



FACULTAD DE CIENCIAS
SECCIÓN DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS

10 de julio de 2023

Ampliación de la base de datos SNID (SuperNova Identifier) utilizando bases de datos espectroscópicas públicas



Tutor: Dr. Frédérick Poidevin

Cotutor: Dr. Ismael Pérez Fournon

Autora: Zaira Delgado González

Agradecimientos

A mis tutores Frédéric Poidevin e Ismael Pérez Fournon por transmitirme su pasión por la astrofísica en este proyecto. A mi familia y amigas por apoyarme en estos años de formación. A mis compañeros de clase y de biblioteca por compartir tantas horas juntos. Y a mi misma por no renunciar a esa llama incandescente que me animó a adentrarme en el conocimiento de la *Physis*, la Naturaleza.

Abstract

This work focuses its objectives on the classification of supernovae through the use of a self-created database. This database is made of spectra of supernovae of different spectral types, at different redshifts and observed at different phases with respect to the time of maximum light. It is based on Supernova Identification (SNID) making use of public supernova spectra obtained from the databases Transient Name Server (TNS) and Weizmann Interactive Supernova Data Repository (WiSeREP). SNID allows one to extend its original spectral database, by including new spectral templates, and use them to classify new objects. The main operation is to compare the spectrum that one wants to classify with the spectra in the new database. SNID finds the best correlation and is able to provide the most probable type of object, as well as the approximate redshift and temporal phase. It is worth mentioning that the new database contains supernovae that have been discussed in published papers as well as other supernovae that have been reported to TNS but lack publications.

The essential data to build up the new spectral templates that will form the extended SNID database are: object name and type, the spectra (tables with observed wavelength and flux), the age, the redshift and the wavelength range (minimum and maximum wavelengths of the spectra). We have also included in the database new types of supernovae not included in the original SNID spectral database, as superluminous supernova of type I and II (SLSN-I and SLSN-II).

The first stage of the work has been to create a database of supernovae (SNe) classified by the FLEET group, specifically 42 objects. Here different types of objects are included such as SN-Ia, SN-II, SN-II_n, SLSN-I and SLSN-II. This first stage served for familiarization with the program, as well as with supernovae databases and the bibliography. All this process was carried out manually, that is, I entered the data manually in files to later generate the spectral templates that make up the database. We have done small tests, for example, to analyze a spectrum that is already in the database to see if SNID associates it correctly with itself and with a maximum correlation.

The next step has been to introduce more objects in our extended SNID database. For this, a Python program has been created with which we have automated the creation of the files needed to generate the spectral templates. It is worth highlighting our interest in including objects of the SLSN-I and SLSN-II type, given the difficulty of classifying them. These are objects whose evolution is not yet exactly known.

Once the database has been created in a consistent and contrasted way, it has been verified. For this, spectra that are already in the database have been analyzed again, in order to obtain a maximum correlation and a correct classification. Another test is to analyze the spectrum of an object that is classified in the bibliography without it belonging to the database. It is expected to obtain a good classification.

Finally, we proceed to the attempt to classify new objects. Using TNS one can report the classification of new objects by sending a brief explanation and basic parameters. With the

help of SNID and our extended spectral database we have classified a few objects observed by our group with the Liverpool Telescope and Nordic Optical Telescope and sent classification reports to TNS. It must be taken into account that the development of the work has been accompanied by the understanding of basic concepts along with direct contact with certain current issues in the field of observational astrophysics.

Resumen

Este trabajo centra sus objetivos en la clasificación de supernovas mediante la utilización de una base de datos de creación propia. Esta base de datos está constituida por espectros de supernovas de diferentes tipos espectrales, a diferentes desplazamientos al rojo y observadas a diferentes fases respecto al momento de máxima luminosidad. Es creada a partir de SNID (SuperNova Identification) haciendo uso de datos espectroscópicos públicos obtenidos de otras bases de datos como TNS (Transient Name Server) y WISEReP (Weizmann Interactive Supernova Data Repository). SNID no solo permite la ampliación de su propia base de datos, mediante la opción de incluir nuevas plantillas espectrales, sino la utilización del mismo para clasificar nuevos objetos. El funcionamiento principal es comparar el espectro que se quiere clasificar con los espectros de su base de datos. Encuentra la mejor correlación y es capaz de darte el tipo de objeto más probable al que lo podemos asemejar, así como el desplazamiento al rojo y fase temporal aproximados. Cabe mencionar que para la base de datos se han usado tanto supernovas que presentan bibliografía, en la que se puede contrastar con una publicación los datos extraídos, como objetos reportados sin publicación.

Los datos esenciales para la conformación de las plantillas que constituirán la base de datos son: el nombre, el tipo de objeto, el espectro (longitud de onda frente a flujo), la edad, el redshift y la longitud de onda mínima y máxima de cada espectro. Además hemos incluido en la base de datos nuevos objetos que antes SNID no contemplaba, como es el caso de supernovas superluminosas de tipo I (SLSN-I) y de tipo II (SLSN-II).

La primera etapa del trabajo ha sido el desarrollo de una base de datos de SNe clasificadas por el grupo FLEET, específicamente 42 objetos. Aquí se contemplan diferentes tipos de objetos como son SN-Ia, SN-II, SN-II_n, SLSN-I y SLSN-II. Esta primera etapa sirvió para la familiarización tanto con el programa, como con las bases de datos y la bibliografía. Todo este proceso se llevo a cabo de forma manual, es decir, introduje los datos manualmente en ficheros para luego generar las plantillas espectrales que conforman la base de datos. Hemos realizado pequeñas pruebas, por ejemplo, analizar un espectro que ya se encuentra en la base de datos para confirmar que SNID lo asocia de forma correcta consigo mismo y con una correlación máxima.

El siguiente paso ha sido introducir más objetos en nuestra base de datos. Para ello se ha creado un programa de Python con el que hemos automatizado la creación de estos ficheros en formato ASCII necesarios para generar las plantillas espectrales. Cabe destacar nuestro interés en incluir objetos del tipo SLSN-I y SLSN-II dada la dificultad a la hora de su clasificación. Se trata de tipos de supernovas cuya evolución temporal aún no se conoce con exactitud.

Una vez creada la base de datos de una forma consistente y contrastada se ha procedido a su comprobación. Para ello se han analizado nuevamente espectros que ya están en la base de datos, con el fin de obtener una correlación máxima y una clasificación correcta. Otra prueba es analizar el espectro de un objeto que está clasificado en la bibliografía sin que este pertenezca a la base de datos. Se espera obtener una buena clasificación.

Finalmente se procede al intento de clasificación de objetos nuevos. Mediante TNS se puede reportar la clasificación de nuevos objetos enviando una breve explicación y parámetros básicos. He contribuido a la clasificación espectral de nuevas supernovas superluminosas descubiertas por nuestro grupo Supernovae and Gravitational Lenses Follow up (SGLF) a partir de observaciones con el Telescopio Liverpool y con el Nordic Optical Telescope. Mostraré el uso de la base de datos de SNID que he desarrollado en la clasificación de nuevas SNe superluminosas.

Hay que tener en cuenta que el desarrollo del trabajo ha ido acompañado de la comprensión de conceptos básicos y avanzados sobre el descubrimiento y clasificación de supernovas. Del mismo modo, ha habido un contacto directo con ciertos temas de actualidad en el campo de la astrofísica observacional.

Índice

I. Introducción	7
I.1. Presentación de la línea de investigación e importancia en el contexto de la astrofísica observacional	7
I.2. Objetivos del trabajo	8
II. Marco teórico	9
II.1. Clasificación espectral de Supernovas	9
II.2. Funcionamiento de SNID	11
II.2.1. Pre-procesamiento de los espectros	12
II.2.2. Estimación del desplazamiento al rojo	13
III. Observaciones	16
III.0.1. Magnitud absoluta de una SN y de una SLSN	16
III.0.2. Curva de luz	17
III.0.3. Espectros de una SNe	17
III.0.4. Evolución temporal de los espectros de SNe	17
III.0.5. Relación señal-ruido	18
IV. Desarrollo práctico	19
IV.1. Instalación de SNID y familiarización con repositorios públicos de espectros .	19
IV.2. Familiarización con la sintaxis y funciones de SNID	20
IV.3. Proceso de creación de una plantilla en formato SNID	22
IV.3.1. Creación de un fichero <i>logwave.txt</i> con los datos necesarios.	23
IV.3.2. Proceso logwave y representación de nuestra plantilla creada (plotlnw)	24
IV.4. Creación de plantillas de SNe del grupo FLEET, SLSN-I y SLSN-II reportadas en TNS por otros grupos	25
IV.5. Testeando errores y proceso de prueba.	29
V. Clasificación y uso de la base de datos	32
V.1. Mejoras de la base de datos	33

V.2. Clasificación	33
V.3. SN 2023cmx	33
VI. Conclusiones	39
VII. ANEXOS: SNe añadidas	41
VII.1SNe con publicación y sus referencias	52

I. Introducción

Resumen

Las supernovas son eventos estelares en los que explosiona una estrella y emite gran luminosidad. En la actualidad se investiga la evolución y origen de estos procesos, aunque con gran dificultad, debido a su corta duración. Saber más sobre SNe nos da pistas para comprender mejor la evolución de las estrellas, su final, y la contribución a la evolución global del universo. Estas explosiones nos ofrecen una visión de la composición interna de estos objetos. Además, nos permiten ver más allá de nuestra galaxia, determinar distancias y hacer mejores estimaciones sobre la constante de Hubble. Esto hace que podamos verificar que vivimos en un universo en expansión. Los objetivos de este proyecto son ayudar a la comunidad científica a analizar espectros de SNe, principalmente de aquellas que son superluminosas, y contribuir creando una base de datos para clasificarlas.

Supernovae are stellar events in which a star explodes and emits great light. At present, the evolution and origin of these processes are being investigated, although with great difficulty, due to their short duration. Knowing more about SNe gives us clues to better understand the evolution of the universe. These explosions show us what exists inside these objects. In addition, they allow us to see beyond our galaxy, determine distances, and make better estimates about the Hubble constant. This allows us to verify that we live in an expanding universe. The objectives of this project are to help the scientific community to process spectral data and to contribute by creating a database to classify SLSNe.

I.1. Presentación de la línea de investigación e importancia en el contexto de la astrofísica observacional

Las supernovas son eventos estelares que han estado presente y han sido objeto de interés a lo largo de la historia. Como sabemos se trata de estrellas en explosión que emiten gran luminosidad, en algunos casos mayor que la luminosidad total de la galaxia anfitriona. Su máxima luminosidad puede llegar ser equivalente a la de mil millones de soles. Este proceso se lleva a cabo en las últimas etapas evolutivas de una estrella masiva o de una enana blanca con fusión nuclear descontrolada. También podemos encontrarlas en sistemas binarios donde las estrellas interactúan entre sí.

Existen numerosas historias que narran observaciones de supernovas a simple vista, o dicho con palabras acordes a la época, la aparición de estrellas nuevas del latín *stellae novae*. Un claro ejemplo es SN 1604 o supernova de Kepler. Este objeto llegó a ser observado a simple vista durante más de tres semanas, fue la última supernova observada en nuestra galaxia hasta la fecha.

Estos objetos son difíciles de estudiar dada su corta duración, debemos tener en cuenta que generalmente se observan SNe a más 10 Mpc, es decir, a tanta distancia no somos capaces

de observar el tiempo de vida completo de una SN sino el periodo en que es más brillante. Hace más de 400 años que no se observan estos objetos en nuestra galaxia. Esto podría ser debido a la extinción de la luz por el disco de polvo interestelar que constituye parte de nuestra galaxia o simplemente a la ausencia de las mismas.

Pero centremos nuestra atención en el presente. ¿Por qué es interesante estudiar estos objetos? Sin ir mucho más allá, nos damos cuenta que entender los mecanismos físicos que generan una supernova pueden ser de gran interés en la comprensión de la evolución de diferentes tipos de estrellas, y por ende nuestra comprensión de la evolución global del universo. Se da una hipótesis de que algunas supernovas son disrupciones termonucleares de estrellas enteras y otras hipótesis de que surgen del colapso gravitatorio. Debido al colapso gravitatorio se comienza a eyectar las capas exteriores a medida que los núcleos se vuelven super compactos pudiendo llegar a formarse estrellas de neutrones y agujeros negros.

Por otra parte, las supernovas nos permiten observar, por así decirlo, el esqueleto de las estrellas. La explosión nos permite observar y determinar por diferentes métodos, como puede ser un análisis espectral o un análisis fotométrico, la composición de la estrella progenitora. Este hecho es muy interesante dado que se observa la generación de elementos pesados que nos ayudan a entender mejor la evolución química del Universo.

Finalmente, al poseer gran luminosidad nos permiten estimar distancias que van más allá de nuestra galaxia. Este estudio se usa para hallar con mejor precisión el valor de la constante de Hubble. Se intenta corroborar la expansión del universo por una desaceleración al principio debido a la gravedad seguida de una aceleración provocada por energía oscura que haría referencia a la constante cosmológica de Einstein.

Por tanto, queda bastante claro que son objetos que nos abren muchas puertas en nuestra concepción del Universo.

I.2. Objetivos del trabajo

El trabajo tiene como objetivo crear una herramienta que permita clasificar los datos públicos de supernovas proporcionados por diferentes instituciones y espectros del grupo SGLF en el que colaboro. Contribuir a la clasificación de estos objetos y publicarlo en repositorios públicos ayuda a sistematizar la información y facilitar la labor de otros grupos de investigación que pueden estar interesados en estudios detallados de algunas supernovas. Es por ello que este trabajo se centra en crear una buena base de datos con la que poder añadir y preparar su aplicación a futuras muestras de supernovas a mayores desplazamiento al rojo. Aún así este proceso está sistematizado por diferentes telescopios como puede ser el Zwicky Transient Facility (ZTF)¹. Pero en determinadas ocasiones el trabajo sistemático de ZTF para reportar objetos presenta fallos, principalmente en supernovas que tienen una curva de luz dudosa debido a la fase. El uso de SNID para nuevas clasificaciones nos lleva a interpretar más detenidamente los espectros de estos objetos y reclasificarlos. Esto hace que consigamos repositorios de datos públicos con mayor calidad.

¹Asociación público-privada destinada a la observación amplia del cielo nocturno. ZTF usa una cámara con gran campo para escanear el hemisferio norte cada dos días. <https://www.ztf.caltech.edu/index.html>

II. Marco teórico

Resumen

En este capítulo se introducen los aspectos teóricos del proyecto. Primeramente, se presenta la clasificación tanto de las SNe como de las SLSNe. En ambos casos se puede discernir entre dos grandes grupos, las de tipo I (eventos pobres en hidrógeno) y las de tipo II (eventos ricos en hidrógeno). Posteriormente se desarrolla la explicación del programa utilizado SNID (Supernova Identification). Este algoritmo de código libre utiliza métodos de correlación entre los espectros de la base de datos y el espectro del usuario, que en el caso que nos ocupa, se trata de un espectro de una SLSN. Finalmente, se presenta un apartado de observaciones en el que se desarrollan aspectos básicos utilizados en el desarrollo de todo el proyecto como magnitud, curva de luz, espectro de un SN, etc.

In this chapter the theoretical aspects of the project are introduced. First, the classification of both SNe and SLSNe is presented. In both cases it is possible to distinguish between two large groups, those of type I (events poor in hydrogen) and those of type II (events rich in hydrogen). Subsequently, the explanation of the program used SNID (Supernova Identification) is developed. This free code algorithm uses correlation methods between the spectra of the database and the user spectrum, which in the present case is a spectrum of an SLSN. Finally, a section of observations is presented in which basic aspects used in the development of the entire project are developed, such as magnitude, light curve, spectrum of an SN, etc.

II.1. Clasificación espectral de Supernovas

La primera clasificación de estos objetos se basa en las características espectrales cerca del máximo de luz. Como sabemos un espectro se obtiene mediante la dispersión de la luz electromagnética mediante un prisma o una red de difracción. Las líneas observadas se corresponden con elementos químicos ionizados en la fotosfera (líneas de absorción), íntimamente relacionada con la temperatura. La intensidad de estas líneas se relaciona con la abundancia de tal elemento. La primera gran clasificación de estos objetos se realizó atendiendo a la presencia o ausencia de hidrógeno (líneas de Balmer²) en su composición. Es decir, se acuñó como supernova de tipo I la ausencia de líneas de hidrógeno y supernova de tipo II cuando si contiene líneas de hidrógeno. La clasificación continúa con mayor rigurosidad con la presencia de otras líneas de absorción.

1. Supernova Tipo-I:

- a) Supernova Tipo Ia: Ausencia de hidrógeno y helio en el espectro. Presencia de líneas de silicio y calcio. Origen en sistemas binarios de estrellas enanas blancas.

²Las líneas de Balmer son un conjunto de líneas espectrales del átomo de hidrógeno que se producen cuando los electrones hacen transiciones desde niveles de energía superiores a inferiores, liberando energía en forma de luz en el rango visible del espectro electromagnético.

- b) Supernova Tipo Ib: Ausencia de hidrógeno en el espectro. Presencia de helio y líneas de silicio. Origen en estrellas masivas que han perdido su envoltura de hidrógeno.
- c) Supernova Tipo Ic: Ausencia de hidrógeno y helio en el espectro. Origen en estrellas masivas que han perdido su envoltura de hidrógeno y helio.

2. Supernova Tipo II:

- a) Supernova Tipo Iip: Presencia de hidrógeno en el espectro. Evolución lenta de la curva de luz. Origen en estrellas masivas.
- b) Supernova Tipo III: Presencia de hidrógeno en el espectro. Evolución rápida de la curva de luz. Origen en estrellas muy masivas.
- c) Supernova Tipo IIb: Presencia de hidrógeno en el espectro al principio, pero después desaparece. Origen en estrellas masivas que han perdido su envoltura de hidrógeno antes de explotar.

Por otra parte cabe mencionar la identificación y clasificación de las SLSN (Supernovas superluminosas). Para que una supernova se considere superluminosa su magnitud absoluta debe ser inferior a -21 . Cabe mencionar que este límite empírico impuesto no es estrictamente considerado. Podemos encontrar objetos clasificados como SLSNe con magnitudes superiores a este parámetro, pues cumplen otra serie de requisitos que le hacen pertenecer a este grupo.

La clasificación de SLSNe sienta sus bases en la espectroscopia del rango visible cerca de la luz máxima. La clasificación es similar a la de supernovas menos luminosas teniendo en cuenta la ausencia o presencia de hidrógeno. Tenemos, por tanto, dos grandes grupos:

1. **Supernovas Superluminosas Tipo-I (eventos pobres en hidrógeno):** Además de ser eventos pobres en hidrógeno podemos distinguir una serie de estructuras en los espectros de estos objetos. Si se tratan de espectros antes de la luz máxima podemos distinguir el complejo OII en eventos de bajo corrimiento al rojo. Mientras que en eventos con alto corrimiento al rojo podemos observar las líneas UV. Por otra parte, en el caso en el que solo tengamos espectros correspondientes a etapas de después del máximo de luz, se puede observar que el espectro de dichos objetos se parece al de una SN-Ic. Todo esto lo podemos observar en la figura 1. Por último, cabe mencionar que aunque no se ha conseguido una clasificación rígida y consolidada de subtipos de SLSN-I, están comenzando a aparecer trabajos que proponen subtipos de estas.
2. **Supernovas Superluminosas Tipo-II (eventos ricos en hidrógeno):** En los objetos superluminosos de tipo II se observan características espectroscópicas de hidrógeno alrededor del pico de la curva de luz. Además se observan, en eventos tempranos y calientes, características de helio. En este caso se puede hablar de un subtipo de superluminosa, las SLSN-II_n. Este subtipo es muy parecido a las de SN-II_n pero con mayor luminosidad y sin características estrechas. Este tipo de características se asocian a una interacción fuerte con el medio circundante.

Por último, se ha observado que los eventos tardíos de las SLSN-II evolucionan de tal forma que se parecen a los espectros tardíos de SLSN-I con líneas superpuestas de hidrógeno.

