

Gaia: O primeiro censo de estrelas da Vía Láctea en seis dimensións

Minia Manteiga Outeiro

Escola Técnica Superior de Náutica e Máquinas Centro de Investigación en Tecnoloxías da Información e as Comunicacions (CITIC) Universidade da Coruña

Discurso de ingreso na Real Academia Galega de Ciencias. 4 de marzo de 2020

1.- Saúdo.

Señora Vicepresidenta da Real Academia Galega de Ciencias, Reitor Magnífico da Universidade da Coruña, autoridades e académicos, queridos colegas, familiares e amigos. Quero comezar agradecendo a honra de formar parte desta institución e ofrecer como retorno a miña capacidade de traballo para difundir a ciencia dende a Academia, e especialmente a ciencia feita por galegos e galegas aquí en Galicia.

Galicia foi dende hai anos unha canteira de científicos relevantes en moitas áreas do coñecemento, que se forman nas nosas tres universidades e creo que é necesario que animemos á sociedade a coñecer o seu traballo, valorar os seus logros e comprender os beneficios das súas achegas.

En particular, tamén quero destacar a presenza de mulleres científicas, está claro que non dar visibilidade o seu traballo divide a lo menos a metade o beneficio que recibe Galicia da súa comunidade científica.

Eu son astrofísica, dediqueime sempre o estudo da física das estrelas. Síntome unha persoa moi afortunada, xa que a astrofísica é tamén a miña paixón. Tras empezar como docente na Universidade de Vigo, no ano 2000 incorporeime á UDC e dende o 2007 participo, xunto con outros investigadores da Facultade de Informática e do centro de excelencia CITIC desta universidade na misión Gaia da Axencia Espacial Europea. Dedicarei esta conferencia a describir dun xeito que espero que resulte interesante a contribución que facemos o grupo galego de Gaia ao proxecto de cartografiado en 6 dimensións da Vía Láctea.

Cómpre avisar de que neste proxecto traballamos un consorcio duns 450 científicos, de case todos os países de Europa, polo tanto, moitos dos resultados que vou amosar son logros deste colectivo, coñecido como DPAC, aínda que destacarei as achegas do meu grupo no campo da astrofísica estelar e a da Intelixencia Artificial.



2.- Gaia: el satélite y sus instrumentos.

Voy a comenzar describiendo la misión Gaia, sus objetivos científicos y el reto que supone desde el punto de vista computacional el procesado y análisis de datos complejos de más de 2000 millones de estrellas de nuestra galaxia. Les mostraré algunos resultados importantes y realmente espectaculares que se han obtenido estudiando el movimiento de poblaciones extensas de estrellas de la Vía Láctea. A continuación describiré algunas aportaciones que hacemos desde mi grupo de investigación que forma parte del CITIC, centro singular en TICs de la Universidade da Coruña, contribuyendo al análisis de datos mediante el uso de técnicas de Inteligencia Artificial.

Gaia es un satélite de la ESA que se puso en órbita en diciembre del año 2013. En la Figura 1 se muestra el momento del lanzamiento tal como lo vivimos en el laboratorio de mi universidad. Fue un gran momento, que no hacía sino anticipar otros que vendrían después. Se trata de una misión astrométrica: su objetivo principal es medir con una precisión sin precedentes las posiciones y los movimientos de las estrellas de la Vía Láctea. Debido a que mide las posiciones en el cielo de forma repetida en el tiempo, esto permite calcular el ángulo de la paralaje que a su vez sirve para calcular las distancias a las que se encuentran los astros. Además, lleva una instrumentación compleja que permite descomponer la luz de cada objeto en sus colores, y que usamos para clasificar las fuentes y determinar sus propiedades fundamentales, tales como su temperatura y gravedad en el caso de las estrellas.

La paralaje astronómica es el pequeño desplazamiento angular de la posición en el cielo de una estrella, que apreciamos cuando la observamos desde dos épocas diferentes del año, es decir, desde dos posiciones diferentes de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Cuanto más alejada se encuentre la estrella menor es ese desplazamiento. Es el mismo efecto que procesa nuestro cerebro y permite que veamos en 3D por el hecho de tener dos ojos separados una cierta distancia.



