

# Supernovas asociadas a explosiones de radiación gamma

L.M. Román Aguilar<sup>1,2</sup>, M.M. Saez<sup>3,4</sup>, & M.C. Bersten<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>3</sup> Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program, RIKEN, Japón

<sup>4</sup> Department of Physics and Astronomy, University of California, EE.UU.

Received: 09 February 2024 / Accepted: 11 April 2024

©The Authors 2024

**Resumen** / En este trabajo estudiamos un conjunto de ocho supernovas (SNs) asociadas a explosiones de radiación gamma (GRB-SNs), con el objetivo de identificar las propiedades físicas que las caracterizan. Para garantizar la comparabilidad entre estos objetos, realizamos una homogeneización de la muestra, dado que en la literatura encontramos distintos métodos de cálculo de luminosidades bolométricas aplicados. Mediante un código hidrodinámico, modelamos las SNs de la muestra y derivamos sus parámetros físicos. Nuestros resultados muestran una degeneración en los modelos. Por un lado, modelos de baja masa y por otro, modelos de alta masa que necesitan la formación de remanentes compactos consistentes con agujeros negros estelares. Independientemente del modelo elegido, hay un requerimiento en común: la masa eyectada debe ser baja para reproducir las observaciones.

**Abstract** / In this study we analyze a set of eight GRB-SNe, with the aim to identify the physical properties that characterize these events. To ensure comparability, we homogenize the sample, since different methods have been applied in the literature to calculate bolometric luminosities. Using a hydrodynamic code, we model the SN sample and derive their physical parameters. Our results reveal a degeneration in the models, with both low-mass and high-mass initial models being acceptable. High-mass models require compact remnants consistent with stellar black holes formation. Regardless of the chosen model, a common requirement emerges: low ejected mass is necessary to reproduce the observations.

**Keywords** / supernovae: general — gamma rays: stars — gamma-ray burst: general

## 1. Introducción

El origen de las GRB-SNs es un tema interesante que se encuentra actualmente en discusión. Todas estas SNs han sido clasificadas como de tipo Ic-BL, es decir, SNs de colapso de núcleo, deficientes en hidrógeno y helio, que además presentan líneas anchas en sus espectros (BL: *Broad-Lines*, líneas anchas). Esta última característica indica que sus velocidades, y por lo tanto su energía, son superiores a las observadas en otras SNs (Modjaz et al., 2016). La primera GRB-SN observada fue la SN 1998bw ( $z=0.0085$ , Galama, T. J. et al. (1999)), que coincidió temporal y espacialmente con el GRB 980425 (Soffitta et al. (1998)). Luego de esta, y hasta la actualidad, gracias a los lanzamientos de nuevos telescopios y satélites, ha habido un gran aumento de dichas detecciones; por ejemplo SN 2003dh (Hjorth et al., 2003), SN 2013dx (Délia et al., 2015), SN 2016jca (Pian et al., 2016), SN 2023pel (Aguí Fernández et al., 2023), entre otras. Asimismo, las SNs Ic-BL también han sido asociadas a *flashes* de rayos X (XRFs). Se piensa que estos eventos son fenómenos parecidos a los GRBs, pero que alcanzan menores rangos de luminosidad (Heise et al., 2001). Ejemplos de estas asociaciones son las SN 2006aj y SN 2010bh asociadas con los XRF 060218 y XRF 100316D respectivamente (Pian et al., 2006; Cano et al., 2011). Conviene resaltar que no todas las SNs Ic-BL cuentan con un GRB detectado. El motivo de es-

ta diferencia, o si comparten un origen en común con las GRB-SNs, está aún en debate. Dentro de este grupo se encuentran SNs tales como SN 2002ap (Deng et al., 2003), SN 2018bvn (Ho et al., 2020b), y la SN 2020bvc (Ho et al., 2020a).

En este trabajo, hemos seleccionado una muestra de ocho GRB-SNs y estandarizado el método de cálculo de sus luminosidades bolométricas ( $L_{bol}$ ), para garantizar la comparabilidad entre ellas. Luego, derivamos sus parámetros físicos a través del modelado hidrodinámico de sus curvas de luz y velocidades de expansión en simultáneo. Esperamos que este estudio contribuya a una mejor comprensión del origen y las características distintivas de estos fenómenos estelares.