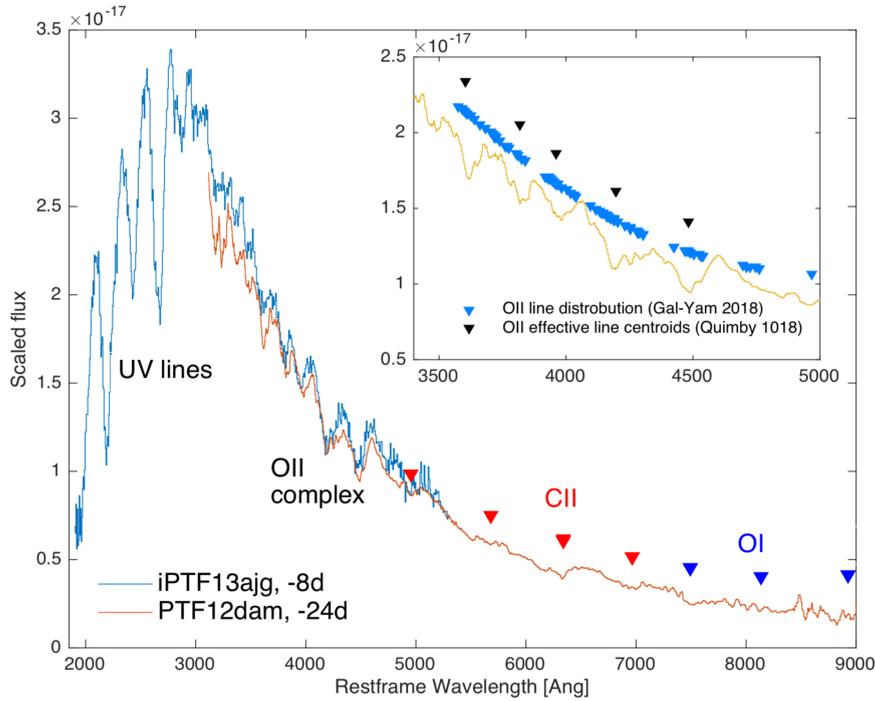


Figura 1: Complejo O-II y líneas UV de una SLSN-I antes del máximo. Representación de Gal-Yam (2018). <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051819>.

II.2. Funcionamiento de SNID

Supernova Identification (SNID) se trata de un algoritmo de código libre cuyo objetivo es identificar el espectro de supernovas además de determinar su redshift y edad. Su funcionamiento se basa en el uso de técnicas de correlación entre el espectro de entrada y las plantillas de una base de datos de espectros de SNe. El objetivo inicial del código era distinguir entre SNe de tipo Ia, tipo Ib/c y de tipo II, con alto corrimiento al rojo. En este trabajo hemos ampliado la base de datos original de SNID incluyendo supernovas superluminosas de tipo I y II.

Las técnicas de correlación en las que se basa SNID son las de Tonry y Davis (1979). Se realiza una correlación cruzada entre el espectro de una supernova $s(n)$ con un corrimiento al rojo a modo de incógnita y un espectro modelo $t(n)$ del cual se conoce el tipo de objeto y su edad a un corrimiento al rojo cero. La correlación cruzada consiste en desplazar una de las funciones en el tiempo y calcular la integral punto por punto de ambas señales. El resultado de la integral nos indicará el grado de similitud entre las dos señales.

Por tanto, se intenta buscar la escala de la longitud de onda $(1 + z_{0s})$ que maximice la correlación cruzada, es decir $c(n) = s(n) * t(n)$.

Asumimos que $s(n)$ es un múltiplo de la función $t(n)$ pero desplazado por δ intervalos de longitud de onda logarítmicos, esto es:

$$s(n) = \alpha t(n - \delta) \quad (1)$$

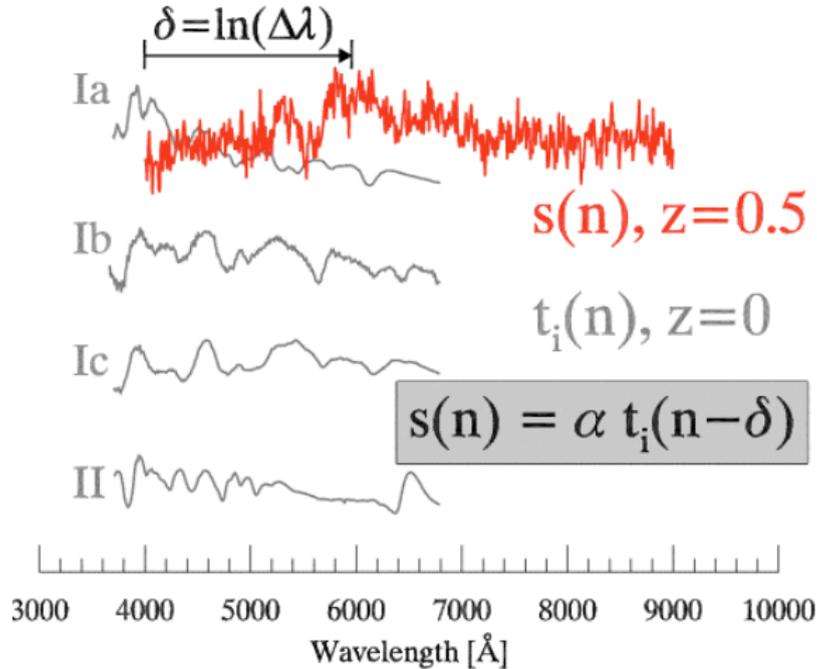


Figura 2: Correlación cruzada con un espectro de entrada $s(n)$ y las plantillas de la base de datos $t_i(n)$. Imagen de Stéphane Blondin. Seminario (03/13/2007).

con $\delta = \ln(\Delta\lambda)$.

Podemos observar este procedimiento en la figura 2.

Para facilitar el proceso computacional de este procedimiento matemático, la correlación cruzada se realiza en el espacio de Fourier. Se trabaja por tanto con las funciones $S(k)$ y $T(k)$, siendo k el número de onda.

Hemos de tener en cuenta que multiplicar el eje que representa la longitud de onda por $(1+z)$ es equivalente a agregar un cambio $\ln(1+z)$ al logaritmo neperiano del eje de longitud de onda. Se aclara por tanto que en todo el procedimiento es preferible trabajar en escala logarítmica.

II.2.1. Pre-procesamiento de los espectros

Para trabajar con los espectros se lleva a cabo el siguiente proceso antes de realizar la correlación:

- Mapear el espectro en un eje de longitud de onda logarítmica, como podemos observar en la figura 3 b).
- Eliminar el continuo³. En el caso de galaxias esto se puede realizar con ajuste de míni-

³Componente de la señal que representa la tendencia de la misma sin tener en cuenta las variaciones rápidas o fluctuaciones en la señal

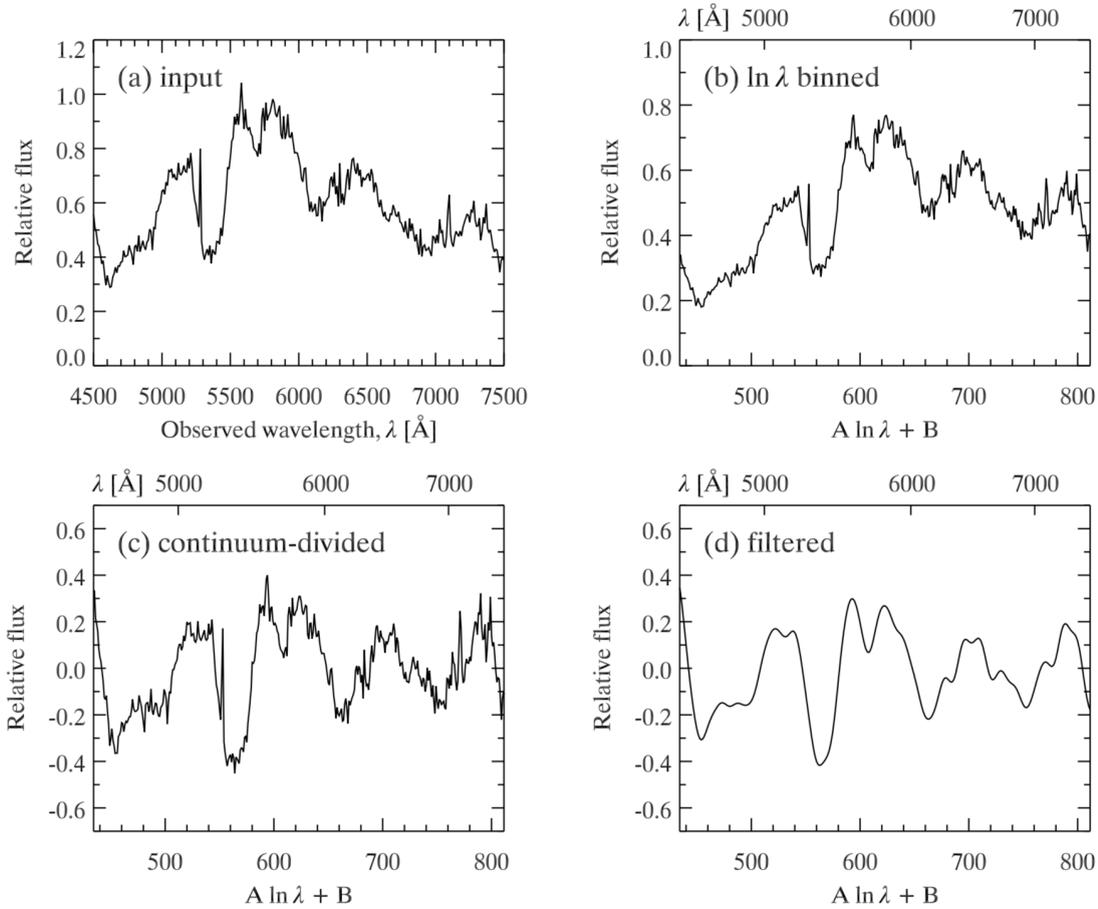


Figura 3: Pre-procesamiento de espectros. Representación de Stéphane Blondin. Determining the type, redshift, and age of supernova spectrum.

mos cuadrados pero en el caso que nos ocupa no es posible. Se recurre por tanto a un spline cúbico⁴ de 13 puntos. El resultado se normaliza para que exista una media de cero en flujo. Figura 3 c)

- Por último se aplica un filtro con el objetivo de eliminar los residuos de baja frecuencia restantes después de eliminar el continuo y el ruido de alta frecuencia. Esto lo podemos observar en la figura 3 d).

II.2.2. Estimación del desplazamiento al rojo

En esta sección se introducirán conceptos como la relación altura-ruido de correlación, parámetros relacionados con la calidad de las correlaciones y una breve explicación de la estimación del redshift hecha por SNID.

⁴Método matemático para ajustar una curva diferenciable mediante polinomios, en este caso los polinomios usados son cúbicos.

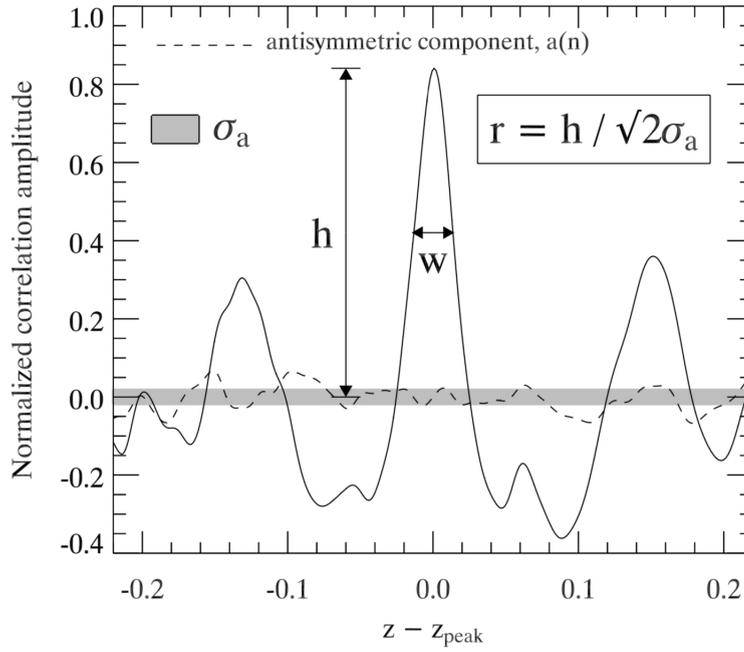


Figura 4: Parámetros de correlación empleados por SNID. Representación de Stéphane Blondin. Determining the type, redshift, and age of supernova spectrum.

- **Relación altura-ruido de correlación (r):** relación entre la altura del pico de correlación y la raíz cuadrada media de la componente antisimétrica $a(n)$ (σ_a).

$$r = \frac{h}{\sqrt{2}\sigma_a} \quad (2)$$

- **lap:** superposición de la longitud de onda en reposo entre el espectro de entrada y la plantilla, recortada en el desplazamiento al rojo de correlación. Este parámetro de superposición espectral proporciona información sobre la calidad de correlación.

$$0 \leq lap \leq \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right) \quad (3)$$

Se puede establecer como buen corrimiento al rojo cuando el parámetro lap asociado es varias veces el valor $\ln(\Delta\lambda/\lambda)$.

- **rlap:** factor de calidad que viene dado por:

$$rlap = r \times lap \quad (4)$$

Generalmente se van a descartar corrimientos al rojo de correlación que tienen asociado un lap menor que 0.4 y un factor de calidad menor que 5. Ciertamente es que este factor de calidad es variable, podemos forzar al programa para que emplee un factor de calidad menor. Pero de forma general establecemos como $rlap_{min} = 5$.

Para la estimación del redshift, SNID calcula la función de correlación para cada uno de los templates, esto es, $c_i(n) = s(n) * t_i(n)$. El conjunto de los $c_i(n)$ tendrá numerosos picos en

el espacio del redshift. El pico más alto se corresponderá, probablemente, con la estimación del redshift verdadera. Ha de tenerse en cuenta que en espectros con señal-ruido bajo algunos picos pueden superar el pico de redshift verdadero, dando por tanto un valor erróneo. Prácticamente, SNID selecciona los 10 picos más altos (etiquetados con el índice j) y realiza un ajuste con una función suave para determinar la altura h_{ij} y la posición δ_{ij} de cada uno. El redshift de la correlación se calcula como:

$$z_{ij} = \exp(\delta_{ij} d\lambda_{ln}) \quad (5)$$

donde $d\lambda_{ln}$ es el tamaño del intervalo de longitud logarítmica tomada por SNID. Posteriormente se recortan las regiones de longitud de onda de $s(n)$ y $t(n)$ que no se superponen en z_{ij} y se recalcula una nueva función de correlación recortada y se almacena su correspondiente r_{ij} , lap_{ij} y z_{ij} .

La base para determinar el error de la estimación del corrimiento al rojo, es que los picos tanto positivos como negativos de la componente antisimétrica $a(n)$ de la función de correlación $c(n)$, pueden provocar distorsión en el pico de correlación real.

Se estima que la distancia promedio entre un pico en $c(n)$ y $a(n)$ es $k_z = N/(8B)$ con N el número total de intervalos y B el número de onda más alto en la mitad del máximo de la transformada de Fourier de $c(n)$. Por tanto se puede definir un error del redshift como:

$$\epsilon_{ij} = k_z \frac{1}{1+r} \quad (6)$$

con r la relación de altura-ruido de correlación. Si se supone un ruido sinusoidal en $c(n)$, se define $k_z = N/(8B)$ con w el ancho del pico de correlación. Además se demuestra que si se añade el factor lap en la estimación del error es más robusta, quedando por tanto (Tonry & Davis 1979):

$$\epsilon_{ij} = k_z \frac{1}{1+r lap} \quad (7)$$

III. Observaciones

Resumen

A lo largo del marco teórico expuesto se han mencionado diferentes conceptos básicos que se exponen en este capítulo. Entre ellos magnitud absoluta, curva de luz, espectro, clasificación espectral respecto de una o varias fases temporales, relación señal-ruido. Todo ello referido a SN y SLSN.

Throughout the theoretical framework exposed, different basic concepts have been mentioned that are presented in this chapter. Among them absolute magnitude, light curve, spectrum, spectral classification with respect to one or several temporal phases, signal-to-noise ratio. All this referred to SN and SLSN.

III.0.1. Magnitud absoluta de una SN y de una SLSN

La magnitud absoluta, como su nombre indica, se trata de una magnitud que establece el brillo intrínseco de los objetos celestes. Para definirla requerimos del concepto previo de magnitud aparente. Este concepto procede de la necesidad de clasificar las estrellas según su brillo teniendo en cuenta que la percepción del ojo humano sigue una escala logarítmica. Se decidió que la magnitud 0 corresponde a una densidad de flujo⁵ determinada, F_0 . A partir de esta, se establecen las demás magnitudes por la ecuación:

$$m = -2,5 \log \left(\frac{F}{F_0} \right) \quad (8)$$

siendo el 2.5 una relación impuesta entre la diferencia de brillo de dos estrellas siendo una 10 veces más brillante que la otra. Del mismo modo, la relación entre dos objetos con densidad de flujo F_1 y F_2 es:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \quad (9)$$

La definición estricta de magnitud absoluta es la magnitud aparente a una distancia de 10 parsecs⁶ del objeto. La expresión básica a la que se llega es la siguiente:

$$m - M = 5 \log \left(\frac{r}{10pc} \right) \quad (10)$$

siendo r la distancia en parsec al objeto.

⁵Potencia de radiación por unidad de área [$Wm^{-2}Hz^{-1}$]

⁶1 parsec equivale a 206,265 unidades astronómicas (UA)

En el caso que nos ocupa, supernovas y supernovas superluminosas, estamos considerando magnitudes absolutas muy pequeñas, es decir, objetos muy brillantes. Para SNe la magnitud absoluta está en el rango de $-14 < M < -20$ y para SLSNe $M < -21$. Como ya se ha mencionado anteriormente estos valores no son estrictamente fijos por lo que podemos encontrar SLSN con magnitudes un poco por encima de -21 mag.

Además es de interés mencionar el concepto de magnitud bolométrica, que resulta de medir la radiación en todo el rango de longitudes de onda. En la práctica esto es casi imposible de conseguir, pues hay diferentes barreras, como puede ser la atmósfera o el polvo interestelar.

III.0.2. Curva de luz

La curva de luz se trata de una representación del brillo de un objeto frente al tiempo. Comúnmente el eje de abscisas, se representa en Modified Julian Days (MJD), mientras que el eje de ordenadas representa la magnitud absoluta. Con esta representación (no siempre), podemos hacernos a la idea de la fase del objeto que estamos analizando, es decir, si se observa cerca del pico de luz o si por el contrario se halla al inicio o al final del evento. Además tienen muchas otras utilidades, como determinar la masa total expulsada, la energía cinética de los materiales eyectados y el radio de la estrella progenitora.

La mayoría de las medidas fotométricas de las SN se realizan con filtros de banda ancha estándar U,B,V,R,I o u,g,r,i,z en la parte óptica del espectro y, frecuentemente, en el infrarrojo cercano J, H y K. Como nombramos anteriormente el término bolométrico implica una integración en todas las longitudes de onda, pero en el marco de las SN se usa las regiones de longitud de ondas UVOIR: cerca del ultravioleta, óptico e infrarrojo (cuasi-bolométrica).

Los recursos utilizados en este aspecto han sido: ALERCE ZTF Explorer⁷ y Lasair⁸. Con estos brokers⁹ se usan datos públicos de ZTF en bandas -g y -r.

III.0.3. Espectros de una SNe

Los espectros son la herramienta central de este trabajo. Podemos considerarlos las huellas dactilares de los objetos, los cuales, nos permite clasificarlos. Se trata de una representación del flujo frente a la longitud de onda. Normalmente la longitud de onda de los espectros es una longitud de onda en reposo.

