La inteligencia artificial abre una nueva ventana al mundo oculto de la materia nuclear

Investigadores del Instituto de Estructura de la Materia del CSIC en España, del Laboratorio de Física Nuclear de Altas Energías del RIKEN Pioneering Research Institute (PRI) en Japón y sus colaboradores internacionales han logrado un descubrimiento revolucionario que aúna la inteligencia artificial y la física nuclear. Mediante la aplicación de técnicas de deep learning a una vasta cantidad de datos de emulsiones nucleares sin examinar del experimento J-PARC E07, el equipo ha identificado, por primera vez en 25 años, un nuevo hipernúcleo doble-Λ. Este hito constituye la primera observación asistida por IA de un núcleo tan exótico, un núcleo atómico que contiene dos quarks extraños. El hallazgo, publicado en *Nature Communications*, representa un avance considerable en la física nuclear experimental y aporta una nueva perspectiva sobre la composición de los núcleos de las estrellas de neutrones, uno de los entornos más extremos del universo.

Toda la materia ordinaria se compone de átomos, cuyos núcleos constan de protones y neutrones. Estas partículas, conocidas como hadrones, están formadas por constituyentes aún más fundamentales denominados quarks. Una intensa fuerza nuclear cohesiona los hadrones, manteniendo un delicado equilibrio que simultáneamente los atrae y los mantiene a una distancia suficiente para evitar el colapso. Comprender el origen de esta fuerza es crucial para dilucidar la formación primigenia de la materia y del universo. Para sondear la fuerza nuclear con mayor profundidad, los científicos estudian los hipernúcleos, núcleos atómicos que contienen hiperones, partículas que incluyen un quark extraño. En casos de extrema rareza, dos hiperones pueden quedar ligados dentro del mismo núcleo, formando un hipernúcleo doble-Λ. Dichos sistemas permiten a los investigadores medir directamente la interacción entre las dos partículas Λ y explorar el comportamiento de la fuerza nuclear cuando intervienen quarks extraños. Este conocimiento es, asimismo, esencial para comprender las propiedades de la materia bajo las densidades extremas que se hallan en las estrellas de neutrones, donde se postula la existencia de hiperones.

La detección de hipernúcleos doble-Λ ha representado desde hace mucho tiempo un gran desafío, debido a su ínfima frecuencia de producción y a sus complejas estructuras de desintegración. En el experimento J-PARC E07, se emplearon placas de emulsión nuclear para registrar las trazas de las partículas resultantes de la formación y desintegración de hipernúcleos. No obstante, solo una fracción minúscula de los datos de emulsión ha sido analizada, ya que los métodos convencionales exigen una ingente inversión de tiempo y trabajo. En consecuencia, una vasta cantidad de información valiosa permanece inexplorada.

El equipo liderado por RIKEN y CSIC desarrolló un marco de análisis basado en el aprendizaje profundo para procesar este ingente conjunto de datos. Mediante el entrenamiento de redes neuronales para reconocer los sutiles indicios de los eventos de doble extrañeza, los investigadores lograron extraer automáticamente imágenes candidatas que indicaban la posible formación y desintegración de hipernúcleos doble-Λ. Posteriormente, estos candidatos fueron examinados bajo microscopio, confirmándose un evento a través de un detallado análisis cinemático como la producción de un hipernúcleo doble-Λ de boro-13 ($^{13}_{\Lambda\Lambda}$B), en el cual dos partículas Λ se encuentran ligadas a un núcleo de boro-11. Esta identificación constituye la segunda observación inequívoca de un hipernúcleo doble-Λ en la historia y el primer descubrimiento de este tipo en casi un cuarto de siglo. Es más, se trata de la primera vez que se mide la interacción entre dos partículas Λ en un núcleo distinto del helio.

Notablemente, este avance se consiguió analizando apenas el 0,2 por ciento del total de los datos de emulsión del experimento J-PARC E07. Basándose en esta tasa de detección, los investigadores estiman que el conjunto de datos completo podría contener más de 2000 eventos de doble extrañeza a la espera de ser descubiertos. El equipo planea continuar refinando sus métodos de análisis basados en el aprendizaje profundo y extender su búsqueda para desvelar el comportamiento de las partículas Λ en otros núcleos, así como las interacciones entre los hiperones Ξ y los núcleos atómicos. Permitiría una comprensión más profunda de la fuerza nuclear y la estructura de la materia en el universo.