Figura 1. Imagen del grupo de investigación el día del lanzamiento del satélite Gaia, en diciembre del año 2013.

El ángulo de la paralaje se mide en segundos de arco. Como referencia ha de recordarse que el tamaño angular de la Luna en el cielo es de unos 30 minutos de arco, cada minuto son 60 segundos es decir 1800 segundos de arco. El parsec, una unidad de distancia habitual en astronomía, se define como la distancia a la que se debe encontrar un objeto astronómico para que desde la Tierra lo observemos con una paralaje de 1 segundo de arco y equivale aproximadamente a 3,26 años-luz. Gaia midiendo ángulos de paralaje extremadamente pequeños, del orden de decenas de microsegundos de arco, es decir del orden de 10⁻⁵ segundos de arco. Es una precisión equivalente a distinguir una moneda de 1 euro situada en la Luna.



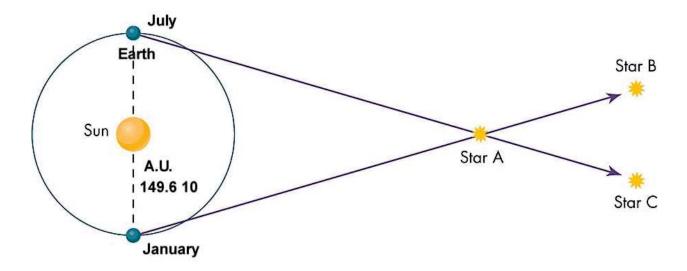


Figura 2. Concepto de la paralaje astronómica.

En la Figura 2 se ilustra más en detalle el concepto de la paralaje. A medida que la Tierra gira en torno al Sol, Gaia se mueve solidariamente, y observa una misma estrella desde direcciones ligeramente diferentes. El efecto en el tiempo es que al cabo de un año la estrella describe en el cielo una elipse, cuyo semieje mayor es la paralaje. Las estrellas alejadas describen una elipse muy pequeña. Como en realidad las estrellas tienen un movimiento propio en la galaxia, se complica la manera en que observamos en el tiempo la paralaje, ya que superpuesta a la elipse hay una deriva debido a ese movimiento. Gaia permite determinar simultáneamente paralajes y movimientos propios en el plano del cielo.

Es maravilloso observar el cielo nocturno una noche despejada y en un lugar alejado de focos de contaminación luminosa. A todos nos sobrecoge la belleza de la visión de la Vía Láctea, nuestro Camino de Santiago. Pero lo que vemos es solo una parte muy pequeña de lo que esconde el cosmos, y la ciencia y la tecnología nos permiten ir mucho más allá. Todas estas estrellas que vemos en el plano del cielo están en realidad a diferentes distancias de la Tierra, y además, aunque las vemos estáticas, lo cierto es que se mueven a velocidades considerables alrededor del centro galáctico.





Figura 3. Imagen del cielo nocturno en Galicia. Autor: Prof. Dr. Ángel Rodríguez Arós. UDC.

Los datos de Gaia nos están permitiendo ir mucho más allá y estudiar movimientos en 3D de poblaciones concretas de estrellas de la Vía Láctea, lo que ha deparado algunos descubrimientos muy interesantes. En particular, si representamos las estrellas que se encuentran a unos cientos de parsecs en la vecindad solar y para las que conocemos con precisión posiciones movimientos, podemos componer una película mostrando las trayectorias que seguirán en los próximos 2000 millones de años, por ejemplo. En el discurso de ingreso les mostré una visualización elaborada por el equipo de la Dra Jackie Faherty del American Museum of Natural History, donde se observa este movimiento. Un descubrimiento importante de Gaia ha sido confirmar que en aproximadamente 1200 millones de años, una estrella con nombre Gliese 710 pasará tan cerca del sistema solar que perturbará la nube de Oort, una región en torno al Sol que contiene polvo y restos sólidos que son vestigios de la formación del sistema solar.