III.0.4. Evolución temporal de los espectros de SNe

La fase de una supernova se define como los días transcurridos desde la luz máxima para un filtro dado. Como cabe esperar no siempre se observa una supernova desde su comienzo

⁷Broker astronómico chileno que procesa las alertas de ZTF. <https://alerce.online/?ranking=1&count=false&page=1&perPage=20&sortBy=probability&sortDesc=true>

⁸<https://lasair.roe.ac.uk>

⁹Un broker astronómico centraliza y analiza datos de varios telescopios ópticos y los pone a disposición de la comunidad astronómica.

o desde su luz máxima. Muchos eventos carecen de la curva de luz en su totalidad. Como nombraremos en la sección 3.3.1 se ha trabajado con objetos que han sido muy estudiados, como puede ser SN 2015bn, los cuales poseen bibliografía consistente y bastantes espectros con una fase bien definida. Por otra parte, se usaron objetos que carecen de bibliografía. En este caso tomamos con fase cero al primer espectro y vamos contando días según la fecha de obtención de los siguientes espectros. Por tanto, aunque la clasificación espectral de estos objetos se realice teniendo en cuenta características cerca de luz máxima, es interesante analizar la evolución de los espectros en el tiempo. En estos términos se utiliza la palabra época para determinar en que fase del evento se halla.

Hay que enfatizar que la fase de una supernova se puede dar desde dos sistemas de referencia diferentes. Tenemos la fase en términos del observador, es decir, la radiación observada desde la Tierra. Y la fase en términos del objeto de estudio, es decir, lo que observaríamos en una referencia localizada cerca del objeto. A esta última referencia se le denomina fase en reposo. Para pasar de un sistema de referencia a otro hay que introducir el concepto de redshift.

El desplazamiento al rojo, como su nombre indica, se trata del desplazamiento al rojo de la luz emitida por objetos lejanos. Esto ocurre al transmitirse la luz a través del espacio en expansión. La luz que emiten objetos que se alejan de nosotros se ve modificada con un aumento de la longitud de onda, y por ende, una disminución de la frecuencia.

El redshift lo podemos calcular por tanto en términos de la longitud de onda y en términos de la frecuencia:

$$z = \frac{\lambda_{observador} - \lambda_{reposo}}{\lambda_{reposo}} \quad (11)$$

Despejando obtenemos la relación entre el sistema de referencia del observador y el sistema de referencia del objeto:

$$\lambda_{reposo} = \frac{\lambda_{observador}}{(1 + z)} \quad (12)$$

III.0.5. Relación señal-ruido

La relación señal-ruido establece cuan buena es una medida comparando la componente que queremos medir con el ruido que posee. Una relación señal-ruido alta indica que la señal es fuerte comparada con el ruido. Esta medida puede tomarse como buena. Por el contrario, una señal-ruido baja indica que la señal es débil comparada con el ruido. Esta medida se toma como mala. Este concepto se ha tenido en cuenta a lo largo del trabajo dado que no todos los espectros de objetos tienen una señal-ruido buena. Estas consideraciones nos ayudan analizar de una manera más efectiva determinados espectros.

IV. Desarrollo práctico

Resumen

El desarrollo práctico se ha realizado en procesos bien diferenciados. Primeramente se ha llevado a cabo una comprensión del área de estudio y fijación de los objetivos. En este paso se ha realizado la instalación del programa en ordenadores del Centro de Cálculo de Astrofísica (CCA) y realizado el primer contacto con los repositorios públicos de espectros de SNe y otros objetos que se nombrarán a continuación. Una vez realizada esta toma de contacto se ha comenzado a extraer los datos, en este caso espectros, para a posteriori procesarlos. El proceso de limpieza y procesamiento consistió en crear plantillas en formato SNID y representarlas para corroborar que se han generado adecuadamente. Por último, se ha realizado un proceso de prueba de la base de datos en la que se han analizado con SNID los espectros de los que se generaron las plantillas por la propia base de datos para corroborar que ajustan consigo mismos de forma adecuada.

The practical development has been carried out in well differentiated processes. Firstly, an understanding of the study area and setting of the objectives have been carried out. In this step, the installation of the program in CCA computers has been carried out and the first contact with the public repositories of spectra that will be named below has been made. Once this contact has been made, the data has begun to be extracted, in this case spectra, for subsequent processing. The cleaning and processing process consisted of creating templates in SNID format and representing them to verify that they have been generated properly. Finally, a database testing process has been carried out in which the spectra from which the templates are generated by the database itself have been analyzed with SNID verify that they match themselves properly.

IV.1. Instalación de SNID y familiarización con repositorios públicos de espectros

Como cualquier inicio en el desarrollo de un trabajo, la primera etapa consiste en la familiarización con las herramientas de trabajo. El primer paso fue llevar a cabo la instalación de SNID¹⁰, donde ampliamos su uso para la posible clasificación de SLSN de tipo I y II. El código cuenta con un manual en el que se indica paso a paso cómo llevar a cabo esta instalación y las diferentes funciones del mismo.

Para la creación de la base de datos se han usado diferentes repositorios de espectros públicos de SNe. De estos repositorios se ha podido obtener espectros de diferentes objetos, así como tablas con diferentes parámetros de los mismos. Los espectros vienen dados en ficheros constituidos por dos columnas, flujo frente a longitud de onda. Cabe mencionar que en algunos ficheros aparecen más datos como es el caso de errores en el flujo. Estos datos extra no serán necesarios en nuestro trabajo. Los ficheros se utilizarán para crear las plantillas que constituirán la base de datos. Los principales repositorios utilizados han sido los siguientes:

¹⁰<https://people.lam.fr/blondin.stephane/software/snid/>

- Transient Name Server (TNS):

La guía de trabajo ha sido Transient Name Server (TNS)¹¹. Aquí se pueden realizar búsquedas de numerosos objetos, y en el caso que nos ocupa, de supernovae. Se han realizado tres bloques de búsquedas: SNe reportadas del grupo FLEET, SLSN-I y SLSN-II reportadas por otros grupos. El listado de objetos que aparecen en estas búsquedas son las constituyentes de la base de datos. Estos repositorios poseen diversas herramientas para pre-visualizar los espectros de cada objeto. A estas representaciones de los espectros se le pueden superponer líneas de emisión y de absorción de diferentes elementos y las principales líneas observadas en galaxias. Esto nos ayuda, a posteriori, a realizar diferentes análisis de los espectros que estamos estudiando a medida que vamos creando la base de datos. También aparecen más datos como el grupo que reporta el objeto, la fecha de descubrimiento, coordenadas, redshift, tipo y en ocasiones artículos que hacen referencia a dicho objeto.

- Weizmann Interactive Supernova Data Repository (WiSeREP):

Esta segunda herramienta ha servido de ayuda para agilizar el proceso de extracción de datos. Se trata de un repositorio muy similar a TNS, pero que además proporciona tablas csv con los datos de los espectros de cada objeto. Esto nos ha permitido automatizar ciertas partes del trabajo con un programa de Python. Además WiSeREP¹², en ocasiones, cuenta con más espectros que TNS. Es por ello que todos los espectros se han descargado desde aquí.

Como complemento se han consultado brokers como ALeRCE y Lasair para analizar las curvas de luz de los objetos. Este proceso es importante a la hora de determinar la fase de los objetos.

IV.2. Familiarización con la sintaxis y funciones de SNID

Tanto el uso como la sintaxis de SNID son muy simples. Hemos de tener en cuenta que para trabajar con el programa hacemos uso de la terminal de la computadora, pues no posee una consola como tal. En la instalación se añade una ruta hacia la que por defecto SNID va a apuntar para usar las plantillas espectrales. Por tanto en esta localización debemos guardar nuestras plantillas si queremos que por defecto use las mismas. Aún así, SNID cuenta con numerosas funciones y entre ellas una que sirve para apuntar hacia otra ruta. Esto hace mucho mas fácil el trabajo, pues podemos tener diferentes carpetas con *templates* y llamar la que nos interese para trabajar.

La sintaxis de SNID es la siguiente:

```
snid opcion1=... opcion2=... espectro.txt
```

¹¹<https://www.wis-tns.org/>

¹²<https://www.wiserep.org/>

Para ajustar con SNID el espectro que nos interesa clasificar debemos estar en el directorio en el que se halla. Una vez estamos en esa localización con esta simple sintaxis podemos analizarlo con nuestra base de datos y obtener la mejor correlación y por ende una posible clasificación. En la carpeta en la que se hallan los *templates* debemos crear un fichero ASCII de nombre *templist* con el nombre de todas las plantillas que conforman la base de datos. SNID lee este fichero y serán estas las plantillas que use para la correlación. Esto es muy útil pues si queremos descartar una plantilla simplemente con borrarla de este fichero no se hará uso de ella aunque el *template* de la misma siga permaneciendo en el directorio.

En cuanto a las opciones se pueden añadir varias seguidas de un igual y la especificación que queremos.

A continuación nombraré las principales opciones que he utilizado para el desarrollo del trabajo. SNID posee muchas funciones más que se pueden consultar en el manual¹³.

Opción	Descripción
<i>tempdir=</i>	Señala otra ruta que no sea la puesta por defecto en la instalación
<i>wmin=</i>	Establece el mínimo de longitud de onda en el que queremos que trabaje
<i>wmax=</i>	Establece el máximo de longitud de onda en el que queremos que trabaje
<i>use=</i>	Usa un template determinado
<i>usetype=</i>	Usa solo los templates de objetos de un determinado tipo
<i>avoid=</i>	Omite el template seleccionado
<i>avoidtype=</i>	Omite los templates de objetos de un determinado tipo
<i>rlapmin=</i>	Establece el valor mínimo del rlap
<i>forcez=</i>	Fuerza a realizar una correlación en un determinado redshift

Tabla 1: Opciones que proporciona SNID

El parámetro *rlap*, como hemos nombrado anteriormente, es un parámetro de calidad que cuanto mayor sea mayor es la calidad de la correlación. El valor máximo es 5 por tanto a medida que disminuimos este valor estamos bajando calidad a la correlación.

Una vez analizamos un espectro con la base de datos obtenemos unos resultados de salida con las siguientes características como podemos observar en la figura 5.

Primeramente se indican todos los templates leídos que, como señalamos anteriormente, son los que hemos incluido en el fichero *templist*. Posteriormente se indican los espectros cargados además de los templates. Debemos tener en cuenta que un solo template puede contener varios espectros de un mismo objeto.

Posteriormente, SNID realiza una correlación entre el espectro de entrada, en este ejemplo *sn2003jo.dat*, y cada uno de los 1515 espectros de las plantillas. Se seleccionan los 10 mejores picos en cada función de correlación, lo que da un total de 15150 picos. Luego, se determina el corrimiento al rojo correspondiente a cada pico. Posteriormente, se recortan los espectros de entrada y de plantilla para que coincidan con ese corrimiento al rojo y se calcula el parámetro

¹³<https://people.lam.fr/blondin.stephane/software/snid/howto.html>

```

                                SNID RESULTS
-----
SuperNova Identification (SNID v5.0, 24 Aug 2007)
-----
Searching in redshift range: -0.010 1.200 ; rlapmin = 5.00
Restricting to age range: -90.0 1000.0
Restricting to delta range: -10.0 99.9
Reading data file: sn2003jo.dat
Restricting to wavelength range: 4335.2 8915.3
Reading template files...agn kcE kcS0 kcSB1 kcSB2 kcSB3 kcSB4 kcSB5
kcSB6 kcSa kcSb kcSc lbv01ac lbv03hy lbv99bw mstar sn00E sn00H sn00cx
sn01e1 sn02ap sn02bo sn02cx sn02er sn02ic sn03cg sn03du sn03fg sn04S
sn04aw sn04dj sn04eo sn04et sn05bf sn05cs sn05gj sn05hj sn05hk sn05k1
sn06aj sn06bp sn06gz sn79C sn80K sn81B sn83N sn83V sn84L sn86G sn87A
sn88L sn89B sn90B sn90I sn90K sn90N sn90O sn90U sn90aa sn91A sn91M
sn91N sn91T sn91ar sn91bg sn92A sn92H sn92ar sn93J sn93ac sn94D sn94I
sn94M sn94Q sn94S sn94T sn94ae sn95D sn95E sn95F sn95ac sn95al sn95bd
sn96C sn96L sn96X sn96cb sn97br sn97cn sn97cy sn97dc sn97dd sn97dq
sn97ef sn97ei sn98S sn98T sn98aq sn98bu sn98bw sn98dt sn99aa sn99ac
sn99aw sn99by sn99di sn99dn sn99ee sn99em sn99ex sn99gi done
Loaded 1515 spectra out of 111 templates
Searching all correlation peaks... done
Initial redshift estimate: z = 0.532
Do you want to enter a new redshift? (y/n) [n]:

No. Temp/Misc Type Subtype Redshift Age
-----
Best-match template(s):
  1 sn99ee Ia Ia-norm 0.528 (0.005) 7.1
NOTE: the top 65 ( 1) templates have same type (subtype)
-----
Best type(s):
[fraction]
  1 100.0% Ia --- 0.531 (0.008) 0.8 ( 4.6)
[slope]
NOTE: all null slopes
-----
Best subtype(s):
[fraction]
  1 92.3% Ia Ia-norm 0.530 (0.008) 0.6 ( 4.8)
[slope]
  1 0.040 Ia Ia-91T 0.536 (0.005) 1.9 ( 1.9)
-----
NOTE: Favoured type is: Ia, but there is no favoured subtype
Hit <CR> to view template listings, or (q)uit listings and move on:

```

Figura 5: Output de SNID. Imagen de la página Web Supernova Identification (SNID). <https://people.lam.fr/blondin.stephane/software/snid/>.

de vuelta correspondiente. Si el valor de lap es mayor o igual que lap_{min} , el corrimiento al rojo se guarda. Finalmente, SNID estima el corrimiento al rojo inicial calculando la mediana ponderada de $rlap$ de todas las correlaciones de corrimiento al rojo con $lap \geq lap_{min}$. Luego, informa este valor por pantalla. En caso de no encontrarse buenos picos de correlación (todos los $lap < lap_{min}$), SNID entrega un redshift igual a cero.

Por otra parte tenemos dos opciones para forzar al programa a hacer un proceso de correlación a un determinado redshift. Tenemos la opción *forcez=* con la que establecemos un redshift inicial. SNID omite la estimación inicial de este y usa un dato de entrada dado por el usuario para recortar y correlacionar los espectros en este corrimiento al rojo. Sino añadimos esta opción, SNID por defecto te pregunta si estás de acuerdo con el redshift estimado y te da la opción de cambiarlo. En este caso el programa hace una segunda ronda de correlaciones, recortando los espectros de entrada y las plantillas de modo que se superpongan en el redshift puesto por el usuario.

IV.3. Proceso de creación de una plantilla en formato SNID

Como hemos nombrado anteriormente la base de datos está constituida por una serie de plantillas en un formato de SNID, concretamente ficheros con terminación ".lnw". Para la creación de una plantilla en SNID se siguen los siguientes pasos:

- Creación de un fichero *logwave.txt* con los datos necesarios.
- Proceso *logwave* y representación de nuestra plantilla creada (*plotlnw*)

IV.3.1. Creación de un fichero *logwave.txt* con los datos necesarios.

El primer paso consiste en crear un fichero .txt con los datos que se muestran en la tabla2. Estos datos los obtenemos de los repositorios públicos nombrados anteriormente (TNS y WiseRep).

El primer dato es el nombre del objeto. Uno de los métodos que se usa para asignar a las SNe un nombre es establecer el año en el que se reportó seguida de letras en orden alfabético. Las letras se van añadiendo a medida que se van reportando objetos a lo largo del año.

El segundo dato es el tipo de objeto. Tenemos las siguientes opciones: I-a, I-b, Ic, II, NotSN, SLSN-I y SLSN-II. Se puede añadir una especificación mayor a la hora de designar el tipo, por ejemplo en el caso de las de tipo Ia puede añadirse Ia-norm, Ia-91T, Ia-91bg, Ia-csm, Ia-pec. Nuestra base de datos está conformada en su mayoría por SLSN-I y SLSN-II. Filename, como su nombre indica, es el nombre del fichero que contiene el espectro.

Objeto	Type	Filename	Age	Ageflag	Delta	AB	Waverange	Redshift
SN 2019itq	SLSN I	...	0.0	1	-9.99	0	3.7808e+03/1.047e+04	0.481

Tabla 2: Fichero .txt para crear las plantillas en formato SNID

El siguiente dato es la fase. Este proceso es más tedioso, pues es difícil de determinar la fase de una supernova con solo observar la curva de luz. En este proceso tenemos dos casos bien diferenciados: los objetos que tienen una fase bien definida y por tanto existen publicaciones de las que podemos obtener su valor; y los objetos que no han sido estudiados que no poseen publicaciones.

1. **Objetos con publicación bibliográfica:** El repositorio de WISEReP proporciona un documento .csv con numerosos datos, entre ellos el nombre del documento de publicaciones que analizan el objeto. Una vez encontramos una publicación, revisamos el documento y comparamos las fases mostradas en el documento con las que salen en la tabla csv. Normalmente los objetos con publicación poseen numerosos espectros en diferentes fases, es por ello que para acelerar el proceso se ha utilizado un programa de Python con el objetivo de obtener las fases de una manera inmediata. En este caso había que asegurarse de encontrar el mismo espectro en la tabla que en el documento bibliográfico para tomarlo como referencia. Una vez tenemos esta fase, el programa calculaba el resto dado que la tabla .csv posee una columna con la fecha de cada espectro en días julianos. Hay que tener en cuenta que salen más espectros en la tabla que en la bibliografía, pues en estas publicaciones solo se analizan los espectros de mayor interés. Una vez Python calcula las fases se revisa la publicación para testear que las fases han salido correctamente.

En este proceso cabe destacar que, en el fichero logwave, debemos poner el valor 0 en el parámetro ageflag. Este parámetro indica que se toma la fase desde la luz máxima del objeto. Se puede consultar en los anexos los objetos con bibliografía y su referencia.

2. **Objetos sin publicación bibliográfica:** Debido a la carencia de información de estos objetos, no hay gran cantidad de publicaciones. Esto hace que la mayoría de objetos introducidos en la base de datos tengan una fase que no está contrastada bibliográficamente.

En este caso se toma el primer espectro con fase cero. A partir de este se establecen las fases de los siguientes contabilizando los días que han transcurrido de un espectro a otro. Hay que tener en cuenta que debemos modificar esta diferencia pues son datos tomados desde el sistema del observador, nosotros. Para ello se ha utilizado la siguiente expresión:

$$(1 + z) = \frac{F_{observador}}{F_{reposito}}$$

siendo z el redshift del objeto y F la fase tomada desde diferentes sistemas.

Posteriormente, tenemos la tasa de variación en magnitud por unidad de tiempo de las SNe. Este parámetro no lo hemos tenido en cuenta, por lo que todos nuestros objetos tienen el valor -9.99 que lo establece como nulo. La séptima columna denota si el espectro de entrada está en magnitudes AB, denotándolo con un 1, o lo contrario denotándolo con un 0.

La octava y novena columna poseen el rango de longitud de onda de cada espectro. Es decir, se establece la longitud de onda mínima y la longitud de onda máxima de cada espectro. Por último, en la décima columna se establece el corrimiento al rojo de la plantilla.

IV.3.2. Proceso logwave y representación de nuestra plantilla creada (plotlnw)

Este proceso es muy simple pues con usar la sintaxis siguiente obtenemos nuestras plantillas:

```
logwave logwave.txt
```

El procedimiento más sencillo es estar ubicados en la carpeta que posee los ficheros que queremos transformar al formato de SNID. En esta misma ubicación se guardan todas las plantillas creadas.

El siguiente paso es la comprobación de un correcto funcionamiento de todo este proceso. Para ello se puede representar la plantilla creada con el comando `plotlnw` obteniendo una representación de todos los espectros pertenecientes a ese objeto. Como podemos observar en la siguiente imagen 6.

Cuando tengamos todas nuestras plantillas creadas debemos guardarlas en el directorio que hemos nombrado al que apunta SNID, o por el contrario en un directorio a parte al cual llamaremos con el comando `tempdir=`. Es muy importante añadir un fichero con el nombre `templist`. Este fichero debe contener el nombre de todas las plantillas que quieres usar para usar tus correlaciones. Es decir, si el nombre de una plantilla no aparece en este fichero, SNID no la usará para la correlación.