Información del Articulo

- **Titulo**: Artificial intelligence pioneers the double-strangeness factory
- **Autores**: Yan He, Takehiko R. Saito, Hiroyuki Ekawa, Ayumi Kasagi, Yiming Gao, Enqiang Liu, Kazuma Nakazawa, Christophe Rappold, Masato Taki, Yoshiki K. Tanaka, He Wang, Ayari Yanai, Junya Yoshida, Hongfei Zhang
- **Revista** *Nature Communications* **16**, 11084 (2025) https://doi.org/10.1038/s41467-025-66517-x
- **DOI**: 10.1038/s41467-025-66517-x

Grupo Internacional de Investigación

RIKEN - Japon
Pioneering Research Cluster, Saito High-Energy Nuclear Research Laboratory

- Investigadora Visitante: Ayumi Kasagi (Rikkyo University, Graduate School of AI Science)
- Científico Investigador in Chef: Takehiko R. Saito
- Investigador Principal Visitante: Kazuma Nakazawa (Gifu University; Fukui University)
- Profesor Asociado: Masato Taki (Rikkyo University)
- Y otros (ver original para la lista completa)

Tohoku University - Japon

- Profesor Asociado: Junya Yoshida

Instituto de Estructura de la Materia (IEM), CSIC - España

- Investigador: Christophe Rappold

Apoyo a la Investigación

Este trabajo fue apoyado por:

- Proyectos I+D+i 2020 PID2020-118009GA-I00 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 (IP: Christophe Rappold)
- Proyecto Consolidación Investigadora 2022 CNS2022-135768 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR (IP: Christophe Rappold)
- Proyecto I+D+i 2022 PID2022-140162NB-I00 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 (IP: Olof Tengblad & Bruno Olaizola Mampaso)

- Grants 2019-T1/TIC-13194 and 2023-5A/TIC-28925 del programa Atracción de Talento Investigador de la Comunidad de Madrid (IP: Christophe Rappold)
- JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Scientific Research (A) "Clarificando las interacciones ΛΛ y Ξ−Nucleón" (IP: Kazuma Nakazawa)
- JSPS New Academic Fields Research "Explorando la estructura jerárquica de la materia a través de cúmulos de hadrones extraños" (IP: Hirokazu Tamura)
- JSPS Research Activity Start-up "Búsqueda en tiempo real de eventos hipernucleares en emulsiones utilizando redes rápidas de detección de objetos ligeros" (IP: Ayumi Kasagi)
- JSPS Young Scientists Research "Reconstruyendo la base de la interacción ΛN mediante análisis de emulsiones basado en aprendizaje profundo" (IP: Ayumi Kasagi)

AI opens a new window into the hidden world of nuclear matter

Researchers from the Institute for the Structure of Matter (Instituto de Estructura de la Materia) of CSIC in Spain and the High Energy Nuclear Physics Laboratory at the RIKEN Pioneering Research Institute (PRI) in Japan along with their international collaborators, have achieved a groundbreaking discovery that bridges artificial intelligence and nuclear physics. By applying deep learning techniques to a vast amount of unexamined nuclear emulsion data from the J-PARC E07 experiment, the team identified, for the first time in 25 years, a new double-Λ hypernucleus. This marks the world's first AI-assisted observation of such an exotic nucleus, an atomic nucleus containing two strange quarks. The finding, published in *Nature Communications*, represents a major advance in experimental nuclear physics and provides new insight into the composition of neutron star cores, one of the most extreme environments in the universe.

All ordinary matter is composed of atoms, whose nuclei consist of protons and neutrons. These particles, known as hadrons, are made of more fundamental building blocks called quarks. A strong nuclear force binds hadrons together, maintaining a delicate balance that both pushes them together and keeps them far enough apart to prevent collapse. Understanding the origin of this force is crucial to explaining how matter and the universe were initially formed. To probe the nuclear force more deeply, scientists study hypernuclei, atomic nuclei that contain hyperons—particles that include a strange quark. In extremely rare cases, two hyperons can be bound within the same nucleus, forming a double-Λ hypernucleus. These systems allow researchers to directly measure the interaction between the two Λ particles and to explore how the nuclear force behaves when strange quarks are involved. This knowledge is also essential for understanding the properties of matter under the extreme densities found in neutron stars, where hyperons are expected to exist.