La cercanía de su órbita nos lleva a deducir que esta estrella, con una masa de poco más de la mitad que la masa del Sol, provocará muy probablemente una lluvia de asteroides con el potencial de arrasar con la vida que, dentro de 1200 millones de años, pueda seguir existiendo en nuestro planeta.

Esto no es más que un ejemplo, que puede servir para que nos pongamos en contexto, el ser humano posee la grandeza que le otorga su capacidad de pensar y la pequeñez de la escala espacio-temporal que supone su existencia en el contexto cosmológico.

Volvamos a Gaia. El satélite se encuentra situado en el punto L2 de Lagrange, un punto estable situado a aproximadamente 1,5 millones de km de la Tierra en dirección antisolar donde se sitúan muchos satélites artificiales. Desde allí se mueve con la Tierra alrededor del Sol y su eje principal gira con un periodo de 6 horas y además precesiona con un periodo de 63 días, esta configuración genera una órbita de tipo Lissajous que le permite realizar un barrido completo de la esfera celeste cada 6 meses, y pasar en promedio por cada punto del cielo unas 14 veces al año. El satélite contiene dos telescopios con espejo primario rectangular de 1,45 x 0.5 m, que observan dos campos de visión separados un ángulo de 106,5° y que comparten el mismo plano focal. La luz que llega de los objetos astronómicos llega al detector CCD compuesto por unos mil millones de píxeles y de ahí a los



diferentes instrumentos. Estos instrumentos son el instrumento astrométrico, que simplemente calcula con precisión la posición de cada objeto en el tiempo, el espectrofotómetro azul y rojo, dos prismas que separan la luz en sus colores, y el

espectrógrafo de velocidades radiales, RVS, que permite calcular mediante el efecto Doppler la velocidad de alejamiento y acercamiento de las estrellas más brillantes, hasta magnitud 16.

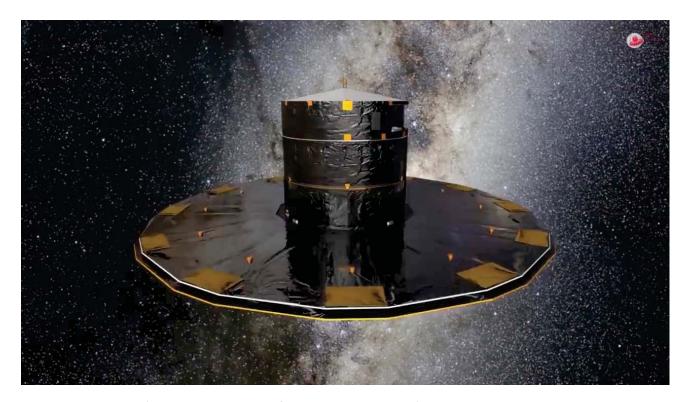


Figura 4. Imagen artística de Gaia sobre el fondo de la Galaxia. Créditos: ESA.

3.- Objetivos científicos.

El objetivo principal de la misión Gaia es cartografiar en seis dimensiones, posiciones y velocidades, todos los objetos visibles desde el satélite con brillos hasta aproximadamente magnitud 20. Esto incluye más de 2000 millones de estrellas de la Vía Láctea, un millón de galaxias y medio millón de cuásares, además de objetos del sistema solar, asteroides y cometas. Esto ya de por si implica una revolución en todos los campos de la Astrofísica, y en particular en la astrofísica estelar, ya que nos permite escalar correctamente los observables desde sus valores aparentes a sus valores absolutos, en particular conocer cuanta energía realmente emiten. Queremos cartografiar la Vía Láctea para entender cómo fue su origen, cómo ha ido cambiando en el tiempo y el porqué de su estructura actual. Para ello sus medidas proporcionan información dinámica, sobre movimientos, y física, temperaturas, gravedades, composición química, etc. de sus estrellas.

La Vía Láctea es una galaxia espiral, sus partes principales son el disco, que contiene los brazos espirales y es donde se forman nuevas estrellas, el bulbo que rodea al agujero negro central y el halo, una esfera de estrellas viejas que rodea el disco.