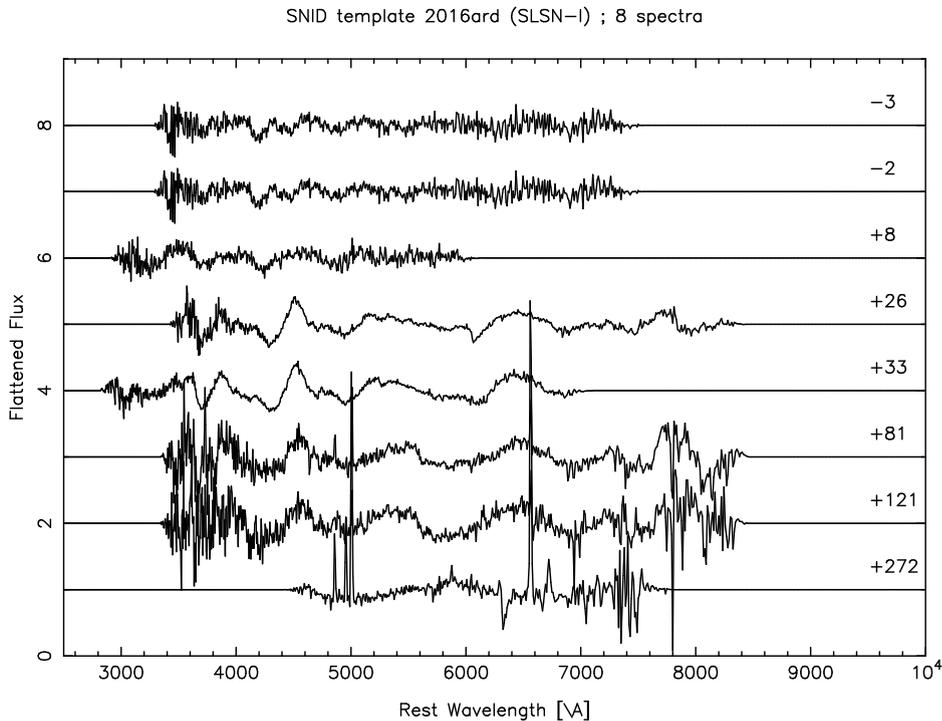


Figura 6: Representación de la plantilla de la SLSN-I 2016ard.lnw

IV.4. Creación de plantillas de SNe del grupo FLEET, SLSN-I y SLSN-II reportadas en TNS por otros grupos

Este proceso es el grueso de este trabajo. El desarrollo del mismo se ha llevado a cabo en tres grandes bloques:

1. Creación de plantillas de objetos clasificados por FLEET.
2. Creación de plantillas de SLSN-I reportadas en TNS por otros grupos.
3. Creación de plantillas de SLSN-II reportadas en TNS por otros grupos.

El primer proceso de creación de templates ha sido un proceso puramente manual. Se han seleccionado los objetos reportados a TNS por el grupo FLEET. Estos objetos han sido supernovas de tipo Ia, Ib y SLSN-I. Todo este proceso ha servido para familiarizarme con la creación de plantillas. Una vez realizado este proceso se han creado todas las plantillas de SLSN-I y SLSN-II reportados hasta 2022 aproximadamente. Se ha obtenido un total de 179 plantillas con 450 espectros (figura 7).

Es cierto que a la hora de unir todas las plantillas en un directorio para usarlo como base de datos, se han encontrado problemas en el proceso de prueba. Se explicará más en detalle a continuación.



Figura 7: Número de espectros y de plantillas

Como podemos observar en la figura 9b la mayor parte de objetos de la base de datos posee un redshift en el rango de 0 a 0.1. Por otra parte tenemos un valor de redshift máximo de 0.67 por parte del objeto SN2019fy de tipo SLSN-I. Debemos tener presente que es interesante observar objetos que poseen un alto corrimiento al rojo pues nos permiten estudiar etapas tempranas del Universo. Pueden ser muy útiles para corroborar modelos cosmológicos contrastando parámetros como la expansión del mismo y la energía que posee.

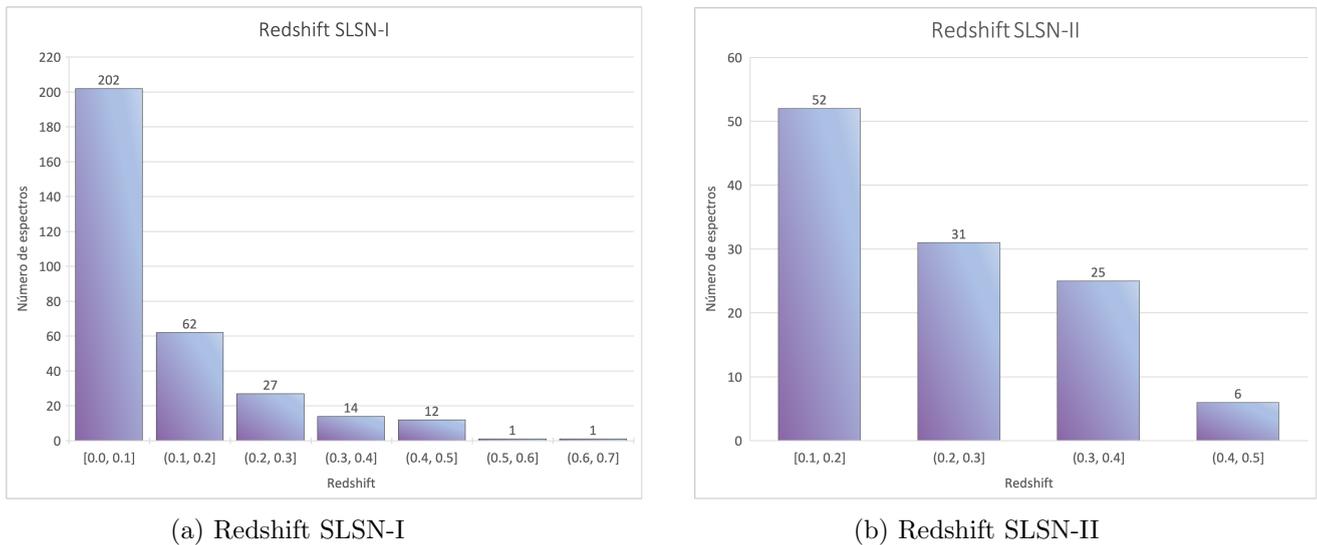


Figura 8: Histogramas de desplazamiento al rojo de SLSN-I y SLSN-II

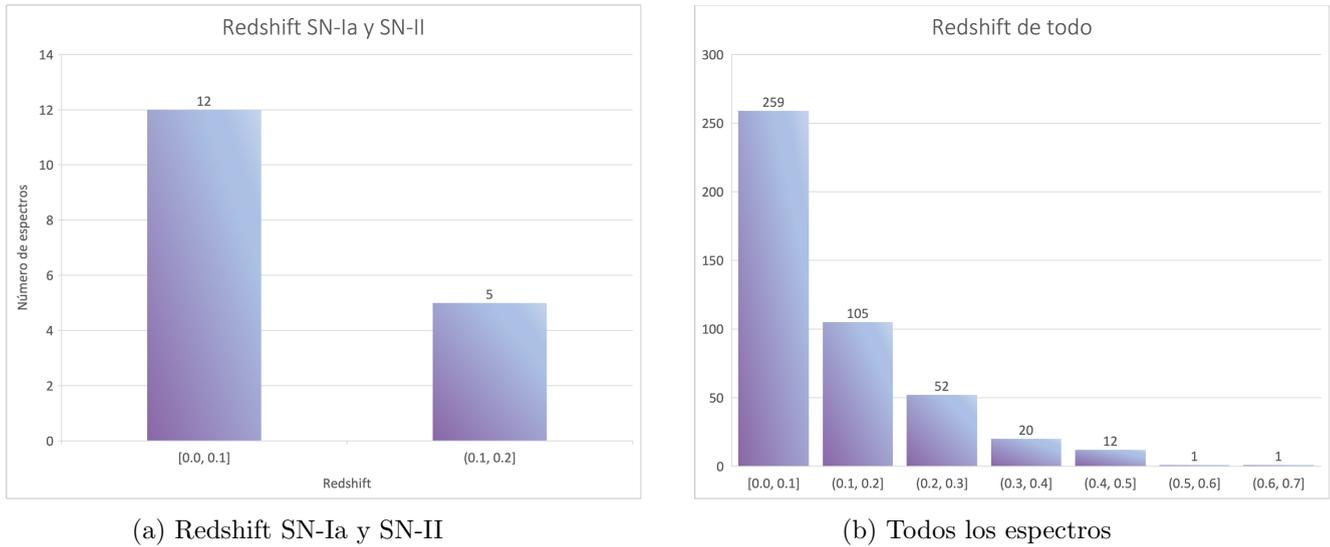


Figura 9: Histogramas de desplazamiento al rojo de SN-Ia, SN-II y global

Como se puede observar en la figura 10 la mayor parte de espectros se encuentra cerca de la luz máxima. Esto es así porque nuestra base de datos está compuesta en su mayoría por objetos que no poseen bibliografía, aparte de los reportes de clasificación de TNS. Como se ha explicado en la sección IV.3.1 estos objetos se toman con fase cero. Si existen varios espectros de un mismo objeto se contabilizan los días desde el primer espectro. Podemos llegar a suponer que este hecho genera una gran inconsistencia a la hora de clasificar nuevos objetos. Lo cierto es que el peso de una buena clasificación se basa en las estructuras presentes en los espectros. Podría generarse cierta confusión entre los espectros tardíos de las SLSN-I y los espectros de SLSN-II.

Por otra parte, cabe mencionar que en el proceso de descarga de espectros en WISeREP este incluye, en determinados casos, espectros de las galaxias anfitrionas de las SNe. Estos espectros suelen hallarse al final del documento .csv y tienen fases muy altas. Este hecho es lógico pues cuando nos alejamos de la luz máxima de la SLSN esta disminuye notablemente su brillo. Por ende, es posible observar otras estructuras como puede ser una galaxia cercana. Como podemos observar en la figura 10 tenemos 16 espectros con fases mayores a 300 días. Estos espectros posiblemente posean estructuras provenientes de SLSN y de la Galaxia anfitriona o cercana. Analizaremos alguno de estos casos en las siguientes secciones.

En la figura 11 se representa el redshift frente la fase en días de los objetos. Puede observarse, una vez más, que casi todos los objetos que conforman la base de datos se encuentran a un redshift de entre 0.1 y 0.2. También se puede observar nuevamente en esta representación el objeto de redshift más alto que comentamos en la figura 9b. Además podemos distinguir un objeto con una fase muy alta, concretamente 747 días. Se comentará más adelante la fase de este objeto (SN2019stc).

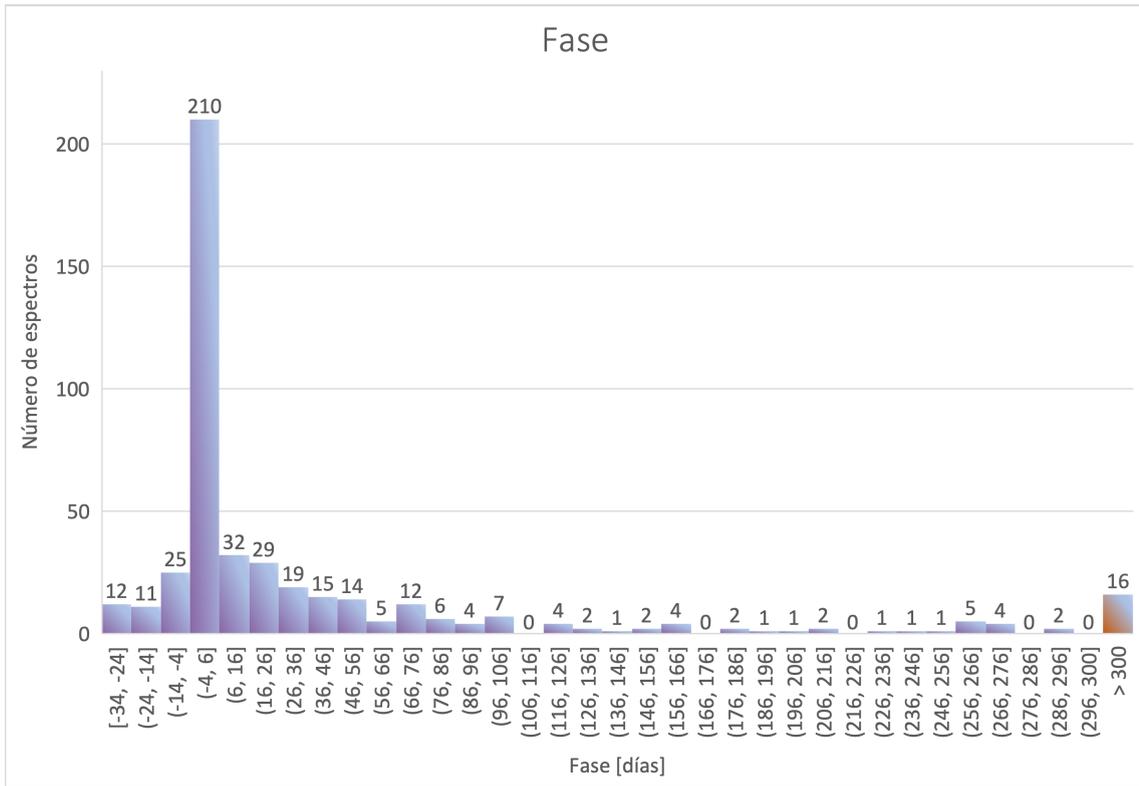


Figura 10: Fase de los espectros

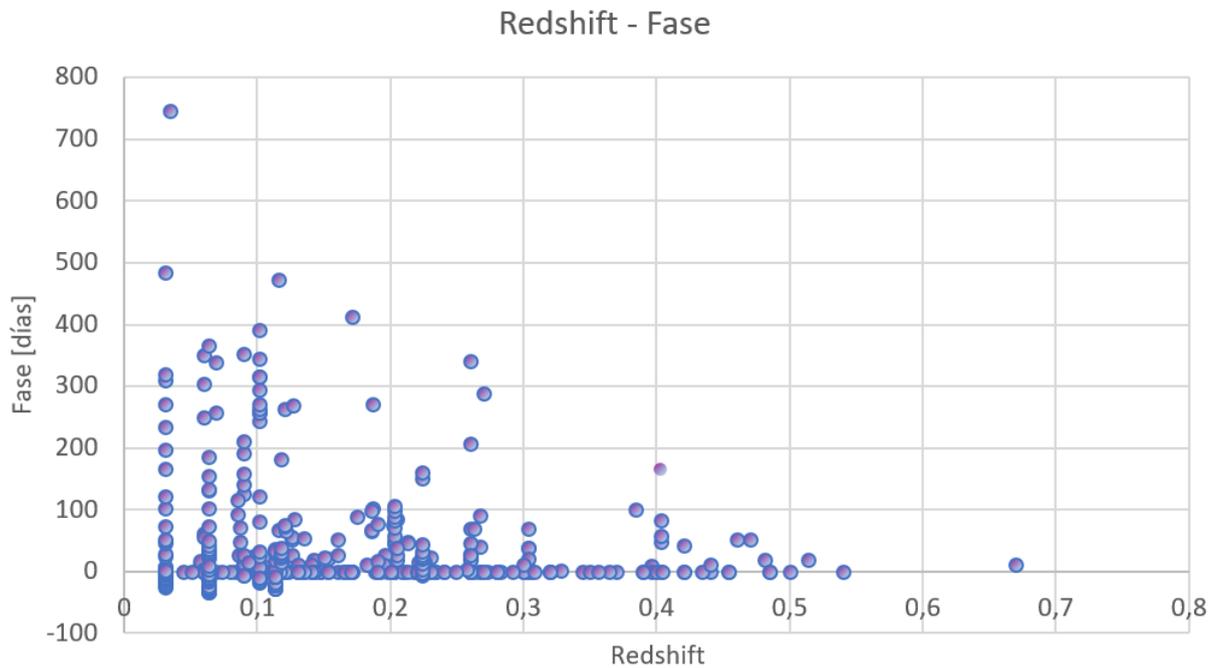


Figura 11: Redshift-Fase

Por otra parte es interesante analizar el rango de longitud de onda en el que se ha estado trabajando. En la figura 12 se representa la longitud de onda mínima y máxima para cada objeto. Cada pareja de puntos alineados corresponde a un mismo objeto. Por tanto, con esta representación podemos hacernos una idea del rango espectral en reposo. Este rango se encuentra entre los 2000 Å y 10000 Å. Es decir, la gran mayoría de SNe se halla en el rango visible. No perdamos de vista que se trata de longitud de onda en reposo.

Cuando tenemos objetos a redshift altos observamos mejor la parte azul de los espectros, de forma opuesta nos desplazamos hacia la parte roja del visible si tenemos redshift más bajos.

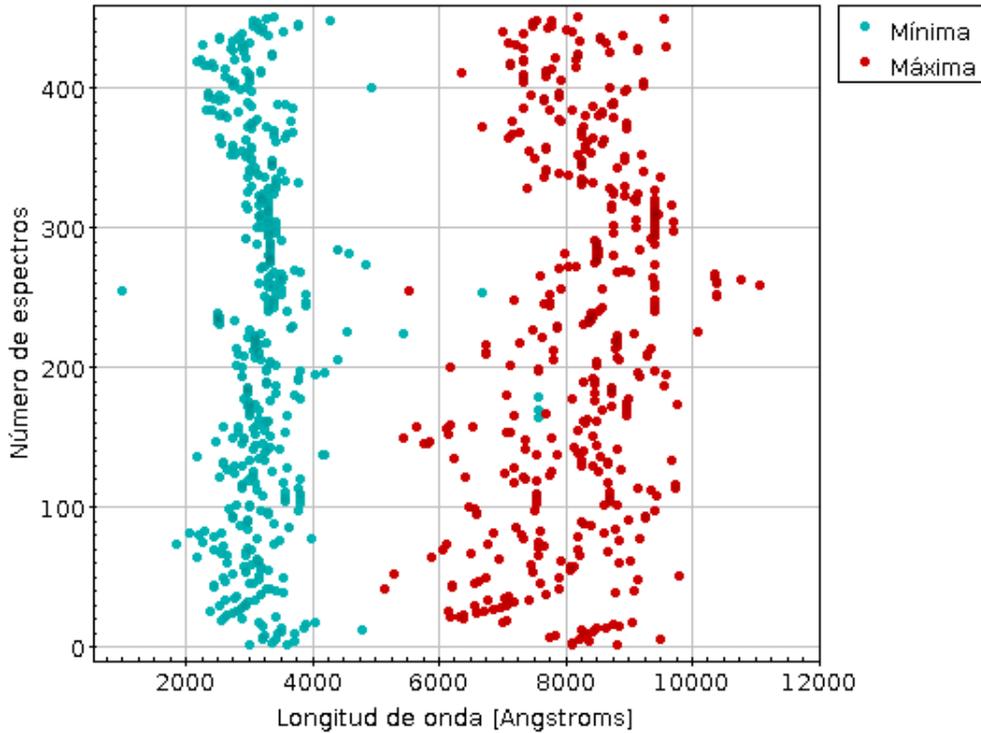


Figura 12: Longitud de onda mínima y máxima en reposo de los espectros.

IV.5. Testeando errores y proceso de prueba.

Si hacemos un análisis del desarrollo de este proyecto se distingue de forma clara la línea de trabajo. Comenzamos por la comprensión del área de estudio y fijación de los objetivos. Continuamos con la recopilación de los datos necesarios y organización de los mismos y, por último, hemos llegado al procesamiento y limpieza de los datos.

Una vez creadas todas las plantillas se ha corroborado que se han generado de manera correcta. Para ello, hemos empleado un proceso de testeado representando cada una de ellas con la opción de SNID de *plot.lnw*. Como cualquier base de datos con una considerable extensión se han encontrado ficheros defectuosos. Para ello se ha hecho una revisión de todas las plantillas, eliminando estas columnas de datos erróneas, eliminando cabeceras problemáticas, etc. Un ejemplo de estos casos es el que se representa en la figura 13. En este espectro podemos

suponer erróneamente que la línea que aparece entorno a los 6400 y 6600 angstroms sea una línea de absorción. Lo cierto es que es sospechoso que llegue a flujo cero, por lo que concluimos que hay datos defectuosos. En la figura 14 se representa el espectro una vez corregido.