Detecting double-Λ hypernuclei has long been a major challenge because they are produced very rarely and exhibit complex decay structures. In the J-PARC E07 experiment, nuclear emulsion plates recorded the tracks of particles resulting from hypernuclear formation and decay. However, only a very small fraction of the emulsion data has been analyzed because conventional methods are time and labor consuming. As a result, a vast amount of valuable information remains unexplored.

The CSIC- and RIKEN-led team developed a deep learning–based analysis framework to process this enormous dataset. By training neural networks to recognize the subtle signatures of double-strangeness events, the researchers were able to automatically extract candidate images indicating the potential formation and decay of double-Λ hypernuclei. These candidates were then examined under a microscope, and one event was confirmed through detailed kinematic analysis as the production of a double-Λ hypernucleus of boron-13 ($^{13}_{\Lambda\Lambda}$B), in which two Λ particles are bound to a boron-11 nucleus. This identification is only the second unambiguous observation of a double-Λ hypernucleus in history and the first such discovery in nearly 25 years. Moreover, it is the first time that the interaction between two Λ particles has been measured in a nucleus other than helium.

Remarkably, this breakthrough was achieved by analyzing just 0.2 percent of the total emulsion data from the J-PARC E07 experiment. Based on this detection rate, the researchers estimate that the full dataset could contain more than 2,000 double-strangeness events

awaiting discovery. The team plans to continue refining their deep learning–based analysis methods and to extend their search to reveal the behavior of Λ particles in other nuclei, as well as the interactions between Ξ hyperons and atomic nuclei. It would enable a deeper understanding of the nuclear force and the structure of matter in the universe.

Paper Information

- **Title**: Artificial intelligence pioneers the double-strangeness factory
- **Authors**: Yan He, Takehiko R. Saito, Hiroyuki Ekawa, Ayumi Kasagi, Yiming Gao, Enqiang Liu, Kazuma Nakazawa, Christophe Rappold, Masato Taki, Yoshiki K. Tanaka, He Wang, Ayari Yanai, Junya Yoshida, Hongfei Zhang
- **Journal**: *Nature Communications* **16**, 11084 (2025) https://doi.org/10.1038/s41467-025-66517-x
- **DOI**: 10.1038/s41467-025-66517-x

International Research Group

RIKEN - Japan
Pioneering Research Cluster, Saito High-Energy Nuclear Research Laboratory

- Visiting Researcher: Ayumi Kasagi (Rikkyo University, Graduate School of AI Science)
- Senior Research Scientist: Takehiko R. Saito
- Visiting Principal Researcher: Kazuma Nakazawa (Gifu University; Fukui University)
- Associate Professor: Masato Taki (Rikkyo University)
- And others (see original for full list)

Tohoku University - Japan

- Associate Professor: Junya Yoshida

Instituto de Estructura de la Materia (IEM), CSIC - Spain

- Researcher: Christophe Rappold
- PhD Student: Samuel Escrig Lopez

Research Support

This work was supported by:

- Proyectos I+D+i 2020 PID2020-118009GA-I00 funded by the Spanish MICIU/AEI/10.13039/501100011033 (PI: Christophe Rappold)
- Proyecto Consolidación Investigadora 2022 CNS2022-135768 unded by the Spanish MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and the European Union NextGenerationEU/PRTR (PI: Christophe Rappold)
- Proyecto I+D+i 2022 PID2022-140162NB-I00 unded by the Spanish MICIU/AEI/10.13039/501100011033 (PI: Olof Tengblad & Bruno Olaizola Mampaso)
- Grants 2019-T1/TIC-13194 and 2023-5A/TIC-28925 under the Atracción de Talento Investigador program of the Community of Madrid (PI: Christophe Rappold)
- JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Scientific Research (A) "Clarifying ΛΛ and Ξ–Nucleon Interactions" (PI: Kazuma Nakazawa)

- JSPS New Academic Fields Research "Exploring Matter's Hierarchical Structure via Strange Hadron Clusters" (PI: Hirokazu Tamura)
- JSPS Research Activity Start-up "Real-time Search for Hypernuclear Events in Emulsions Using Fast Lightweight Object Detection Networks" (PI: Ayumi Kasagi)
- JSPS Young Scientists Research "Reconstructing the Foundation of ΛN Interaction via Deep Learning-based Emulsion Analysis" (PI: Ayumi Kasagi)