Se calcula que su edad es de unos 13700 millones de años. En ese tiempo se han formado y han muerto varias generaciones de estrellas, las de alta masa explotando como supernovas y las de baja masa extinguiéndose como enanas blancas. Cada generación arroja al medio interestelar polvo y gas que enriquecen de elementos químicos la región donde se forman nuevas estrellas. Distinguimos las diferentes "poblaciones" de estrellas por su cinemática, cómo se mueven, por su metalicidad (contenido en elementos químicos) y por su pertenencia a estructuras diferenciadas, del disco,



bulbo o halo. Pero las medidas de Gaia nos han hecho ver que la realidad de nuestra galaxia es más compleja.

Los datos sobre movimientos de las estrellas en 3D nos han permitido diferenciar un conjunto de unas 30 mil estrellas que se mueven en órbitas muy elongadas en dirección antihoraria, al revés que el resto de las estrellas, incluido el Sol. Estas estrellas tienen además una composición química pobre en elementos, que indica que son viejas. Investigadores del consorcio de Gaia encabezados por la Dra. Amina Helmi (Universidad de

Groningen) han podido explicar su origen como debido a un episodio de "canibalismo galáctico". Mediante simulaciones numéricas han mostrado cómo hace unos 10 mil millones de años, una Vía Láctea joven y algo más pequeña, se fusionó con otra galaxia que se ha denominado Gaia-Encelado. Lo que observamos ahora con movimientos peculiares son las estrellas de esa galaxia embebida en el resto de la Vía Láctea. Este episodio permite deducir que los encuentros entre galaxias son frecuentes y que el halo y el disco grueso de la Vía láctea han podido formarse de esta manera.

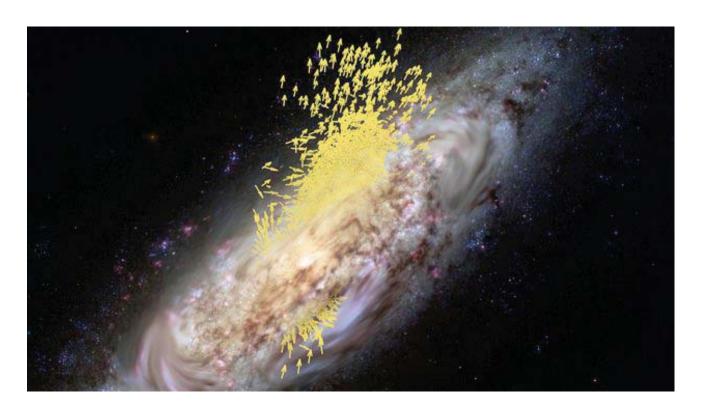


Figura 5. Imagen de la Vía Láctea mostrando la posición de las estrellas de Gaia-Encelado con rotación anómala. Créditos: ESA y Amina Helmi (DPAC).

4.- El procesado de datos de Gaia, un problema de Big data.

Gaia es el paradigma de la Astrofísica de los Grandes Datos, no solo por la cantidad de información que diariamente recoge el satélite, sino también por la variedad y complejidad de la misma. A modo de resumen estos serían en grandes números lo que cada día observa Gaia: 70 millones de objetos celestes, 637 millones de medidas astrométricas, 150 millones de medidas fotométricas. Esto datos se traducen en unos 40 GB que diariamente son transmitidos a Tierra. A día de hoy (2049 días operativos de misión) hemos acumulado unos 76 mil GB de datos científicos y hemos observado unos 144 mil millones de tránsitos (posiciones en el cielo).



Para tratar y analizar esta información la ESA organizó un consorcio internacional, de nombre DPAC, formado por unos 450 científicos de más de 20 países de Europa. Los resultados de procesar la información se hacen públicos a la comunidad internacional periódicamente. Ya se han publicado dos archivos de Gaia, el segundo en 2018, y en 2021 se publicará el tercer archivo, resultado de procesar 22 meses de observaciones. Este tercer archivo incluirá por primera vez, adicionalmente a posiciones y movimientos, el análisis de la luz de los objetos, y se incluirá el trabajo que desde mi grupo hacemos para clasificar y extraer información de este tipo de datos.