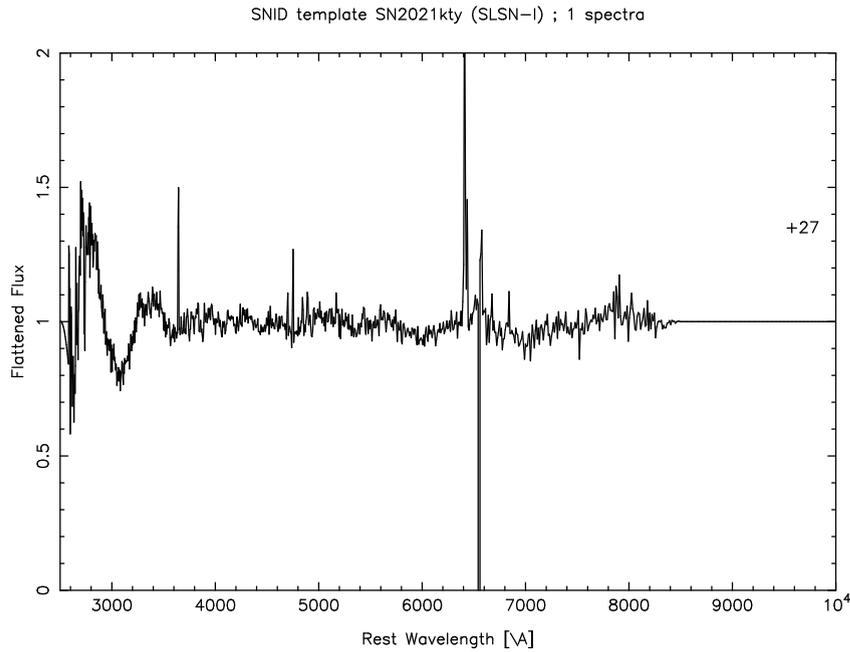


Figura 13: Representación de la plantilla defectuosa de la SLSN-I 2021kty.lnw

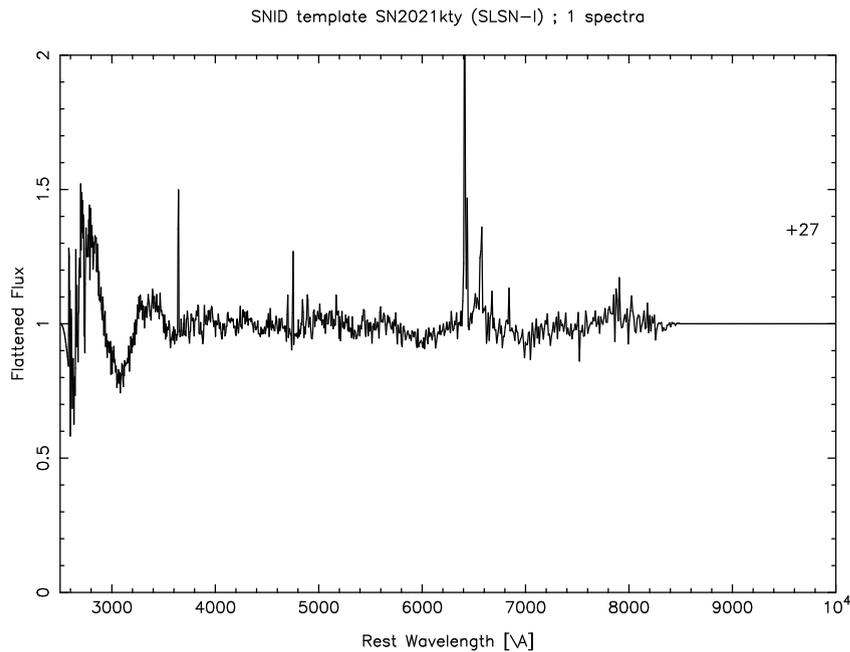


Figura 14: Representación de la plantilla corregida de la SLSN-I 2021kty.lnw

Posteriormente, una vez nos hemos asegurado de tener las plantillas correctamente creadas, debemos ver si la base de datos funciona de una manera adecuada. Este proceso es más complejo pues debemos comprender mediante muchas pruebas si la base de datos está funcionando bien, y si no hay sesgos en el conjunto de los mismos. Para ello se han analizado los espectros con la base de datos para ver si encontraban su correspondiente plantilla. Por lo general todos los espectros son bien clasificados, es decir, la base de datos apunta a su propia plantilla. Pero hay determinados casos en los que el programa toma como mejor ajuste la plantilla de otro objeto. Esto posiblemente sea por el ruido existente en el comienzo de determinados espectros. Se contempla para trabajos futuros hacer una limpieza del ruido de los espectros que constituyen las plantillas de la base de datos.

Para ir corrigiendo y puliendo la base de datos se ha llevado a cabo otro proceso y es usar un fichero `tfirstlist.txt` que indica al programa cuales son los objetos de fase desconocida. Es decir, los objetos en los que hemos establecido fase cero para el primer espectro y contabilizado los días que han pasado para los siguientes. En este fichero se deben incluir el nombre de los objetos y la fecha del primer espectro.

Por otra parte a veces existen ficheros que tienen picos que deseamos omitir. En este caso puede crearse una "máscara", esto consiste en crear un fichero `.txt` en el que se pongan los rangos de longitud de onda que deseamos omitir. Posteriormente, sin más que usar una de las opciones de SNID, podremos omitir los rangos deseados. La sintaxis concreta es la siguiente:

```
snid wmask=dirección-directorio/snid.wmask spec1.dat
```

siendo `snid.mask` el fichero en cuestión que nos determina la restricción de longitud de onda y `spec1.dat` el espectro que queremos analizar con SNID.

Cabe mencionar en esta sección los espectros que se corresponden con Galaxias. Como se ha llevado a cabo un testeo de todas las plantillas, esto me ha permitido entender la evolución espectral de determinados objetos hasta fases muy altas.

Por ejemplo en el objeto SN2019stc (figura 15) se observan líneas de emisión típicas de formación estelar en galaxias a partir de los 15 días después de la luz máxima entorno a los 5000 Angstroms. Para corroborar que se tratan de líneas provenientes de una Galaxia se ha usado la herramienta proporcionada por WISeREP. Esta herramienta nos permite representar solapadas a los espectros líneas espectrales de interés, como pueden ser las líneas de hidrógeno, de helio, o en este caso las líneas de galaxias.

Las SNe no poseen las denominadas líneas prohibidas. Estas líneas espectrales se tratan de líneas de emisión en los espectros provenientes de ciertas nebulosas y regiones de formación estelar. Las líneas prohibidas más brillantes son [OII], [OIII], [NII] y [SII].

Por otra parte, analizando este plot, hemos observado algo anómalo. Fijándonos en el último espectro con fase 747 días, distinguimos estructuras espectrales que para una fase tan alta son raras de visualizar. Además en el espectro anterior estas estructuras parecen haber disminuido. Se ha llegado a la conclusión de que debe haber un fallo de fecha en este espectro descargado de WISeREP. Este espectro tiene como fecha 18/02/2022, sería más coherente pensar que se trata de un espectro con fecha 18/02/2020, teniendo por tanto una fase de 93

días.

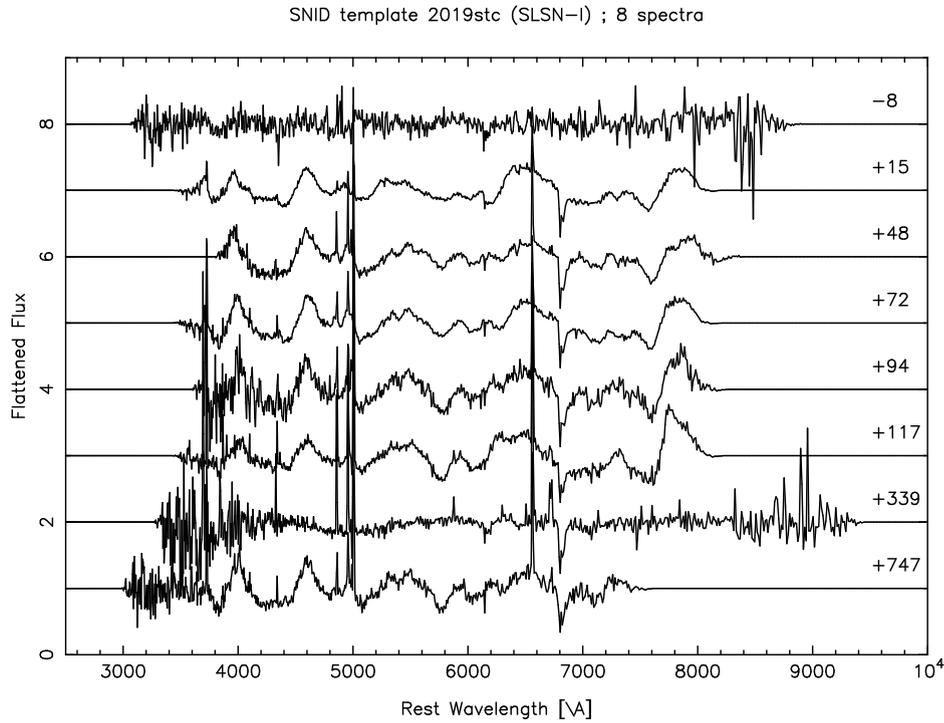


Figura 15: Representación de la plantilla SLSN-I 2019stc.lnw

V. Clasificación y uso de la base de datos

Resumen

En este capítulo se llega al objetivo fundamental del proyecto, clasificar un objeto según su espectro con la base de datos de SNID ampliada. Se ha procedido a clasificar el objeto 2023cmx y a mostrar los resultados generados por SNID. Para ello se han usado dos espectros, uno del 12/03/2023 y otro del 02/04/2023. Para este objeto se posee la curva de luz, la cual nos permite ajustar un poco más su fase. Este objeto a sido reportado y clasificado en TNS por el grupo SGLF constituido por los tutores de este proyecto, y más miembros, en cuyas investigaciones de clasificación de supernovas superluminosas y de otros tipos de supernovas he participado.

In this chapter the fundamental objective of the project is reached, to classify an object according to its spectrum with the created database. We have proceeded to classify the 2023cmx object and show the results generated by SNID. For this, two spectra have been used, one from 03/12/2023 and another from 04/02/2023. For this object we have the light curve, which allows us to adjust its phase a little more. This object has been reported and classified in

TNS by the SGLF group made up of the tutors of this project, and more members, of which they have made me participate.

V.1. Mejoras de la base de datos

SNID posee una base de datos por defecto. Esta base de datos está constituida únicamente por supernovas de tipo Ia, Ib, Ic, IIn y alguna galaxia (se puede observar en anexos). Además, por parte de uno de los tutores de este proyecto el Dr. Frédéric Poidevin, tenemos a disposición otra base de datos nombrada como templates-3.0 que poseen 517 plantillas y 5177 espectros. Esta base de datos es un conjunto entre la base de datos por defecto descargada junto a SNID, datos adicionales proporcionados por la proporcionados por Sephane Blondin en el sitio Web de SNID un conjunto de datos de acceso libre mencionados en el artículo de de Quimby et al.(2018). Esto hace que tengamos a nuestra disposición bastantes datos para hacer una clasificación consistente. La base de datos creada en este trabajo están constituidas en su mayoría por SLSN-I y SLSN-II. Esto nos ha llevado a ampliar un poco más la base de datos anterior, suministrando por tanto una herramientas para analizar y comprender mejor la naturaleza de estos objetos.

V.2. Clasificación

Este proceso es el más interesante y el objetivo del proyecto. Tanto el Dr. Frédéric Poidevin como el Prof. Ismael Pérez Fournon, tutores de este trabajo, están inmersos en una serie de proyectos de investigación entorno a estos objetos (SLSN). Como se ha nombrado anteriormente TNS es un repositorio público en el que se van reportando objetos a lo largo del año. Los tutores han hecho un trabajo continuado de observación de candidatas a superluminosas y, en caso de ser un objeto de interés, se ha llevado a cabo un análisis más exhaustivo. Se han ido reportando y clasificando objetos a lo largo del año. Para ello se ha usado la herramienta de SNID que con ayuda de esta nueva base, constituida por plantillas de SLSN-I y SLSN-II se ha podido contrastar la clasificación de nuevos objetos o la reclasificación de otros.

V.3. SN 2023cmx

La fuente transitoria AT 2023cmx fue reportada a TNS el 24/02/2023 por Pérez-Fournon y Poidevin (2023), del grupo “Supernovae and Gravitational Lenses Follow up” (SGLF), a partir de observaciones realizadas con uno de los telescopios de 1m del Observatorio Las Cumbres, con el nombre original SGLF LCOGT 7. Posteriormente, fue reportada la detección de esta fuente por el proyecto ATLAS, con el nombre ATLAS23csk, por ZTF, con el nombre ZTF23aaccacy y por el satélite Gaia, con el nombre Gaia23bdm. La evolución de la curva de luz conjunta de estas observaciones y la asociación con una galaxia débil de los cartografiados SDSS y DESI Legacy Imaging Surveys indicaron que AT 2023cmx podía ser una nueva supernova superluminosa. AT 2023cmx fue seleccionada para ser observada con el Alhambra

```

SNID RESULTS
No.  Temp/Misc  Type      Subtype    Redshift    Age
=====
Best-match template(s):
  1  SN2018ffj   SLSN      SLSN-I     0.233 (0.004)  0.8
NOTE: the top      7 (      7 ) templates have same type (subtype)
-----
Best type(s):
[fraction]
  1  100.0%     SLSN      ---         0.229 (0.002) -14.5 ( 11.0)
[slope]
NOTE: all null slopes
-----
Best subtype(s):
[fraction]
  1  100.0%     SLSN      SLSN-I     0.229 (0.002) -14.5 ( 11.0)
[slope]
NOTE: all null slopes
=====
OK! Favoured type and subtype are: SLSN  SLSN-I

```

Figura 16: Resultados de la clasificación del espectro con fecha de 12/03/2023 de 2023cmx

Faint Object Spectrograph and Camera (ALFOSC) del Nordic Optical Telescope (NOT) del Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) en la isla de La Palma. AT 2023cmx fue observada en la noche del 12/03/2023, clasificada como SLSN-I a $z = 0.24$ y reportada la clasificación a TNS el 17/03/2023 por Poidevin et al. (2023) en nombre del grupo de trabajo de SGLF sobre SLSN, en el que participo. Una vez reportada la clasificación a TNS, el nombre oficial de esta fuente transitoria cambió a SN 2023cmx. Esta es la primera supernova superluminosa descubierta en 2023. Posteriormente, SN 2023cmx fue observada por otro grupo el 02/04/2023 con el “Intermediate Dispersion Spectrograph” (IDS) del telescopio Isaac Newton (INT), también situado en el ORM, que confirmó la clasificación como SLSN-I a un redshift algo más bajo, $z = 0.22$ (Barwell et al. 2023).

Parte del trabajo ha consistido en analizar estos espectros y corroborar si la base de datos hace una buena clasificación de este objeto. No obstante, no debemos olvidar que SNID puede proporcionar clasificaciones erróneas por lo que hay que hacer un análisis exhaustivo y contrastar las evidencias.

Por tanto, para la clasificación de este objeto se cuenta con dos espectros, uno con fecha 12/03/2023 en el que fue observada, y otro con fecha 02/04/2023. Los resultados de SNID para el espectro del 12/03/2023 son los que se muestran en la figura 16. La primera línea muestra el mejor match realizado por el programa, en este caso una SLSN-I llamada SN2018ffj. La estimación del redshift es 0.233 ± 0.004 con una fase de 0.8 días después del máximo. La nota nos indica que las mejores 7 correlaciones son del mismo tipo, en este caso SLSN. Estas 7 mejores correlaciones son las que se nos representan en la consola para corroborar que las estructuras coinciden.

Las siguientes dos filas muestran el mejor tipo y subtipo con el que se correlaciona este

espectro. Esto se realiza de dos maneras : [fraction] la fracción más alta de estructuras que se corresponden a un tipo con $rlap \geq rlapmin$ y [slope] el mayor aumento de fracción con el aumento del $rlap$.

Podemos observar que con una correspondencia del 100 % de plantillas con $rlap \geq rlapmin$ el mejor tipo se trata de una SLSN. Por otra parte, para estas 7 mejores correlaciones, se estima un corrimiento al rojo medio 0.229 con un error de 0.02. Además se estima una fase media de -14.5 días antes del máximo y con una desviación de 11 días. Por último se muestran por pantalla la fracción de la mejor correlación en cuanto al subtipo, en este caso SLSN-I.

A continuación mostramos en la figura17la representación del mejor match realizado por SNID. Se muestra por pantalla la representación del espectro a clasificar (flujo frente a longitud de onda observada y en reposo) y en rojo la mejor correlación suavizada (todo esto se explica en más detalle en la sección II.2). El mejor objeto con el que se ajusta es 2018ffj.

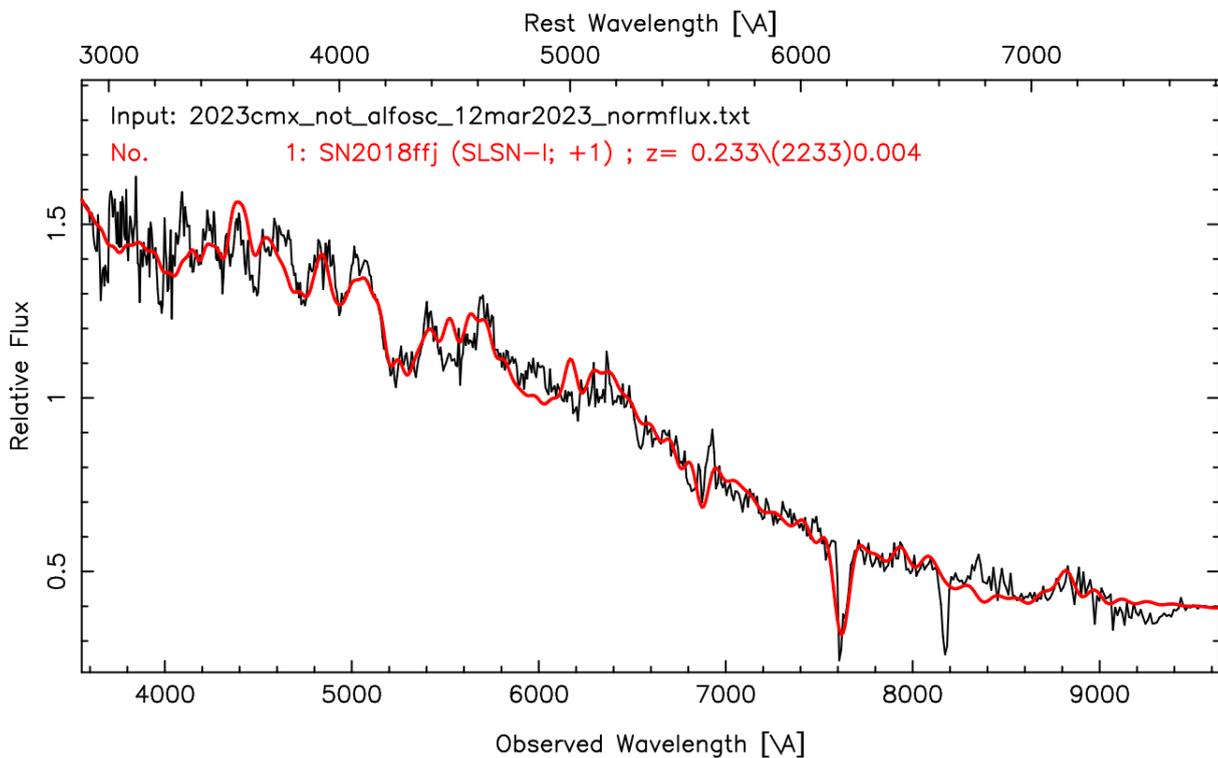


Figura 17: Representación del mejor ajuste en la clasificación de 2023cmx (espectro obtenido por nuestro grupo con el espectrógrafo ALFOSC del NOT el 12/03/2023)

Además SNID nos proporciona diferentes herramientas, entre ellas, una representación del redshift frente al factor $rlap$ (figura 18). En esta representación podemos observar la densidad de correlaciones en base a su factor de calidad. En este caso en concreto vemos que entorno a un desplazamiento al rojo de 0.2 y 0.3 hay bastantes ajustes con un factor de calidad mayor que 4, valores bastante buenos.