## 2. Muestra y homogeneización

Para la búsqueda de GRB-SNs a estudiar, nos basamos en la recopilación realizada por Cano et al. (2017b), de donde seleccionamos a aquellas SNs que tuvieran una buena cobertura temporal, fotométrica y espectroscópica. Estas son: SN 1998bw, SN 2003dh, SN 2003lw, SN 2006aj, SN 2010bh y SN 2012bz. Luego, revisamos la literatura en búsqueda de objetos más recientes, e incorporamos en nuestro análisis a la SN 2013dx estudiada por Taddia, F. et al. (2019) y Délia et al. (2015), así como a la SN 2016jca de los trabajos de Cano et al. (2017a) y Ashall et al. (2019). Finalmente,

**Tabla 1.** Propiedades de la muestra de GRB/XRF-SNs. Las columnas corresponden a: *redshift*, distancia corregida, extinción galáctica y por galaxia huésped.

GRB-SN	$z$	$d$ [Mpc]	$E(B-V)_G$	$E(B-V)_H$
1998bw	0.0085	34.9	0.06	-
2003dh	0.1685	769.2	0.025	-
2003lw	0.1055	463.4	0.78	0.25
2006aj	0.03342	139.9	0.13	-
2010bh	0.0591	251.8	0.117	0.063
2012bz	0.283	1373.9	0.03	-
2013dx	0.145	652.7	0.04	-
2016jca	0.1475	665.0	0.028	-

nuestra muestra comprende: SN 1998bw/GRB 980425, SN 2003dh/GRB 030329, SN 2003lw/GRB 031203, SN 2006aj/XRF 060218, SN 2010bh/XRF 100316D, SN 2012bz/GRB 120422, SN 2013dx/GRB 130702A y SN 2016jca/GRB 161219B.

En la literatura, se han utilizado diversos métodos para calcular las curvas de luz bolométricas o pseudo-bolométricas asociados a estos objetos (Deng et al., 2005; Mazzali et al., 2006; Cano et al., 2011; Schulze et al., 2014; DÉlia et al., 2015; Ashall et al., 2019). Estos métodos incluyen diferentes rangos de integración para la fotometría, diversos enfoques para considerar los flujos omitidos en las regiones azul y roja, la consideración de diferentes curvas de extinción y la suposición de diferentes cosmologías (es decir, diferentes valores para  $H_0$ ,  $\Omega_\Lambda$ ,  $\Omega_M$ ), entre otros factores. Para trabajar de manera más consistente, decidimos utilizar la fotometría disponible de cada uno de los objetos (cuando ha sido posible), en lugar de usar las CLs pseudo-bolométricas presentadas por los distintos autores. De esta manera podemos construir todas las CLs lo más estandarizadas posible. Para ello, aplicamos las siguientes correcciones y calibraciones a los datos fotométricos:

- Corrección por extinción Galáctica y por galaxia huésped. Las correcciones se realizaron siguiendo la ley de extinción propuesta por Cardelli et al. (1989) para  $R_V = 3.1$ . Los valores adoptados para  $E(B-V)_G$  y  $E(B-V)_H$  fueron obtenidos de la literatura y se muestran en la Tabla 1.
- Calibración presentada por Lyman et al. (2014), la cual ofrece una aproximación para el cálculo de las magnitudes bolométricas, basándose en datos fotométricos BVRI o  $gri$ , de SE-SNs. En dicho trabajo se propone que la corrección bolométrica puede ser calculada mediante un polinomio de grado 2, en función de la diferencia de magnitudes de dos bandas fotométricas.
- Corrección por cosmología para recalcular las distancias de luminosidad. De esta manera, para todos los objetos de la muestra consideramos una cosmología Flat  $\Lambda$ CDM, con  $H_0 = 73.4$  [km s $^{-1}$ Mpc $^{-1}$ ],  $\Omega_M = 0.338 \pm 0.018$ , y  $\Omega_\Lambda = 0.662 \pm 0.018$  (Brout et al., 2022).