Podemos decir que nos enfrentamos a un puzzle enorme y por ello ha sido necesario un esfuerzo internacional para procesar y analizar toda esta información. Mi grupo de investigación está

compuesto por varios miembros de la Facultad de Informática de la UDC encabezados por el Prof. Dr. Carlos Dafonte, además de las profesoras gallegas astrofísicas la Dra. Ana Ulla de la UVigo y la Dra. Ruth Carballo de la UCAN. La interdisciplinariedad ha resultado ser una maravillosa herramienta, que nos ha permitido preparar algoritmos basados en la Inteligencia Artificial para abordar problemas importantes del procesado: clasificación de las fuentes en diversos tipos de objetos (estrellas, galaxias y cuásares) a partir de sus huellas dactilares, sus SEDs; y la estimación de los parámetros atmosféricos principales (temperaturas efectivas, gravedades y contenido en elementos químicos) de las estrellas a partir de sus espectros RVS. Contribuimos así al censo de objetos aportando información sobre propiedades.

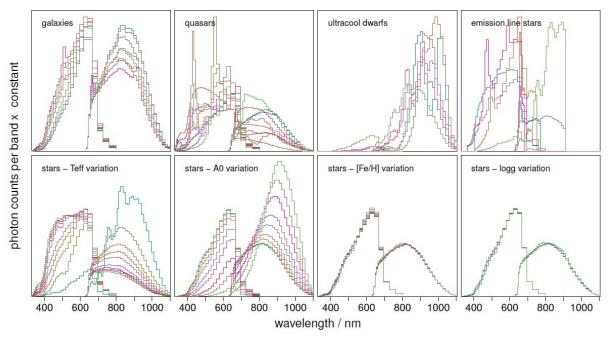


Figura 6. Distribuciones espectrales de energía (SEDs) sintéticas de diferentes tipos de objetos astronómicos en función de sus principales parámetros físicos. Crédito: ESA-DPAC.



5.- Clasificación de fuentes astronómicas mediante mapas autoorganizativos.

Una de las herramientas que usa nuestro grupo para clasificar las SEDs observadas por Gaia es un mapa auto-organizativo o SOM. Se trata de redes de neuronas artificiales no supervisadas, es decir que no se entrenan, que son capaces de agrupar una muestra grande de fuentes (unos 2000 millones) en un conjunto reducido de neuronas, que vendrían a representar grupos de objetos que tienen distribuciones de energía similares y que por tanto tienen la misma o parecida naturaleza

física. Las redes SOM funcionan mediante un proceso que llamamos aprendizaje competitivo, cada neurona compite para que un determinado objeto pase a formar parte de ella y para ello utiliza una métrica que permite calcular las distancias entre las curvas fotométricas. El resultado es un mapa con dimensiones prefijadas y reducidas (en este caso 900 neuronas) donde cada celda contiene un objeto central prototípico que sirve para representar el resto de elementos. Neuronas o celdas próximas contienen objetos parecidos, de manera que la topología del mapa conserva la información del conjunto de objetos. Sirven también para aislar observaciones anómalas o buscar objetos peculiares.

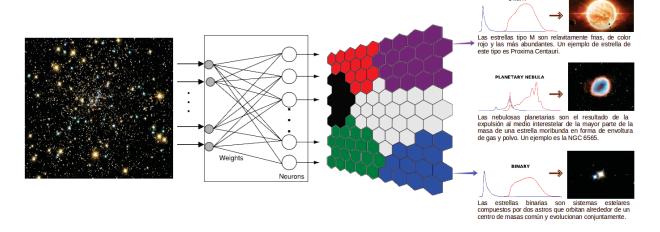


Figura 7. Esquema de funcionamiento de un mapa auto-organizativo (SOM) para la clasificación de distribuciones espectrales de energía (SEDs).