Si disponemos de la curva de luz del objeto, y podemos medianamente localizar el máximo, se puede realizar una clasificación más rigurosa con SNID. En el caso que nos ocupa, tenemos la curva de luz proporcionada por ALeRCE ZTF Explorer. Podemos localizar en la curva de luz la fecha de nuestro espectro y fijar un rango de fases en el que tiene que estar nuestra clasificación (figura 19). En la curva de luz podemos estimar que nuestro espectro se halla entorno a los 25 y 35 días antes del máximo. Por lo que se ha analizado el espectro nuevamente por SNID estipulando un rango de fases de [-40,-10] días entorno al máximo. Se ha reducido a 4 el número de plantillas con mejor match. El objeto al que mejor se ajusta sigue siendo SN2018ffj, pero esta vez nos presenta una fase media de -27.1 ± 3.9 . El redshift medio es 0.230 ± 0.002 . La representación del flujo se muestra en la figura 21 (Se puede consultar la salida de los datos de esta correlación en los anexos22).

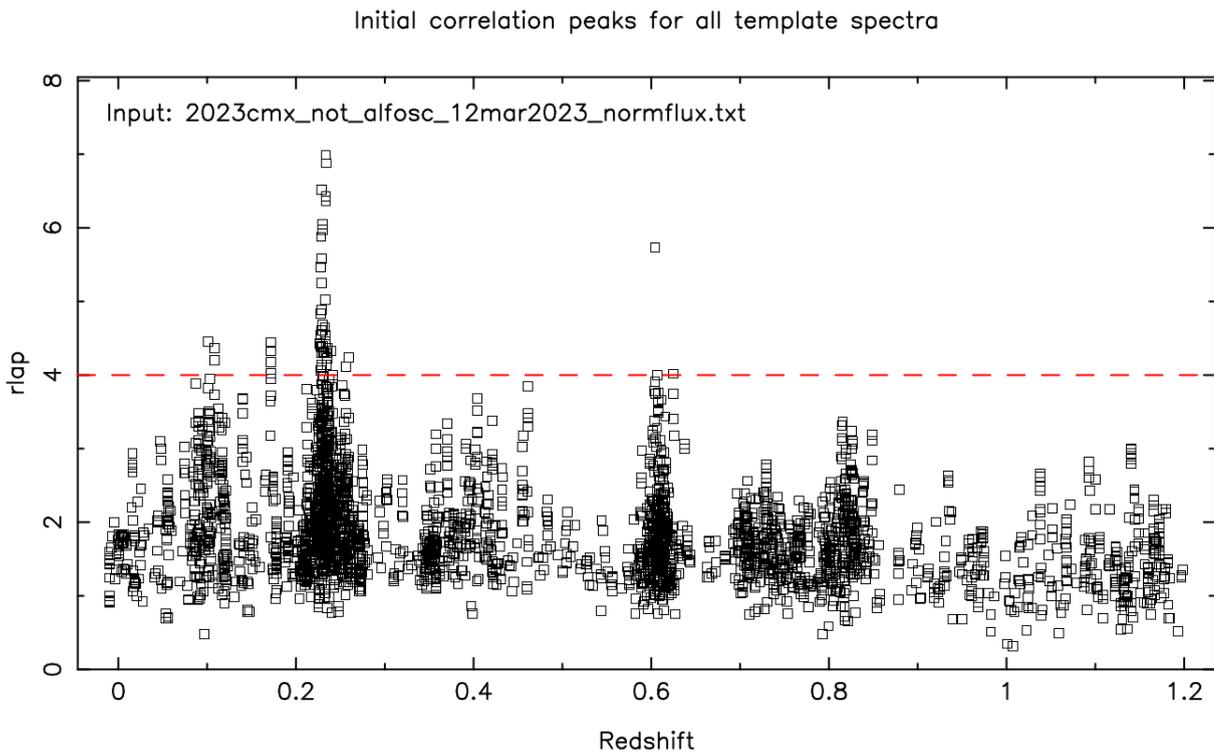


Figura 18: Rlap vs desplazamiento al rojo de la clasificación del espectro de 2023cmx (12/03/2023)

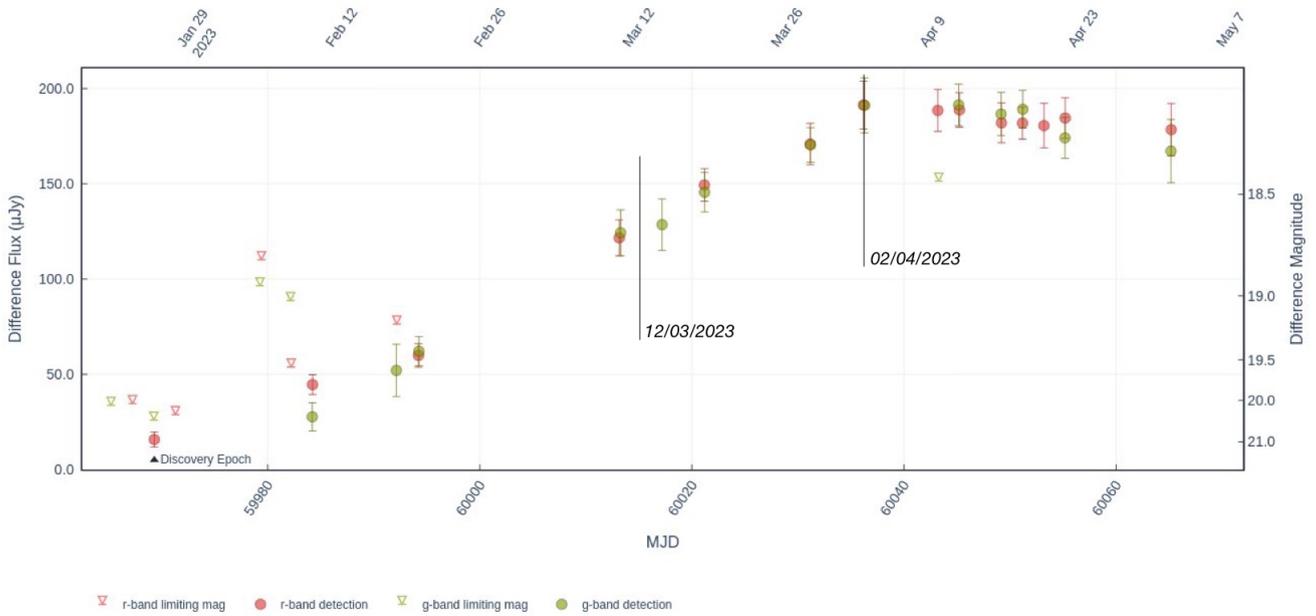


Figura 19: Curva de luz de 2023cmx. Imagen de Lasair.

Esta segunda correlación ajusta de una manera más certera el redshift y la fase de nuestro espectro, que hemos podido corroborar con la curva de luz.

La segunda parte del análisis ha sido analizar el espectro obtenido de TNS con fecha 02/04/2023. Es decir, tenemos un espectro 21 días más tarde del que acabamos de analizar. Vamos a establecer un rango de fases estimado de $[-15,10]$ días entorno al máximo. Se obtiene como resultado un total de 7 plantillas de mejor correlación, el mejor ajuste se establece con 2015bn. Este objeto también apareció en los mejores ajustes del análisis del espectro anterior. SNID nos estima un redshift medio de 0.229 ± 0.003 y una fase de -2 ± 6.7 días.

A pesar de que SNID busca las mejores correlaciones con las plantillas no debemos quedarnos con el primer match propuesto. Muchas veces hay plantillas que no tiene un rlap factor tan bueno pero presentan estructuras o partes del espectro que se correlacionan muy bien. Por otra parte, a veces encontramos espectros que a su comienzo presentan mucho ruido y hay problemas para dar con la mejor correlación.

SN 2023cmx es la primera SLSN reportada a TNS en 2023. La segunda, 2023aec, también fue clasificada por nuestro grupo SGLG y reportada a TNS (Poidevin et al. 2023)

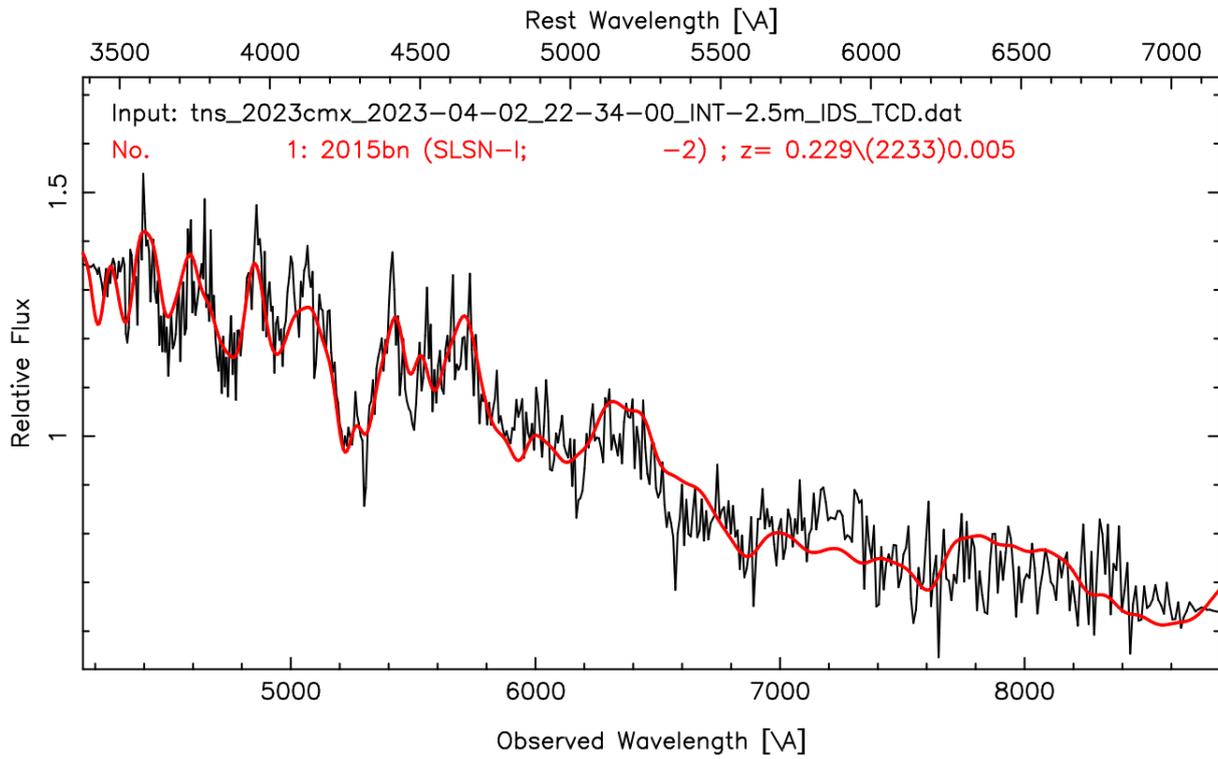


Figura 20: Representación del mejor ajuste en la clasificación de 2023cmx (02/04/2023).

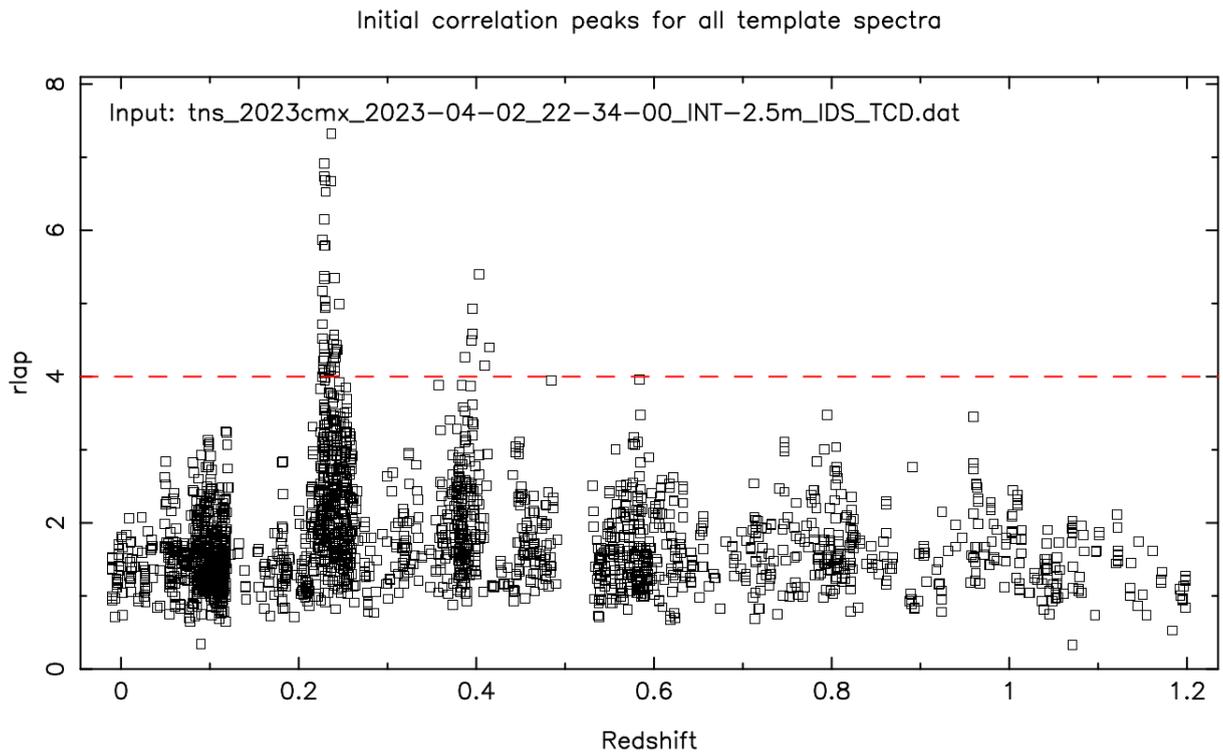


Figura 21: Redshift vs rlap de la clasificación del espectro de 2023cmx (12/03/2023).

VI. Conclusiones

Resumen

Debido al avance tecnológico estamos sujetos a un procesamiento masivo de datos. Cada vez tenemos mejores telescopios con mejores prestaciones. La creación de buenas bases de datos espectroscópicas nos permitirán interpretar mejor fenómenos del Universo, como son las SLSN. El objetivo de este proyecto ha sido contribuir a la recopilación de espectros de estos objetos en repositorios públicos para mejorar la clasificación de otras SLSNe con el programa SNID

Due to technological advances we are subject to massive data processing. We have better and better telescopes with better capabilities. The creation of good spectroscopic databases will allow us to better interpret the phenomena of the Universe, such as the SLSN. The objective of this project has been to contribute to the collection of spectra of these objects in public repositories, to improve the classification of other SLSNe with SNID.

A lo largo de todo el proyecto se ha seguido una línea clara y concisa de pasos para crear la base de datos. En el mundo del análisis de datos este proceso se conoce como KDD (Knowledge Discovered in Databases). Este proceso está constituido por los siguientes pasos fundamentales: comprensión del área de estudio y fijación de los objetivos; recopilación de datos; limpieza y procesamiento de datos; minería de datos (implementación de un modelo de clasificación); interpretación y análisis y utilización del modelo obtenido para la obtención de conocimiento.

Este tipo de trabajo cada vez está siendo más necesario en el ámbito de la ciencia, en particular de la astrofísica observacional. Se predice un incremento masivo de datos, los cuales necesitamos procesar y entender. Un ejemplo de ello es el uso de instalaciones nuevas de observación como por ejemplo, el Telescopio Espacial James Webb, el Observatorio Rubin, el Telescopio espacial Euclid y el Telescopio Espacial Roman. Las predicciones para estos proyectos son detectar supernovas superluminosas a desplazamientos al rojo muy elevados. Se espera además descubrir nuevos tipos de transitorios como las supernovas de inestabilidad de pares, las cuales no se han observado a un desplazamiento al rojo bajo. Es decir, se espera obtener una recopilación masiva de datos entorno a las supernovae en las etapas más tempranas del Universo.

La creación de bases de datos y repositorios públicos ayudará a sistematizar toda esta información y además contribuir a la creación y comprensión de modelos cosmológicos.

Concluyendo con el trabajo realizado, podemos decir que se ha contribuido generando una base de datos de SLSN-I y SLSN-II. Estos objetos extremadamente brillantes aún albergan procesos desconocidos y no se comprende bien su naturaleza. Mediante líneas y determinadas estructuras espectrales se está intentando comprender los procesos y condiciones físicas que hacen posible la existencia de estos objetos.

Referencias

- [1] Gal-Yam, A. (2019). The most luminous supernovae. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57(1), 305–333. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051819>
- [2] Blondin, S. (s/f). How to classify spectra of exploding stars. Harvard.edu. Recuperado el 9 de julio de 2023, de https://hea-www.harvard.edu/astrostat/Stat310MM_VI_VII/sb_20070313.pdf
- [3] Blondin, S., & Tonry, J. L. (2007). Determining the type, redshift, and age of a supernova spectrum. *The Astrophysical Journal*, 666(2), 1024–1047. <https://doi.org/10.1086/520494>
- [4] Blondin, S., & Tonry, J. L. (2007). Determining the type, redshift, and age of a supernova spectrum. *The Astrophysical Journal*, 666(2), 1024–1047. <https://doi.org/10.1086/520494>
- [5] Branch, D., & Wheeler, J. C. (2017). *Supernova explosions* (1a ed.). Springer.
- [6] Search / Transient Name Server. (n.d.). <https://www.wis-tns.org/search>
- [6] Home / WISeREP. (n.d.). <https://www.wiserep.org/>
- [7] Lasair. A UK Alert Stream Broker and Transient Science Platform. (n.d.). <https://lasair-ztf.lsst.ac.uk/>

VII. ANEXOS: SNe añadidas

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
SN2021aeaj	Ia	0.0	3639.061543	10617.82996	0.205
SN2021abjs	Ia	0.0	4176.214772	9382.889146	0.16
SN2020oqy	Ia	0.0	3823.633125	9211.896052	0.135
SN2021ren	Ia	0.0	4178.36216	9380.605877	0.121
SN2021zqa	Ia	0.0	3824.359869	9210.852041	0.12
SN2021wkg	Ia	0.0	3599.762085	10648.06646	0.12
SN2021jmm	II	0.0	3824.028393	9212.025099	0.19
SN2021uuz	II	0.0	3824.637109	9211.727649	0.175
SN2021owc	II	0.0	4193.65446	9360.273407	0.127
SN2021jtu	II	0.0	3824.237343	9212.308231	0.113
SN2020hvw	II	0.0	3823.378118	9212.846431	0.093
SN2020tyk	II	5.0	5198.05236712612	8975.88329288081	0.087
SN2020tyk	II	0.0	3825.044262	9211.714889	0.087
SN2021osr	II	14.0	4195.344109	9363.225395	0.08545
SN2021osr	II	0.0	3502.7125763908834	9588.596975344004	0.08545
SN2021srg	II	0.0	4167.3744	9350.890136	0.069
SN2021stu	II	0.0	4186.87663	9344.152262	0.034
SN2019otl	SLSN-I	0.0	4760.337943	10599.06236	0.514
SN2019itq	SLSN-I	0.0	3780.895505	10473.15255	0.481
SN2021txk	SLSN-I	0.0	4204.613643	9313.498732	0.46
SN2020xgd	SLSN-I	0.0	4972.47176250328	8976.68329288081	0.454
SN2020xgd	SLSN-I	14.0	3825.033257	9212.55904	0.454
SN2021ejo	SLSN-I	0.0	3824.275516	9211.743596	0.44
SN2020jii	SLSN-I	0.0	3824.655113	9212.35215	0.396
SN2019zeu	SLSN-I	0.0	3318.616829	8537.544159	0.39
SN2019zbv	SLSN-I	0.0	3825.348212	9211.421728	0.37
SN2019sgh	SLSN-I	0.0	3824.315132	9212.128581	0.344
SN2021xfu	SLSN-I	0.0	3824.737416	9213.009953	0.32
SN2016inl	SLSN-I	12.0	3291.76871734562	8557.36161061159	0.3057
SN2021gtr	SLSN-I	0.0	3824.442884	9211.050871	0.303
SN2021yrp	SLSN-I	0.0	3825.272665	9212.004473	0.3
SN2020myh	SLSN-I	0.0	3824.694	9211.79265	0.283
SN2018fd	SLSN-I	0.0	3310.186254	8557.70442	0.263
SN2021hpc	SLSN-I	0.0	3824.436502	9212.324236	0.24
SN2020adkm	SLSN-I	0.0	3410.71124450026	8637.93003357111	0.226
SN2020abjc	SLSN-I	0.0	3411.53315125364	8640.59586570311	0.219
SN2019xaq	SLSN-I	0.0	3824.594172	9211.197289	0.2
SN2021vuw	SLSN-I	0.0	3823.813424	9210.914628	0.2
SN2018cxa	SLSN-I	0.0	4200.035383	10457.7791	0.19
SN2019pvs	SLSN-I	0.0	4000.017666	10583.89346	0.167
SN2019ujb	SLSN-I	0.0	3824.032732	9211.281526	0.1647
SN2020onb	SLSN-I	0.0	3824.419949	5939.804722	0.153

