resultado, literalmente docenas de estudiantes se acercaron a hablar conmigo después de la charla. De hecho, la mayor parte de mi tiempo en la conferencia lo pasé conversando con estudiantes. Me impresionó mucho la calidad y preparación de estos estudiantes. Muchos me hicieron preguntas sobre cómo hacer un doctorado en EE.UU., oportunidades de verano en LANL, etc., pero también preguntas más técnicas, lo que dio lugar a conversaciones dinámicas y estimulantes.

Cristiano, aunque el LANL fue fundado con un propósito militar para el desarrollo de armas nucleares, hoy en día el laboratorio no solo lleva a cabo investigaciones con fines militares, sino que también desarrolla investigaciones en Sistemas Naturales y de Ingeniería Complejos con un propósito no militar.

¿Podrías contarnos cuáles son los principales enfoques de investigación que se están llevando a cabo actualmente en el LANL?

Gran parte de la investigación en LANL sigue concentrada en la misión de defensa, pero también se realiza todo tipo de investigación abierta. Desde todas las ramas de la física, tanto teórica como experimental, hasta biología, química, ciencias de la Tierra, matemáticas, computación de alto rendimiento, epidemiología, estudios climáticos, entre muchas otras áreas.

Es como un gran Disneyland de la Ciencia. Es difícil encontrar algo que no se investigue en LANL. El lugar es enorme. También es un entorno "plano", lo que significa que puedes hablar con cualquiera, lo que facilita la construcción de equipos. Todos hablamos, más o menos, el mismo lenguaje científico.

¿En qué te enfocas actualmente en tu trabajo y cuáles son algunos de los proyectos más emocionantes en los que estás involucrado?

Recientemente, me convertí en co-investigador principal en un gran proyecto (de aproximadamente 6 millones de dólares) sobre quantum annealers (recocidos cuánticos), donde ayudo a definir la dirección teórica. Esto me ha obligado a desarrollar algunas habilidades de gestión. Todo el equipo que manejo es muy joven: postdoctorantes, algunos con maestría; creo que el promedio de edad está por debajo de los 30 años. Hay físicos, científicos computacionales, matemáticos... todos son jóvenes brillantes y estoy disfrutando mucho trabajar con ellos.

Este trabajo también me ha llevado a explorar más el campo de la computación cuántica. Me he dado cuenta de que LANL ha desarrollado, de manera casi mágica, una confluencia única de excelencia en este campo: desde los fundamentos de la mecánica cuántica, la optimización binaria y los algoritmos, hasta la simulación analógica. Incluso tenemos un grupo experimental que construye máquinas cuánticas con átomos de Rydberg.

Esta situación me ha convencido de que debemos encontrar una manera de unificar y racionalizar estos esfuerzos antes de que esta sinergia única se disipe. Junto con algunos colegas, estamos proponiendo a la administración, maneras de lograrlo a la administración.

También sigo colaborando con mis colaboradores habituales en Princeton, la Universidad de Tel Aviv, Barcelona, D-Wave, la Universidad de Colorado Boulder, China, entre otros. He sumado nuevos colaboradores en Cardiff, el Centro de Nanotecnología Integrada en LANL y, por supuesto, posibles nuevos colaboradores en Chile.

¿Qué consejo le darías a alguien que está comenzando una carrera en tecnología hoy en día? ¿Hay alguna habilidad o campo en el que recomendarías enfocarse?

Siempre he sentido que la profecía no es uno de mis talentos más desarrollados. Me doy cuenta de que muchas cosas han cambiado, y muy rápido, desde que fui estudiante de posgrado hace más de 25 años. No soy particularmente útil para responder estas preguntas porque, para mí, siempre ha sido una cuestión de expresar creatividad.

He visto muchas modas venir y desaparecer, y nunca me subí al carro de ninguna. Siempre he sido fiel a mí mismo: tenía ideas y quería una forma de expresarlas, y, para bien o para mal, se me dio esa oportunidad. No me molestaría demasiado si alguien dijera que mi trabajo no es relevante—no estaría de acuerdo, pero no me preocuparía demasiado. Sin embargo, lo que no podrían decir es que mi trabajo es incremental, derivativo o falto de originalidad.