Figura 8. Ejemplo de un mapa SOM desplegado con la herramienta de análisis GUASOM.

Esta metodología tiene una ventaja importante: utiliza exclusivamente la información "morfológica" de las distribuciones de luz de cada objeto que ha medido Gaia, lo que garantiza la consistencia del análisis. Una vez construido el mapa SOM se pueden utilizar catálogos de objetos astronómicos conocidos y cruzar sus posiciones en el cielo con las de los objetos que tenemos en cada neurona. De esta manera podemos hacer una estadística de los objetos en cada neurona y en muchos casos establecer su naturaleza física.

Un problema que tienen los mapas autoorganizativos es la dificultad de visualizar y analizar su contenido. Nuestro grupo de investigación ha desarrollado una herramienta de visualización, que hemos denominado GUASOM que permite desplegar el contenido de cada neurona, hacer estadística de sus propiedades, verificar índices de calidad del agrupamiento, etc. Esta herramienta se publicará junto con el tercer archivo de Gaia para el análisis de objetos atípicos. Mencionar que estos desarrollos han dado lugar a varias colaboraciones con empresas, por ejemplo en el campo de la ciberseguridad. Así, los mapas SOM se han mostrado útiles para detectar entradas anómalas en redes informáticas, para detectar intrusiones. 6.- Temperaturas, gravedades y elementos químicos en la atmósfera de las estrellas obtenidas mediante redes supervisadas entrenadas con retropropagación del error.

Las redes de neuronas artificiales son algoritmos de Inteligencia Artificial inspirados en su homólogo biológico.

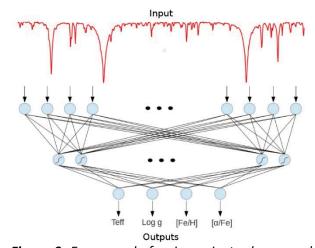


Figura 9. Esquema de funcionamiento de una red de neuronas artificiales para la estimación de parámetros estelares a partir de datos del instrumento RVS.



Consisten en un conjunto de unidades conectadas entre sí para transmitirse señales. La información llega por la capa de entrada y atraviesa la red neuronal sometiéndose a varias operaciones matemáticas, para finalmente producir unos valores de salida. Se trata de un algoritmo supervisado, que tras un proceso de entrenamiento mediante ejemplos es capaz de relacionar la información de la entrada con la de salida.

Proporcionan muy buenos resultados para ajustar funciones complejas, y en particular, en problemas de reconocimiento de patrones.

Gaia lleva un tercer instrumento, el espectrógrafo de velocidades radiales RVS. Es un espectrógrafo de red de difracción, de mayor resolución que los espectrofotómetros y que funciona en el IR cercano, hacia 8500 A. Su objetivo principal es medir las velocidades radiales (de acercamiento y alejamiento) de las estrellas más brillantes que observa Gaia, pero tiene otra funcionalidad que nosotros estamos utilizando. Midiendo en detalle la luz de las estrellas con este instrumento somos capaces de distinguir rasgos en el espectro que permiten deducir con mayor precisión tanto las propiedades físicas principales, T, g, como la presencia de elementos químicos concretos en su atmósfera. Para hacerlo nuestro grupo ha desarrollado un algoritmo basado también en redes de neuronas artificiales, en este caso del tipo perceptrón, que se entrenan con modelos de estrellas, y se aplican a los datos de Gaia, proporcionando dichos parámetros. Las redes han demostrado ser un algoritmo que proporciona buenos resultados cuando los datos tienen poca señal y mucho ruido y además una vez entrenadas su aplicación es inmediata.