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
SN2016aj	SLSN-I	0.0	3642.04785156	9237.22745228	0.485
SN2016aj	SLSN-I	0.2222	3642.04785156	9237.22745228	0.485
SN2016els	SLSN-I	0.0	3640.04785156	9235.22745228	0.217
SN2017dwh	SLSN-I	0.0	3473.13671875	7414.26615047456	0.13
SN2017jan	SLSN-I	0.0	3642.04785156	9237.22745228	0.396
SN2018bgv	SLSN-I	0.0	3400.0	9872.29192280771	0.08
SN2018bym	SLSN-I	0.0	3270.839046	8555.546332	0.267
SN2018bym	SLSN-I	43.3379	4500.125534	9997.141823	0.267
SN2018don	SLSN-I	0.0	3400.0	10500.4	0.0735
SN2018fcg	SLSN-I	0.0	3000.0	5820.0	0.101
SN2018ffj	SLSN-I	0.0	3640.04785156	9235.22745228	0.234
SN2018ffj	SLSN-I	0.7617	3640.04785156	9235.22745228	0.234
SN2018ffs	SLSN-I	0.0	3776.7	9223.3	0.142
SN2018ffs	SLSN-I	12.0240	3640.3818359375	9236.085081100471	0.142
SN2018ffs	SLSN-I	12.0240	3640.3818359375	9236.085081100471	0.142
SN2018gft	SLSN-I	0.0	3600.0	10000.425	0.23
SN2018gkz	SLSN-I	0.0	3776.7	9223.3	0.24
SN2018ibb	SLSN-I	0.0	3078.2207	10307.653	0.166
SN2018ibb	SLSN-I	11.9257	3636.0478515625	9231.227452278148	0.166
SN2018kyt	SLSN-I	0.0	3500.0	9999.55	0.108
SN2018lfe	SLSN-I	0.0	4220.020729	9391.876159	0.35
SN2018lzv	SLSN-I	0.0	3111.6119	8446.2228	0.434
SN2018lzw	SLSN-I	0.0	3500.916	9999.511	0.32
SN2019j	SLSN-I	0.0	3299.8	9199.8	0.12
SN2019cca	SLSN-I	0.0	3634.04785156	9229.22745228	0.42
SN2019cdt	SLSN-I	0.0	3400.0	10000.2	0.153
SN2019cwu	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.4	0.32
SN2019dlr	SLSN-I	0.0	3094.2539	10306.373	0.26
SN2019enz	SLSN-I	0.0	3642.04785156	9237.22745228	0.22
SN2019eot	SLSN-I	0.0	3400.0	10000.2	0.3057
SN2019fiy	SLSN-I	0.0	3100.535	10236.302	0.67
SN2019gfm	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.4	0.182
SN2019gqi	SLSN-I	0.0	3069.6765	10307.443	0.3642
SN2019hcc	SLSN-I	0.0	3644.0478515625	9239.2274522781	0.044
SN2019hge	SLSN-I	0.0	3400.0	10000.5	0.09
SN2019hge	SLSN-I	48.2482	4351.3666992188	8000.2753171921	0.09
SN2019hno	SLSN-I	0.0	3090.8284	10306.971	0.26
SN2019kcy	SLSN-I	0.0	3100.527	10236.323	0.4
SN2019kwq	SLSN-I	0.0	3075.4419	10307.216	0.5
SN2019kws	SLSN-I	0.0	3076.6362	10307.217	0.1977
SN2019kwt	SLSN-I	0.0	3106.2524	10306.4	0.3562
SN2019lsq	SLSN-I	0.0	3400.0	10000.2	0.14
SN2019neq	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.4	0.1075
SN2019neq	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.4	0.1075

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
SN2019nhs	SLSN-I	0.0	3400.0	10000.2	0.19
SN2019pud	SLSN-I	0.0	3776.7	9223.3	0.1136
SN2019pud	SLSN-I	3.6229	3299.8	9199.8	0.1136
SN2019pud	SLSN-I	3.6234	3299.8	9199.8	0.1136
SN2019pud	SLSN-I	60.9851	3300.0	9999.902058	0.1136
SN2019pud	SLSN-I	249.9093	3061.4641	10301.886	0.1136
SN2019pud	SLSN-I	303.6862	3060.4209	10303.167	0.1136
SN2019pud	SLSN-I	350.2838	3063.1919	10305.634	0.1136
SN2019szu	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.4	0.213
SN2019szu	SLSN-I	0.2404	4020.0	7994.4	0.213
SN2019unb	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.4	0.064
SN2019unb	SLSN-I	55.5866	3400.0	10000.2	0.064
SN2019aamp	SLSN-I	0.0	3776.7	9223.3	0.404
SN2020ank	SLSN-I	0.0	3659.5185546875	7891.3786439896	0.22
SN2020ank	SLSN-I	0.3559	3400.0	10500.4	0.22
SN2020exj	SLSN-I	0.0	3400.0	10000.275	0.133
SN2020jhm	SLSN-I	0.0	4029.2	7994.4	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	3.0292	3776.7	9223.3	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	11.1698	4020.0	7994.4	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	11.6736	3776.7	9223.3	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	14.3085	3776.7	9223.3	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	17.3340	3400.0	10000.275	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	27.3953	4029.2	7994.4	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	27.6708	4029.2	7994.4	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	30.4698	3776.7	9223.3	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	45.4792	3300.0	9898.115300000001	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	65.9707	4001.715930678528	9688.041565772812	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	68.2415	3075.8752	10304.356	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	98.2736	3067.9365	10302.097	0.06
SN2020jhm	SLSN-I	262.7538	3063.8088	10306.121	0.06
SN2020rmv	SLSN-I	0.0	3911.9504	9125.96874999999	0.27
SN2020tcw	SLSN-I	0.0	3776.7	9223.3	0.0645
SN2020uew	SLSN-I	0.0	3650.0483	9245.227457046518	0.224
SN2020uew	SLSN-I	23.0449	4650.0	9002.8564453124	0.224
SN2020vpg	SLSN-I	0.0	3824.00439	9214.19140624995	0.257
SN2020xga	SLSN-I	0.0	3658.3818	9254.085081100471	0.44
SN2020zbf	SLSN-I	0.0	3653.0478	9248.22745228	0.195
SN2020adkm	SLSN-I	0.0	3410.7112	8637.93003357111	0.226
SN2021ek	SLSN-I	0.0	3650.04833	9245.227457046518	0.19
SN2021bnw	SLSN-I	0.0	3650.0483	9245.227457046518	0.0861
SN2021een	SLSN-I	0.0	3069.7517	10303.566	0.16
SN2021fpl	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.4	0.115
SN2021hpx	SLSN-I	0.0	3500.4782714844	10000.623581648	0.213
SN2021kty	SLSN-I	0.0	3300.7276618291	9999.8360337274	0.186

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
SN2021kty	SLSN-I	27.3149	3061.9248	10294.718	0.186
SN2021kty	SLSN-I	51.6732	3059.209	10294.475	0.186
SN2021lji	SLSN-I	0.0	3646.0483398438	9241.2274570465	0.12
SN2021lwz	SLSN-I	0.0	3200.6929	10294.405	0.065
SN2021mkr	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.3999023438	0.28
SN2021mkr	SLSN-I	11.9462	2771.0679034309	10939.384683631	0.28
SN2021nxq	SLSN-I	0.0	4835.5432835387	9054.204412714	0.15
SN2021rwz	SLSN-I	0.0	4952.6349693868	8960.2656451966	0.19
SN2021ybf	SLSN-I	0.0	3650.04833984	9245.22745705	0.13
SN2021zcl	SLSN-I	0.0	3652.94775391	9246.88859463	0.117
SN2021ahpl	SLSN-I	0.0	3655.0483398438	9250.2274570465	0.051
SN2022le	SLSN-I	0.0	3823.573745	9211.256433	0.2491
SN2022ful	SLSN-I	0.0	3776.7	9223.3	0.135
SN2022ful	SLSN-I	36.6516	3500.2962917462	9623.3235246818	0.135
SN2022gyv	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.3999023438	0.39
SN2022ljr	SLSN-I	0.0	3850.9634570525	6999.2909637789	0.2
SN2022lxd	SLSN-I	0.0	3800.0	8999.9999132157	0.54
SN2022npq	SLSN-I	0.0	3673.0483398438	9268.2274570465	0.26
SN2022ojm	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.3999023438	0.47
SN2022pjg	SLSN-I	0.0	3402.86	9099.86	0.17
SN2022vxc	SLSN-I	0.0	3673.0478515625	9268.2274522781	0.1
SN2022xgc	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.3999023438	0.3
SN2022xgc	SLSN-I	2.5005	3672.0478515625	9267.2274522781	0.3
SN2022aawb	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.3999023438	0.13
SN2022abdu	SLSN-I	0.0	3672.0478515625	9267.2274522781	0.13
SN2022abtm	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.3999023438	0.308
SN2022acch	SLSN-I	0.0	3672.0478515625	9267.2274522781	0.42
SN2022acch	SLSN-I	0.5750	4020.0	7994.3999023438	0.42
SN2022acsx	SLSN-I	0.0	4020.0	7994.3999023438	0.292
2015bn	SLSN-I	-28.0	3645.98999023	9240.03478622	0.1136
2015bn	SLSN-I	-27.1020	3690.0	9460.0	0.1136
2015bn	SLSN-I	-26.6530	3642.04785156	9237.22745228	0.1136
2015bn	SLSN-I	-21.7141	3500.0	9294.273644	0.1136
2015bn	SLSN-I	-21.7141	8417.70654437	14799.8046421	0.1136
2015bn	SLSN-I	-20.8161	3342.53881836	9984.25878906	0.1136
2015bn	SLSN-I	-17.2241	4020.0	7994.4	0.1136
2015bn	SLSN-I	-8.2442	3349.0	8569.15	0.1136
2015bn	SLSN-I	-8.24425	3342.80395508	9984.89160156	0.1136
2015bn	SLSN-I	-8.2443	8418.3441092	14796.1925287	0.1136
2015bn	SLSN-I	-7.3463	3500.77441406	9566.75097656	0.1136
2015bn	SLSN-I	-1.9583	3343.03027344	9984.44238281	0.1136
2015bn	SLSN-I	3.4296	3301.06	9701.23	0.1136
2015bn	SLSN-I	6.1236	3344.74487305	9988.29589844	0.1136
2015bn	SLSN-I	6.4271	3460.0	10882.0	0.1136

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
2015bn	SLSN-I	19.5933908046	3342.19628906	9976.1869221	0.1136
2015bn	SLSN-I	30.3692528736	3700.5	9435.5	0.1136
2015bn	SLSN-I	30.3692528736	3250.81298828	9999.27936196	0.1136
2015bn	SLSN-I	31.2672413793	4235.1979294	9009.67526542	0.1136
2015bn	SLSN-I	34.8591954023	8421.91060384	14793.2924236	0.1136
2015bn	SLSN-I	43.8390804598	4139.59999706	7883.99990506	0.1136
2015bn	SLSN-I	50.125	3800.0	9432.5	0.1136
2015bn	SLSN-I	57.308908046	3301.06	9701.23	0.1136
2015bn	SLSN-I	71.6767241379	3301.06	9701.23	0.1136
2015bn	SLSN-I	83.3505747126	3301.06	9701.23	0.1136
2015bn	SLSN-I	89.6364942529	3301.06	9701.23	0.1136
2015bn	SLSN-I	98.6163793103	3301.06	9701.23	0.1136
2015bn	SLSN-I	105.800287356	3800.0	10636.0	0.1136
2015bn	SLSN-I	243.192528736	3658.0	9419.25	0.1136
2015bn	SLSN-I	257.560344828	3640.97460938	9232.37988281	0.1136
2015bn	SLSN-I	257.560344828	3640.97460938	9232.37988281	0.1136
2015bn	SLSN-I	263.846264368	4207.37992774	9416.08162782	0.1136
2015bn	SLSN-I	295.275862069	4209.40820312	9402.86230469	0.1136
2015bn	SLSN-I	315.031609195	3200.250532	10200.164051	0.1136
2015bn	SLSN-I	315.031609195	3200.250532	10200.164051	0.1136
2015bn	SLSN-I	343.767241379	4500.0	10667.47	0.1136
2015bn	SLSN-I	391.360632184	4678.87753646	10189.6816406	0.1136
2015bn	Gal	1083.69545842	4224.25097656	10471.3623047	0.1136
2016ard	SLSN-I	-2.61081081081	3928.0	9101.98	0.2025
2016ard	SLSN-I	-2.27817047825	3928.0	9101.98	0.2025
2016ard	SLSN-I	8.2	3481.75420633	7420.96210446	0.2025
2016ard	SLSN-I	25.6636174636	4099.6067029	10199.2309021	0.2025
2016ard	SLSN-I	33.148024948	3356.0	8578.1	0.2025
2016ard	SLSN-I	80.5492723493	3999.14234689	10199.2677898	0.2025
2016ard	SLSN-I	121.297713098	3999.81460161	10199.8227904	0.2025
2016ard	SLSN-I	271.817463617	5301.359375	9401.55656171	0.2025
2016eay	SLSN-I	-18.2959170984	3503.39	9738.798	0.1013
2016eay	SLSN-I	-15.5	3403.872	9706.828	0.1013
2016eay	SLSN-I	-12.7810121678	3200.047	10236.677	0.1013
2016eay	SLSN-I	-9.14894097925	3100.337	10236.989	0.1013
2016eay	SLSN-I	-9.14894097925	3476.63916016	7418.30755615	0.1013
2016eay	SLSN-I	-5.51686979066	3477.39868164	7420.02734375	0.1013
2016eay	SLSN-I	-3.70083419636	3381.0	8605.04980469	0.1013
2016eay	SLSN-I	-2.79281639921	3074.2422	10284.7061	0.1013
2016eay	SLSN-I	3.5621731584	3405.532	9660.117	0.1013
2016eay	SLSN-I	13.5222771266	3400.826	9703.783	0.1013
2016eay	SLSN-I	21.7236641238	3476.57104492	7418.39990234	0.1013
2016eay	SLSN-I	22.5833384177	3402.606	9705.562	0.1013
2016eay	SLSN-I	27.1717709067	3600.0	8000.00002408	0.1013

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
2016eay	SLSN-I	32.5553705613	3405.216	9659.802	0.1013
2016eay	SLSN-I	44.3325400889	3402.01	9704.967	0.1013
2016eay	SLSN-I	151.782952238	3400.447	9703.403	0.1013
2016eay	SLSN-I	160.650387088	3287.65258789	8398.05664063	0.1013
2016eay	SLSN-I	166.292109779	3399.197	9702.153	0.1013
2016eay	SLSN-I	198.080709343	3502.809	9999.818	0.1013
2016eay	SLSN-I	234.291565786	6000.0	10000.0001564	0.1013
2016eay	SLSN-I	309.848346772	5000.0	11099.9998188	0.1013
2016eay	SLSN-I	485.190135567	3315.08813477	8250.0	0.1013
2016wi	SLSN-I	7.0	4478.62976256	9625.47381764	0.224
2016wi	SLSN-I	7.0	4478.62976256	9625.47381764	0.224
2016wi	SLSN-I	24.9738562092	4497.74062388	9636.05185811	0.224
2016wi	SLSN-I	29.5465988563	3093.1035	10153.6533	0.224
2016wi	SLSN-I	46.2156862745	3100.714	10237.07	0.224
2016wi	SLSN-I	50.5001550652	3078.5588	10246.2666	0.224
2016wi	SLSN-I	52.2645111112	3389.18945312	10276.0361328	0.224
2016wi	SLSN-I	73.4509388073	3075.0439	10231.2383	0.224
2016wi	SLSN-I	101.980047958	3075.3882	10309.0176	0.224
2016wi	SLSN-I	122.411078186	3094.449	10263.7812	0.224
2016wi	SLSN-I	270.535132598	3073.6382	10280.6729	0.224
2016wi	SLSN-I	320.230651226	3066.9961	10292.412	0.224
2017egm	SLSN-I	-25.5385350734	3721.436	8780.2002	0.0307
2017egm	SLSN-I	-21.3003038707	3393.37670399	9696.33331492	0.0307
2017egm	SLSN-I	-21.2902536138	3393.37670399	9696.33331492	0.0307
2017egm	SLSN-I	-18.1	3500.3545	8835.8546	0.0307
2017egm	SLSN-I	-13.4606232657	3397.74409942	9700.70071036	0.0307
2017egm	SLSN-I	-10.6109328614	4020.0	7994.3999	0.0307
2017egm	SLSN-I	-9.67678703799	3502.2193	7888.4966	0.0307
2017egm	SLSN-I	-5.78315038346	4020.0	7994.3999	0.0307
2017egm	SLSN-I	-4.53465062557	3501.346	7419.6783	0.0307
2017egm	SLSN-I	-3.80698981253	3392.83789062	9695.79492188	0.0307
2017egm	SLSN-I	-2.76886038609	3500.0	24999.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	-1.60169467316	3332.0	10698.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	-0.897694091158	4020.0	7994.3999	0.0307
2017egm	SLSN-I	-0.636331328208	3626.0	10700.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	-0.547069370238	6899.568	24501.789	0.0307
2017egm	SLSN-I	1.11199728346	1026.7367	5694.9314	0.0307
2017egm	SLSN-I	1.30991433032	3626.0	8168.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	2.28401406836	3489.0	8845.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	2.96564587198	3392.97460938	9695.93066406	0.0307
2017egm	SLSN-I	3.23041108014	3500.0	11400.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	4.22055758248	3240.0	10704.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	4.92796060925	3393.91796875	9696.875	0.0307
2017egm	SLSN-I	5.17912709823	3628.0	10716.0	0.0307