Veo la ciencia de una manera similar al arte. No soy muy utilitarista, en muchos sentidos soy premoderno o antimoderno, por lo que quizás no soy la mejor persona para responder estas preguntas.

También entendí desde el principio que la ciencia es un entorno increíblemente competitivo. Aunque requiere altos talentos intelectuales y muchísimo trabajo, no paga tan bien como otras profesiones menos exigentes. Para mí, siempre ha sido algo que se hace por vocación. Y eso implica responsabilidad.

Un científico debe verse a sí mismo como perteneciente a una especie de aristocracia del espíritu. Y con ello viene el "noblesse oblige": un científico debe mantenerse en altos estándares morales, en la forma en que trata a los estudiantes y científicos jóvenes, en cómo reconoce y promueve a sus colaboradores, etc. Odio ver campos donde la gente está constantemente en competencia destructiva. ¿Cuál es el punto de eso? Si alguien quiere nadar con los tiburones, debería haberse ido a Wall Street. Si eliges la ciencia, deberías ser una persona decente. La competencia es buena, pero la ciencia debe ser, en su mayoría, colaborativa. La ciencia es un regalo increíble, y debemos asegurarnos de ser dignos de él.

En cuanto a habilidades, no podría decirlo en términos generales, pero sí puedo decirte lo que busco en las personas que contrato: Quiero que sean amplios en conocimiento, pero también sólidos en los fundamentos de la física. Me interesa ver una combinación única de talentos que se sinergicen entre sí y creen una personalidad de investigación interesante. Valoro mucho la creatividad.

Creo que la revolución de la IA podría ser, en general, positiva, porque pondrá en valor lo que la IA no puede hacer. En EE.UU., siento que el sistema educativo ha estado diseñado para seleccionar exactamente el tipo de inteligencia (reconocimiento de patrones, repetición rápida de tareas) que, tristemente, las máquinas pueden imitar. Tal vez resulte que los países latinos, que han seguido un camino más creativo y libre, terminen desarrollando habilidades menos reemplazables.

¿Cuál crees que será la próxima "gran innovación" en tecnología a la que la mayoría de la gente aún no presta atención?

Si lo supiera, ¡me haría multimillonario!

¿Qué fue lo que inicialmente inspiró tu interés en los materiales artificiales y cómo ha evolucionado el campo desde que comenzaste tu investigación?

En realidad, todo comenzó de manera bastante casual. Cuando era estudiante de doctorado, en un picnic, mi asesor, Vin Crespi, me presentó a Peter Schiffer, otro profesor que en ese momento tenía acceso a máquinas para fabricar estos nanomagnetos mediante litografía. Así que todo surgió por pura serendipia.

Antes de eso, había hecho una investigación que mostraba que si colocabas imanes de cierta manera, se organizaban siguiendo las mismas leyes matemáticas que se encuentran en la botánica, así que ya estaba explorando sistemas artificiales magnéticos a escala macroscópica con comportamientos interesantes. Peter ya era muy reconocido por su trabajo en hielo de espín de pirocloro en cristales, desde su época en Bell Labs y más tarde por otros trabajos interesantes en materiales granulares y castillos de arena. Así que la dirección de artificial spin ice (hielo de espín artificial) surgió de manera natural.

Así empezamos, publicamos el primer artículo y terminó en Nature (se publicó el mismo día en que me casé— mejor dicho, en que me volví a casar, pero con la misma mujer, aunque eso es otra historia). Mucha gente estuvo involucrada. Luego propuse una teoría para explicar los resultados, que se publicó en Physical Review Letters (PRL). Seguimos con algunos otros artículos sobre el protocolo (preparábamos las muestras mediante desmagnetización AC), otro PRL sobre teoría... y después me puse a trabajar en otras cosas, como ADN, porque parecía que nadie estaba retomando nuestros resultados.

Luego, en el verano de 2010, nos invitan a un taller en Leeds, organizado por Chris Marrows, sobre artificial spin ice. Ahí descubrimos que varios grupos muy serios llevaban un par de años trabajando en el tema y que tenían resultados bastante interesantes, listos para ser enviados o ya publicados. Ese taller fue transformador y, en cierto sentido, hizo posible el campo. Recuerdo una noche en Leeds, Peter y yo bebiendo sidra fuerte y diciéndonos: "Bueno, supongo que seguimos con esto".