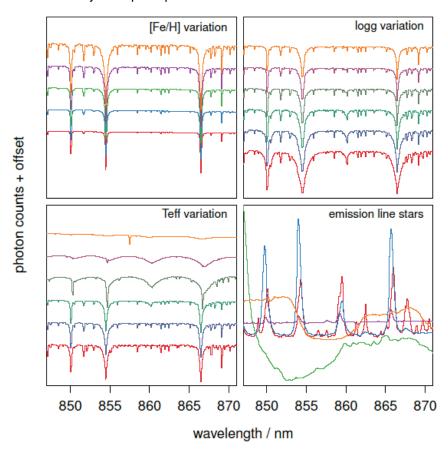


Figura 10. Ejemplo de espectros sintéticos de estrellas en la configuración del instrumento RVS mostrando la variación con los parámetros atmosféricos estelares.



Los espectros del instrumento RVS de Gaia tienen el objetivo principal de determinar la componente (alejamiento У acercamiento) movimiento de los astros, que completa las velocidades medidas en el plano del cielo. Pero adicionalmente proporcionan información sobre las propiedades atmosféricas de las estrellas (las más brillantes de la Galaxia, hasta magnitud visible aproximadamente 16). Los modelos de atmósferas estelares predicen con gran precisión la forma que estos espectros tienen en función de la temperatura, tamaño o gravedad, y contenido químico de las fotosferas de las estrellas. Estos modelos nos han servido para preparar un mapa de espectros sintéticos (teóricos) que cubren todo el parámetros de rango esperable estos atmosféricos. Nuestra metodología ha sido entrenar redes de neuronas con el conjunto de modelos, enseñando a la red a predecir los valores temperaturas efectivas, gravedades y metalicidades correspondiente a cada ejemplo previamente mostrado a la red. Una vez entrenada, si a la red se le presenta un conjunto de espectros con valores desconocidos de los parámetros, es capaz de reconocer los patrones y compararlos con los que ha leído en el proceso de entrenamiento, y producir una salida en la que proporciona una estimación de los mismos.

La ventaja de este algoritmo es que una vez entrenado produce estimaciones prácticamente en tiempo real, aprende a discriminar los patrones de interés en relación al ruido, y que permite llevar a cabo una estimación de errores si se utiliza una metodología inversa y se trabaja con redes generativas, que reproducen los espectros a partir de los parámetros de entrada.

Conociendo las temperaturas, gravedades y metalicidades podemos separar las estrellas en las poblaciones fundamentales de la Vía Láctea: las estrellas viejas ricas en metales del halo, en general frías, las estrellas jóvenes del disco (que es donde podemos encontrar estrellas azules masivas y de vidas cortas) y otras poblaciones intermedias.

7.- La población de nebulosas planetarias de la Vía Láctea con Gaia DR2.

Para terminar, me gustaría hablarles de mi trabajo sobre un tipo especial de estrellas, las nebulosas planetarias, que a pesar de su nombre, no guardan ninguna relación con los planetas. Se trata, desde mi punto de vista de los objetos más hermosos que pueblan el firmamento, y además son muy interesantes. En la Figura 11 muestro una selección de nebulosas planetarias tomadas del archivo del telescopio espacial Hubble. Se trata de estrellas con masas similares o algo mayores a las del Sol, que se encuentran en la fase final de su vida como astros radiantes, y han expulsado su atmósfera y capas externas en diferentes erupciones, y esas capas se encuentran alrededor de la estrella formando estructuras de formas muy diversas que no entendemos completamente. Una posibilidad es que se trate en realidad de dos estrellas, un sistema binario, y que la interacción gravitatoria condicione la forma en que se expulsan esas capas. Gaia puede ayudar a arrojar más luz sobre la naturaleza de estos objetos. La fase de nebulosa planetaria es muy corta, de unos 30 mil años en promedio, por lo que observamos muy pocas en la Vía Láctea. Hay unas 3000 conocidas, de un total estimado próximo a 20 mil. La medida de paralajes de Gaia ha permitido calcular con mayor precisión los brillos absolutos de estos objetos, y junto con sus temperaturas comparar su estado con el previsto por los modelos de evolución de estrellas.

En la Figura 12 se muestra la posición de un grupo de nebulosas en un diagrama HR, con luminosidades en el eje vertical, frente a temperaturas en el horizontal (crecientes a la izquierda). Las curvas son las predicciones de modelos para diferentes masas del remanente estelar. Vemos que la muestra sigue bien las predicciones.