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
2017egm	SLSN-I	6.16583748923	3596.0	11100.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	9.05998476777	3636.0	10670.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	9.75291326302	3398.54785241	9653.13360492	0.0307
2017egm	SLSN-I	12.9427851946	3446.0	7845.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	25.5410194042	3616.0	10680.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	26.1954312603	3500.2367	9295.5576	0.0307
2017egm	SLSN-I	126.269657126	3923.0	9071.58	0.0307
2017egm	SLSN-I	140.822873387	3825.0	9197.42	0.0307
2017egm	SLSN-I	159.256947317	3277.7265625	8150.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	191.274023091	3302.48339844	8300.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	211.648525856	3350.0	8400.0	0.0307
2017egm	SLSN-I	353.299830795	5000.0	9692.77050781	0.0307
2017gci	SLSN-I	-7.0	3638.04785156	9233.22745228	0.09
2017gci	SLSN-I	-7.0	3640.01	9260.02903622	0.09
2017gci	SLSN-I	-5.15499697248	3640.0	9262.88783732	0.09
2017gci	SLSN-I	-3.33646568822	3631.14	9260.54196847	0.09
2017gci	SLSN-I	-2.41949110037	3628.63	9251.63196703	0.09
2017gci	SLSN-I	23.5872940369	3599.36816406	9549.33376622	0.09
2017gci	SLSN-I	23.5872940369	3599.36816406	9299.1746285	0.09
2017gci	SLSN-I	29.0917325691	5000.0	8700.00008583	0.09
2017gci	SLSN-I	32.37372578	3639.64	9263.59657093	0.09
2017gci	SLSN-I	37.3331953211	4800.0	10000.0000792	0.09
2017gci	SLSN-I	41.9354931194	4800.0	9300.0	0.09
2017gci	SLSN-I	50.698054771	3640.37011719	9263.46582031	0.09
2017gci	SLSN-I	72.6558783488	3641.86	9263.9724691	0.09
2017gci	SLSN-I	102.919703578	3642.98	9263.65984912	0.09
2017gci	SLSN-I	130.671296331	3400.0	10262.8066406	0.09
2017gci	SLSN-I	133.214768165	3639.07836914	9265.75292969	0.09
2017gci	SLSN-I	155.240061193	3821.87084961	9216.38769531	0.09
2017gci	SLSN-I	185.396066973	3220.00013517	20962.5999955	0.09
2017gci	SLSN-I	366.368374128	3200.0	10200.0001043	0.09
2018hti	SLSN-I	-33.5775256822	3500.81738281	10000.0927882	0.063
2018hti	SLSN-I	-33.5775256822	3500.81738281	10000.0927882	0.063
2018hti	SLSN-I	-32.63764111	3499.72509766	10000.7090718	0.063
2018hti	SLSN-I	-32.0	3634.16	9317.37390506	0.063
2018hti	SLSN-I	-29.4123288804	3640.0	10298.8808594	0.063
2018hti	SLSN-I	-26.2570707431	3499.61499023	10000.2919086	0.063
2018hti	SLSN-I	-25.6425669801	3398.1	9673.96509085	0.063
2018hti	SLSN-I	-25.5171793036	3322.0	10000.0	0.063
2018hti	SLSN-I	-22.6146671686	3633.64	9314.83065438	0.063
2018hti	SLSN-I	-16.6969400756	3499.47290039	9999.44759572	0.063
2018hti	SLSN-I	-13.4198547506	3640.0	10298.8828125	0.063
2018hti	SLSN-I	-12.0589157098	3500.62524414	10000.3881155	0.063
2018hti	SLSN-I	-10.6299802442	3398.0	9673.86509085	0.063

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
2018hti	SLSN-I	-5.4317	3500.51367187	9999.88962221	0.063
2018hti	SLSN-I	-3.8192	3360.0	10000.0	0.063
2018hti	SLSN-I	-3.8192	3360.0	10000.0	0.063
2018hti	SLSN-I	3.6659	3395.0	10075.7558594	0.063
2018hti	SLSN-I	3.9633	3500.57006836	10000.5954946	0.063
2018hti	SLSN-I	9.5889	3500.37084961	9999.88249111	0.063
2018hti	SLSN-I	14.3797	3499.3815918	9999.32598472	0.063
2018hti	SLSN-I	15.5682	3147.80004883	9290.69335937	0.063
2018hti	SLSN-I	22.6287	3500.68920898	10000.3172429	0.063
2018hti	SLSN-I	24.0858	3147.5	9289.29296875	0.063
2018hti	SLSN-I	25.2673	3341.69995117	10282.3857422	0.063
2018hti	SLSN-I	29.2144	3500.34960937	10000.6447107	0.063
2018hti	SLSN-I	30.6795	3398.1	9673.96509085	0.063
2018hti	SLSN-I	37.7262	3499.3347168	10000.053466	0.063
2018hti	SLSN-I	39.1257	3400.9	9646.63439407	0.063
2018hti	SLSN-I	52.3186	3398.0	9673.86509085	0.063
2018hti	SLSN-I	54.3558	3347.52441406	9495.75683594	0.063
2018hti	SLSN-I	66.4079	3399.7	9709.96076031	0.063
2018hti	SLSN-I	73.8861	3600.0	9296.19433594	0.063
2018hti	SLSN-I	74.8239	3150.5	9293.19140625	0.063
2018hti	SLSN-I	77.1528	3500.41137695	10000.316651	0.063
2018hti	SLSN-I	89.3339	3499.17651367	9249.24980283	0.063
2018hti	SLSN-I	269.8679	3633.6	7869.94306078	0.063
2019stc	SLSN-I	-8.25997	3400.0	9999.908998	0.1178
2019stc	SLSN-I	15.0	3824.9794	9211.271413	0.1178
2019stc	SLSN-I	48.1007	4208.999394	9431.032845	0.1178
2019stc	SLSN-I	72.2553	3824.907223	9211.45469	0.1178
2019stc	SLSN-I	93.7260	4000.209554	9265.186265	0.1178
2019stc	SLSN-I	116.9860	3824.062998	9211.136068	0.1178
2019stc	SLSN-I	338.8504	3638.870923	10605.58354	0.1178
2019stc	SLSN-I	746.7946	3318.137546	8544.760173	0.1178
SN2017bcc	SLSN-II	0.0	3634.04785156	9229.22745228	0.148
SN2018atq	SLSN-II	0.0	3640.0478515625	9235.2274522781	0.17
SN2018atq	SLSN-II	74.4009	3500.0	8999.15	0.17
SN2018cjl	SLSN-II	0.0	3800.0	10000.65	0.083
SN2018ddq	SLSN-II	0.0	3500.0	8999.15	0.169
SN2018hxe	SLSN-II	0.0	3500.0	9999.55	0.134
SN2018jkq	SLSN-II	0.0	3776.7	9223.3	0.1193
SN2018jkq	SLSN-II	8.073796123	3776.7	9223.3	0.1193
SN2018jkq	SLSN-II	9.002054856	3776.7	9223.3	0.1193
SN2018jkq	SLSN-II	9.784686857	3776.7	9223.3	0.1193
SN2018jkq	SLSN-II	15.11212365	3400.0	10000.2	0.1193

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
SN2018jkq	SLSN-II	16.1377	3776.7	9223.3	0.1193
SN2018jkq	SLSN-II	19.3344	3400.0	8400.0	0.1193
SN2018jkq	SLSN-II	25.0174	3300.0	10000.85	0.1193
SN2018jkq	SLSN-II	182.5703	3090.8826	10306.988	0.1193
SN2018lnb	SLSN-II	0.0	3300.0	10000.85	0.222
SN2018lng	SLSN-II	0.0	3500.0	9999.55	0.191
SN2018lpu	SLSN-II	0.0	3500.0	8999.15	0.2104
SN2018lqi	SLSN-II	0.0	3300.0	10000.021713	0.202
SN2018lqi	SLSN-II	11.5740	3650.38183594	9246.0850811	0.202
SN2018lqi	SLSN-II	26.5218	3642.04785156	9237.22745228	0.202
SN2018lqi	SLSN-II	40.6597	3300.0	10000.002476	0.202
SN2018lqi	SLSN-II	91.4409	3071.9072	10304.183	0.202
SN2018lqi	SLSN-II	411.70382	3080.3218	10302.878	0.202
SN2019afz	SLSN-II	0.0	3776.7	9223.3	0.106
SN2019aje	SLSN-II	0.0	3305.06	9697.06	0.127
SN2019aje	SLSN-II	23.4673	4029.2	7994.4	0.127
SN2019avv	SLSN-II	0.0	3076.5461	10307.146	0.2207
SN2019bie	SLSN-II	0.0	3776.7	9223.3	0.117
SN2019bie	SLSN-II	2.5242	4020.0	7994.4	0.117
SN2019cmv	SLSN-II	0.0	4029.2	7994.4	0.097
SN2019cqc	SLSN-II	0.0	3776.7	9223.3	0.1173
SN2019cqc	SLSN-II	6.2499	3776.7	9223.3	0.1173
SN2019cqc	SLSN-II	11.7954	3400.0	10000.2	0.1173
SN2019cqc	SLSN-II	17.9421	3642.04785156	9237.22745228	0.1173
SN2019cqc	SLSN-II	18.8328	3341.26928711	7461.14019299	0.1173
SN2019cqc	SLSN-II	38.6369	3400.0	10000.2	0.1173
SN2019cqc	SLSN-II	38.6373	3400.0	10000.2	0.1173
SN2019fdr	SLSN-II	0.0	3913.0	9057.77	0.267
SN2019fdr	SLSN-II	6.1799	4635.0	10049.1796875	0.267
SN2019gsp	SLSN-II	0.0	3644.0483398438	9239.2274570465	0.171
SN2019gsp	SLSN-II	20.5293	3100.528	10236.308	0.171
SN2019gsp	SLSN-II	69.24837	3063.9055	9989.0322	0.171
SN2019hht	SLSN-II	0.0	3100.582	10236.28	0.2298
SN2019kwr	SLSN-II	0.0	3088.4038	10307.018	0.2022
SN2019kwr	SLSN-II	472.6767	3400.8804	10301.714	0.2022
SN2019kwv	SLSN-II	0.0	3073.4822	10307.265	0.3284
SN2019kww	SLSN-II	0.0	3067.696	10307.532	0.2723
SN2019meh	SLSN-II	0.0	4020.0	7994.4	0.092
SN2019meh	SLSN-II	67.0736	3299.8	9199.8	0.092
SN2019npv	SLSN-II	0.0	3644.0478515	9239.2274522781	0.057
SN2019npv	SLSN-II	21.9792	3776.7	9223.3	0.057

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
SN2019qfb	SLSN-II	0.0	3400.0	10000.538	0.1423
SN2019uba	SLSN-II	0.0	3300.0	9999.902058	0.3035
SN2019uba	SLSN-II	19.86267741	3200.0	9999.975	0.3035
SN2019uba	SLSN-II	28.28998849	3400.0	10000.2	0.3035
SN2019uba	SLSN-II	46.07978519	3068.03	10304.315	0.3035
SN2019uba	SLSN-II	70.48024549	3300.0	9700.736	0.3035
SN2019uba	SLSN-II	207.3371692	3068.3291	10303.515	0.3035
SN2019uba	SLSN-II	341.3578826	3066.655	10303.748	0.3035
SN2019ugi	SLSN-II	0.0	3400.0	10000.2	0.119
SN2019xf	SLSN-II	0.0	3200.0	9999.975	0.116
SN2019xf	SLSN-II	47.91666667	3300.0	9699.518	0.116
SN2019xf	SLSN-II	58.64157706	5500.0	9700.62707657	0.116
SN2019xf	SLSN-II	82.92204301	3065.667	10304.631	0.116
SN2019xf	SLSN-II	165.2267025	3054.1484	10302.826	0.116
SN2019xf	SLSN-II	271.7043011	3084.207	10301.414	0.116
SN2019zcr	SLSN-II	0.0	3776.7	9223.3	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	3.21031746	3400.0	10000.2	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	8.020634921	3776.7	9223.3	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	17.47777778	3776.7	9223.3	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	26.16746032	3300.0	9700.736	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	51.55952381	3776.7	9223.3	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	55.33968254	4029.2	7994.4	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	70.41031746	3700.0	9688.0242872238	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	85.48730159	4000.0	9678.76486254	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	100.7309524	3300.0	9799.150874	0.26
SN2019zcr	SLSN-II	288.2825397	3061.8254	10302.463	0.26
SN2019aanx	SLSN-II	0.0	3300.0	9999.902058	0.403
SN2019aanx	SLSN-II	18.44476123	3200.0	9999.975	0.403
SN2019aanx	SLSN-II	26.32145403	3400.0	10000.2	0.403
SN2019aanx	SLSN-II	42.69850321	3056.6648	10305.254	0.403
SN2019aanx	SLSN-II	84.82751247	3121.3652	10306.544	0.403
SN2020nt	SLSN-II	0.0	3300.0	9699.518	0.1867
SN2020edi	SLSN-II	0.0	3402.86	9099.86	0.16
SN2020hgr	SLSN-II	0.0	3776.7	9223.3	0.1258
SN2020hgr	SLSN-II	11.56599751	3776.7	9223.3	0.1258
SN2020hgr	SLSN-II	21.21691242	3776.7	9223.3	0.1258
SN2020hgr	SLSN-II	27.5031089	3300.0	9799.150874	0.1258
SN2020hgr	SLSN-II	102.0349973	3073.0645	10301.665	0.1258
SN2020hgr	SLSN-II	256.8999822	3063.9016	10306.285	0.1258
SN2020usa	SLSN-II	0.0	3650.0478515625	9245.2274522781	0.263
SN2020vfu	SLSN-II	0.0	3300.5057664422	10803.638756533	0.1281

Objeto	Tipo	Fase	lmin	lmax	Redshift
SN2020vws	SLSN-II	0.0	3150.64633	9998.8129363398	0.384
SN2020xsy	SLSN-II	0.0	3800.0	8999.9999	0.27
SN2020ysh	SLSN-II	0.0	3300.0	9898.01434810416	0.1465
SN2020yue	SLSN-II	0.0	3300.0	9898.0143481042	0.2044
SN2020yue	SLSN-II	19.9942	3059.0662	10305.996	0.2044
SN2020yue	SLSN-II	19.9957	3059.0662	10305.996	0.2044
SN2020yue	SLSN-II	52.36798	3400.791	10302.761	0.2044
SN2021ali	SLSN-II	0.0	3952.8748	10626.15951	0.192
SN2021elz	SLSN-II	0.0	3650.0483	9245.2274570465	0.26
SN2021fmu	SLSN-II	0.0	4020.0	7994.4	0.14
SN2021fmu	SLSN-II	9.8268	3652.0483398438	9247.2274570465	0.14
SN2021xsz	SLSN-II	0.0	3651.0478	9246.2274522781	0.153
SN2021aadc	SLSN-II	0.0	3824.6924	9211.191472	0.1953
SN2021aekv	SLSN-II	0.0	3653.0478	9248.2274522781	0.187
SN2022pr	SLSN-II	0.0	4029.2	7994.4	0.068548
SN2022pr	SLSN-II	0.2609	4020.0	7994.4	0.068548
SN2022akb	SLSN-II	0.0	3824.202231	9211.229756	0.229
SN2022cvz	SLSN-II	0.0	3655.0483398438	9250.2274570465	0.188
SN2022mnj	SLSN-II	0.0	5172.86	9099.86	0.208
SN2022nen	SLSN-II	0.0	3655.965984	10663.74651	0.1165
SN2020mad	SLSN-II	0.0	3824.328474	9212.558127	0.123

```

SNID RESULTS

No.  Temp/Misc  Type      Subtype      Redshift      Age
=====
Best-match template(s):
  1  SN2018ffj  SLSN      SLSN-I       0.234 (0.004)  0.8
NOTE: the top 4 ( 4 ) templates have same type (subtype)
-----
Best type(s):
[fraction]
  1  100.0%    SLSN      ---          0.230 (0.002) -27.1 ( 3.9)
[slope]
NOTE: all null slopes
-----
Best subtype(s):
[fraction]
  1  100.0%    SLSN      SLSN-I       0.230 (0.002) -27.1 ( 3.9)
[slope]
NOTE: all null slopes
=====
OK! Favoured type and subtype are: SLSN  SLSN-I

```

Figura 22: Ouput de 2023cmx con agemin=-40 y agemax=-10 (12/03/2023)

VII.1. SNe con publicación y sus referencias

Objeto	Tipo	Referencia
SN2015bn	SLSN-I	https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/826/1/39
SN2016ard	SLSN-I	https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aad8b9
SN2016eay	SLSN-I	https://academic.oup.com/mnras/article/469/1/1246/3101034
SN2016wi	SLSN-I	https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aa8993
SN2017egm	SLSN-I	https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aaa298
SN2017gci	SLSN-I	https://academic.oup.com/mnras/article/502/2/2120/6064317
SN2018hti	SLSN-I	https://academic.oup.com/mnras/article/512/3/4484/6549929
SN2019stc	SLSN-I	https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/abf5e3

Referencias

- [1] Nicholl, M., Berger, E., Smartt, S. J., Margutti, R., Kamble, A., Alexander, K. D., Chen, T.-W., Inserra, C., Arcavi, I., Blanchard, P. K., Cartier, R., Chambers, K. C., Childress, M. J., Chornock, R., Cowperthwaite, P. S., Drout, M., Flewelling, H. A., Fraser, M., Gal-Yam, A., . . . Young, D. R. (2016). SN 2015bn: A DETAILED MULTI-WAVELENGTH VIEW OF A NEARBY SUPERLUMINOUS SUPERNOVA. *The astrophysical journal*, 826(1), 39. <https://doi.org/10.3847/0004-637x/826/1/39>
- [2] Blanchard, P. K., Nicholl, M., Berger, E., Chornock, R., Margutti, R., Milisavljevic, D., Fong, W., MacLeod, C., & Bhirombhakdi, K. (2018). The type I superluminous supernova PS16aqv: Lightcurve complexity and deep limits on radioactive ejecta in a fast event. *The astrophysical journal*, 865(1), 9. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad8b9>
- [3] Kangas, T., Blagorodnova, N., Mattila, S., Lundqvist, P., Fraser, M., Burgaz, U., Cappellaro, E., Carrasco Martínez, J. M., Elias-Rosa, N., Hardy, L. K., Harmanen, J., Hsiao, E. Y., Isern, J., Kankare, E., Kołaczkowski, Z., Nielsen, M. B., Reynolds, T. M., Rhodes, L., Somero, A., . . . Wyrzykowski, Ł. (2017). Gaia16apd – a link between fast and slowly declining type I superluminous supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(1), 1246–1258. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx833>
- [4] Yan, L., Lunnan, R., Perley, D. A., Gal-Yam, A., Yaron, O., Roy, R., Quimby, R., Sollerman, J., Fremling, C., Leloudas, G., Cenko, S. B., Vreeswijk, P., Graham, M. L., Howell, D. A., Cia, A. D., Ofek, E. O., Nugent, P., Kulkarni, S. R., Hosseinzadeh, G., . . . Woźniak, P. (2017). Hydrogen-poor superluminous supernovae with late-time H Emission: Three events from the intermediate Palomar transient factory. *The astrophysical journal*, 848(1), 6. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8993>
- [5] Bose, S., Dong, S., Pastorello, A., Filippenko, A. V., Kochanek, C. S., Mauerhan, J., Romero-Cañizales, C., Brink, T. G., Chen, P., Prieto, J. L., Post, R., Ashall, C., Grupe, D., Tomasella, L., Benetti, S., Shappee, B. J., Stanek, K. Z., Cai, Z., Falco, E., . . . Yunus, S. (2018). Gaia17biu/SN 2017egm in NGC 3191: The closest hydrogen-poor

superluminous supernova to date is in a “normal,” massive, metal-rich spiral galaxy. *The astrophysical journal*, 853(1), 57. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa298>

- [6] Fiore, A., Chen, T.-W., Jerkstrand, A., Benetti, S., Ciolfi, R., Inserra, C., Cappellaro, E., Pastorello, A., Leloudas, G., Schulze, S., Berton, M., Burke, J., McCully, C., Fong, W., Galbany, L., Gromadzki, M., Gutiérrez, C. P., Hiramatsu, D., Hosseinzadeh, G., ... Young, D. R. (2021). SN 2017gci: a nearby Type I Superluminous Supernova with a bumpy tail. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502(2), 2120–2139. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa4035>
- [7] Fiore, A., Benetti, S., Nicholl, M., Reguitti, A., Cappellaro, E., Campana, S., Bose, S., Paraskeva, E., Berger, E., Bravo, T. M., Burke, J., Cai, Y.-Z., Chen, T.-W., Chen, P., Ciolfi, R., Dong, S., Gomez, S., Gromadzki, M., Gutiérrez, C. P., ... Young, D. R. (2022). Close, bright, and boxy: the superluminous SN 2018hti. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512(3), 4484–4502. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac744>
- [8] Gomez, S., Berger, E., Hosseinzadeh, G., Blanchard, P. K., Nicholl, M., & Villar, V. A. (2021). The luminous and double-peaked Type Ic supernova 2019stc: Evidence for multiple energy sources. *The astrophysical journal*, 913(2), 143. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf5e3>