Lo primero que nos preguntamos fue cómo íbamos a competir con esos grupos, porque eran excelentes: de Reino Unido, Suiza, Francia, Alemania, etc. Creo que decidimos enfocarnos en la Física, usando estos materiales para demostrar nuevos fenómenos físicos. Y hasta hoy me he mantenido en esa línea. Otros ven aplicaciones más tecnológicas, como codificación de información, computación más allá de Turing, neuromórfica, etc. Muchas de estas ideas teóricas ahora se están concretando en resultados interesantes. Por ejemplo, han salido trabajos muy buenos del Imperial College sobre el uso de artificial spin ice para reservoir computing, y un grupo en Finlandia logró realizar la propuesta de uno de mis postdocs para una red de Hopfield (su nombre es Saccone, y fue idea completamente suya). Me encantan estos desarrollos, y yo mismo he publicado algunos de los primeros usos para computación, además de demostrar cómo realizar memristores. Pero sigo siendo un físico, haciendo física, y usando estos sistemas para mostrar cosas contraintuitivas, como el orden promovido por la entropía o nuevas transiciones topológicas interesantes.

Debo decir que la entrada de otros grupos en el campo hizo posible nuestra investigación. Por ejemplo, en el PSI desarrollaron versiones superparamagnéticas de artificial spin ice y un método de caracterización PEEM, lo cual ya había sido anticipado en parte por el trabajo de Uppsala, basado en un tipo especial de película delgada en el que eran expertos. Al mismo tiempo, Peter desarrolló la técnica de recocido térmico por debajo del punto de Curie. Estas nuevas metodologías nos permitieron seguir nuevas direcciones teóricas.

Tuve una idea para crear nuevos sistemas degenerados con geometrías innovadoras, cuyo comportamiento exótico no podía observarse sin estas nuevas técnicas. Trabajar con experimentales te obliga a idear cosas que realmente se puedan hacer. Y luego, tienes la satisfacción de ver resultados reales, mediciones concretas. Al final, la física es eso: experimentos y mediciones. No es filosofía. No es que no me guste la filosofía, pero es otra cosa completamente distinta.

¿Podría proporcionar una visión general de los principios clave que rigen el diseño y la funcionalidad de los materiales artificiales?

Estos materiales son frustrados, lo que significa que no todas las restricciones pueden satisfacerse simultáneamente. Como resultado, el estado fundamental es degenerado y generalmente desordenado. A menudo, el número de configuraciones del estado fundamental crece exponencialmente con el tamaño del sistema, lo que implica que hay una entropía a temperatura cero.

Existe en el folclore de la física la idea de que la frustración equivale a degeneración. Sin embargo, no todos los sistemas frustrados tienen un estado fundamental degenerado. No todos los estados fundamentales degenerados tienen entropía extensiva. No todos los estados fundamentales con entropía extensiva son no triviales: algunos presentan una degeneración trivial y no correlacionada. Finalmente, no todo el desorden correlacionado es topológico. Así que la frustración y el desorden pueden ser diseñados y pueden poseer diversas propiedades incorporadas. Eso es lo que hacemos en nuestro trabajo. La manera en que lo hacemos es una combinación de arte y ciencia.

¿Qué distingue a los materiales artificiales de los materiales naturales en términos de sus propiedades y comportamiento?

Por ejemplo, el comportamiento del "hielo de espín" natural solo se observa a temperaturas extremadamente bajas. Sin embargo, en los materiales artificiales podemos diseñar las nanoislas para controlar la temperatura a la que el sistema es activo y muestra su fenomenología, o bajo qué campos responde.