Figura 11. Imágenes del telescopio espacial Hubble de una selección de Nebulosas Planetarias galácticas.

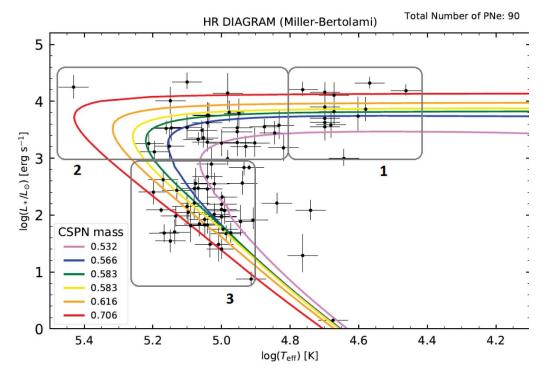


Figura 12. Diagrama HR de un grupo de nebulosas planetarias observadas por Gaia (DR2) junto con las predicciones de modelos evolutivos estelares para diferentes masas de estrellas centrales.

Las nebulosas jóvenes, con radios del orden de 0,1 parsecs se encuentran a la derecha, en la zona plana del diagrama, con brillos elevados y temperaturas bajas ya que el polvo y gas que las rodea es denso y las vemos muy enrojecidas, y las

nebulosas más viejas son más extensas, con radios del orden de 0,7 parsecs y son objetos azules con envolturas tenues y que pierden brillo a medida que cesan las reacciones nucleares en la estrella y se van apagando convirtiéndose en estrellas



inertes que llamamos enanas blancas. Hemos obtenido un escenario coherente con tamaños y edades que están de acuerdo con la fase evolutiva precisa en la que se encuentran estas estrellas.

8.- Conclusión y agradecimientos.

Ha sido mi intención mostrarles un resumen de la investigación en los ámbitos de la astrofísica y de la Inteligencia Artificial que estamos realizando en la UDC. Esta investigación es el resultado del trabajo en equipo de los miembros del Laboratorio Interdisciplinar de aplicaciones de la IA de la Coruña, liderados por el Dr. Carlos Dafonte, al que agradezco infinitamente su imprescindible apoyo todos estos años. Quiero dedicar este discurso a mi padre y mis dos hijos, Pablo y Javier, y a la memoria de mi madre Carmen y de mi hermana Margarita, a las que les hubiera gustado compartir este momento. Muchas gracias por su atención.

9.- Selección de referencias bibliográficas.

- "The Gaia misión". Prusti, T.; de Bruijne, J. H. J.; Brown, A. G. A.; et al. Autoría conjunta: Gaia Collaboration. Astronomy & Astrophysics, Vol 595, A1. 2016.
- "Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties". Brown, A. G. A.; Vallenari, A.; Prusti, T.; et al. Autoría conjunta: Gaia Collaboration. Astronomy & Astrophysics, Volumen: 616, A1 Fecha de publicación: 08/2018.
- "An approach to the analysis of SDSS spectroscopic outliers based on self-organizing maps: designing the outlier analysis software package for the next Gaia survey". Por: Fustes, D.; Manteiga, M.; Dafonte, C.; et ál. Astronomy & Astrophysics, Vol. 559, A7, 2013.
- "HSC: A Multi-Resolution Clustering Strategy in Self-Organizing Maps applied to astronomical observations." D. Ordóñez, C. Dafonte. M. Manteiga, B. Arcay. Applied Soft Computing. Vol 12, issue 1, 204-215. 01/2012.
- "Parameterization of RVS synthetic stellar spectra for the ESA Gaia mission: Study of the optimal domain for ANN training". D. Ordóñez, C. Dafonte. M. Manteiga, B. Arcay. Expert Systems with Applications 37, 1719-1727. 2010.
- "Properties of central stars of planetary nebulae with distances in Gaia DR2". González-Santamaría, I., Manteiga, M., Manchado, A., et al. Astronomy & Astrophysics, Volume 630, id.A150, 17 pp. October 2019.