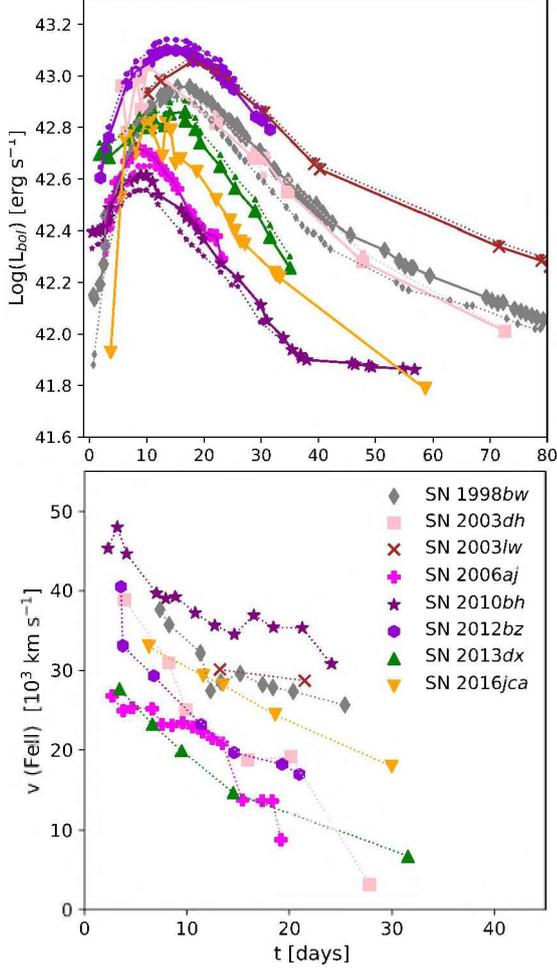
## 2.1. Curvas de luz resultantes

En los casos en los que fue posible, trabajamos con los datos fotométricos y aplicamos las 3 correcciones mencionadas anteriormente, de manera de obtener la CL bolométrica asociada a las SNs. Sin embargo, este no fue el caso de las SN 2003lw, SN 2012bz, SN 2013dx y SN 2016jca. Para estos objetos, debimos trabajar directamente con las CLs pseudo-bolométricas publicadas en la literatura, corregidas únicamente por (c). En el primero de los casos (SN 2003lw), esto se debió a que la fotometría disponible correspondía solo a las bandas I y J (Cobb et al., 2004; Gal-Yam et al., 2004), lo que resulta insuficiente para utilizar la calibración (b). Luego, en los 3 casos restantes, la fotometría presentada no contaba con la corrección K, la cual se vuelve muy importante a altos valores de redshift ( $z \gtrsim 0.1$ ), de manera que la calibración (b) no podía ser aplicada a dichas SNs.

En la Fig. 1 mostramos las CLs y las velocidades medidas de la línea de Fe II  $\lambda 5169$  Å, para toda la muestra de GRB-SNs. Se estima que dicha línea muestrea adecuadamente la fotosfera (Dessart & Hillier, 2005; Schulze et al., 2014). Los datos de las velocidades fueron obtenidos del trabajo de Schulze et al. (2014). En dicha figura podemos diferenciar las CLs bolométricas (con las correcciones aplicadas) en línea continua, y las CLs pseudo-bolométricas halladas en la literatura, en línea punteada. En general, observamos que las diferencias existentes entre nuestras CLs bolométricas y las pseudo-bolométricas de otros autores, son pequeñas. En los casos donde la única corrección aplicada fue (c), dicha diferencia se mantiene constante a lo largo de la CL, dado que al corregir solo por cosmología, se altera la distancia de luminosidad utilizada para estimar las magnitudes. Al cuantificar esta diferencia obtuvimos un valor máximo de  $10^{-3}$  dex, correspondiente a la SN 2013dx. Para las SN 1998bw, SN 2003dh, SN 2006aj y SN 2010bh, a las cuales fue posible aplicar todas las correcciones, las diferencias obtenidas varían a lo largo de la CL y son de 0.164 dex como máximo. Estos valores las sitúa dentro de los rangos de error estimados por otros autores. Como mencionamos previamente, esto podría deberse a distintos procedimientos o extrapolaciones utilizadas en la literatura para calcular la CL bolométrica. A pesar de ser correcciones menores, su relevancia reside en la capacidad de llevar a cabo una comparación más precisa entre las SNs de la muestra. A su vez, estas variaciones en la CL serán importantes para determinar con mayor precisión las características físicas de los objetos, como por ejemplo la cantidad de níquel radiactivo sintetizado en la explosión.