También podemos diseñar sistemas que reproduzcan ciertos comportamientos de los materiales naturales, pero a través de mecanismos distintos. Por ejemplo, el "hielo de espín de Santa Fe" presenta una falta de equilibrio similar a la de los vidrios de espín, aunque estructuralmente está ordenado. El mecanismo por el cual rompería la ergodicidad es topológico. Algo similar sucede con el "hielo de espín tipo Shakti". Hasta donde sé, muchos de los diseños recientes tienen poca o ninguna correspondencia con imanes naturales. Esta línea de investigación también nos ayuda a comprender cómo diseñar imanes con propiedades deseadas para futuras aplicaciones tecnológicas.



¿Cómo defines "metamateriales" y cuáles son algunos de los desarrollos más emocionantes en este campo?

Es una pregunta compleja, pero para mí, los metamateriales son materiales artificiales compuestos por bloques de construcción individuales simples que adquieren su complejidad a partir de su comportamiento colectivo. La idea central es que "el todo es más que la suma de sus partes".

Una de las cosas más interesantes de estos materiales es que desdibujan la línea entre la física y la ingeniería. Podría parecer que se trata principalmente de un problema de ingeniería (y, de hecho, muchos de estos materiales, especialmente los mecánicos, son estudiados en departamentos de ingeniería), pero en realidad, su estudio y desarrollo requieren conocimientos sobre la emergencia de fenómenos colectivos, que es una característica típica de la física. En general, cualquier metamaterial es emocionante porque sustituye la serendipia por el diseño intencionado, permitiendo una planificación desde abajo hacia arriba de propiedades deseadas y, posiblemente, funcionalidades específicas.

¿Podría profundizar en el papel de la modelización computacional en el diseño de materiales artificiales? ¿Cuáles son las mayores limitaciones de los métodos de simulación actuales?

Por lo general, podemos comprender el comportamiento de nuestros diseños sin necesidad de muchas simulaciones, pero en general realizamos simulaciones micromagnéticas para calcular parámetros como las constantes de acoplamiento, y luego usamos simulaciones clásicas de Montecarlo para confirmar nuestra comprensión del diagrama de fases.

Es importante destacar que, en algunos de los materiales más interesantes, el propio material no podrá explorar ergódicamente su diagrama de fases precisamente debido a su diseño. Por ello, también realizamos simulaciones cinéticas.

Las simulaciones actuales han funcionado bastante bien para describir estados de equilibrio, pero no han logrado reproducir los resultados experimentales sobre ruido de espín obtenidos en el Laboratorio Nacional de Los Álamos y el Magnet Lab por el gru-

po de Scott Crooker, utilizando su metodología óptica patentada. Le dije a Scott: "Después de muchos años, has encontrado una manera de analizar estos materiales que ha superado nuestras simulaciones". Se ha convertido en un misterio para nosotros, y Scott y yo hemos conseguido una subvención para intentar venderlo.

¿Cuál es el papel de los materiales artificiales en el desarrollo de tecnologías cuánticas, como la computación cuántica o los sistemas de comunicación cuántica?

Tal vez no nuestros materiales, pero muchas computadoras cuánticas están hechas de arreglos artificiales de, por ejemplo, superconductores o átomos de Rydberg atrapados por láser, etcétera.

¿Qué tan importante es la colaboración interdisciplinaria (por ejemplo, con químicos, ingenieros o biólogos) para el avance del campo de los materiales artificiales?

Es muy importante. He trabajado con muchos perfiles profesionales diferentes. La interdisciplinariedad es clave. También fomenta la creatividad. Las personas curiosas terminan sabiendo muchas cosas.

¿Cuáles son algunas colaboraciones prometedoras o esfuerzos conjuntos de investigación entre la academia y la industria para avanzar en las aplicaciones prácticas de los materiales artificiales?

Con un grupo en otro laboratorio nacional estamos explorando el uso de hielo de espín artificial como máquinas de Ising para optimizar cálculos en clústeres. Es posible que pronto tengamos un proyecto sobre eso. Ese grupo incluye a muchos ingenieros y científicos de la computación. Parte del trabajo que hacemos en recocido cuántico se lleva a cabo en contacto directo con las empresas que los producen. No mencionaré el nombre de la empresa, pero, por ejemplo, propuse un experimento que su máquina aún no puede realizar comercialmente, y están tratando de encontrar una manera de hacerlo. De hecho, tenemos una reunión por Zoom mañana por la mañana para ver si funciona.