## 3. Modelado hidrodinámico

Utilizamos el código hidrodinámico Lagrangiano en 1D descrito en el trabajo de Bersten et al. (2011). Este código simula la explosión de la SN y genera CLs bolométricas y velocidades fotosféricas. Para iniciar dicha explosión, son necesarios modelos pre-SN obtenidos a partir de la evolución de estrellas en equilibrio hidrostático, que son utilizados para los cálculos hidrodinámicos. En este trabajo consideramos modelos pre-



**Fig. 1.** *Panel superior:* CLs corregidas de GRB-SNs (líneas continuas) y CLs pseudo-bolométricas presentadas en otras referencias (líneas punteadas). *Panel inferior:* Velocidades medidas de la línea de FeII  $\lambda 5169\text{\AA}$ . Las barras de error omitidas para mayor claridad.

SN calculados por Nomoto & Hashimoto (1988), los cuales siguen la evolución de la estrella desde la ZAMS hasta su etapa pre-explosión. Específicamente utilizamos los modelos ricos en helio de  $3.3 M_{\odot}$  (He3),  $4 M_{\odot}$  (He4),  $5 M_{\odot}$  (He5),  $6 M_{\odot}$  (He6) y  $8 M_{\odot}$  (He8), dada la falta de modelos deficientes en He disponibles. Estos modelos se corresponden con masas de remanentes compactos ( $M_{\text{cut}}$ ) estándares de 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.85  $M_{\odot}$ , y con  $M_{\text{ZAMS}}$  13, 15, 18, 20 and 25  $M_{\odot}$ , respectivamente (Sugimoto & Nomoto, 1980; Tanaka et al., 2009). Además, dado que este tipo de objetos son generalmente asociados a eventos más extremos, con mayores energías y progenitores más masivos, también empleamos un modelo pre-SN de  $11 M_{\odot}$  (He11) calculado por el Dr. Laureano Martinez, usando el código público MESA (Paxton et al., 2010). Dicho modelo se corresponde con  $M_{\text{cut}}$  estándar de  $2.5 M_{\odot}$  y con una  $M_{\text{ZAMS}}$  de  $30 M_{\odot}$ .

**Tabla 2.** Parámetros físicos derivados del modelado hidrodinámico. E en unidades de foe ( $1 \text{ foe} = 10^{51} \text{ erg}$ ), y  $M_{\text{Ni}}$ ,  $M_{\text{cut}}$  y  $M_{\text{ej}}$  en unidades de  $M_{\odot}$ .

SN	Modelo	E	$M_{\text{Ni}}$	$M_{\text{cut}}$	$M_{\text{ej}}$
<b>98bw</b>	He5	15.3	0.6	1.6	3.4
	He11	17	0.6	6.9	4.1
<b>03dh</b>	He3	4.5	0.6	1.4	1.9
	He11	10	0.53	8.2	2.8
<b>03lw</b>	He11	23	0.74	6.9	4.1
<b>06aj</b>	He4	1.8	0.23	3.18	0.82
<b>10bh</b>	He11	33	0.24	7.7	3.3
<b>12bz</b>	He3	3.5	0.75	1.4	1.9
	He11	8.8	0.74	8.4	2.6
<b>13dx</b>	He5	2.5	0.35	3.5	1.5
	He11	3.3	0.35	9.3	1.7
<b>16jca</b>	He3	7.15	0.35	1.4	1.9
	He11	12	0.34	8.6	2.4

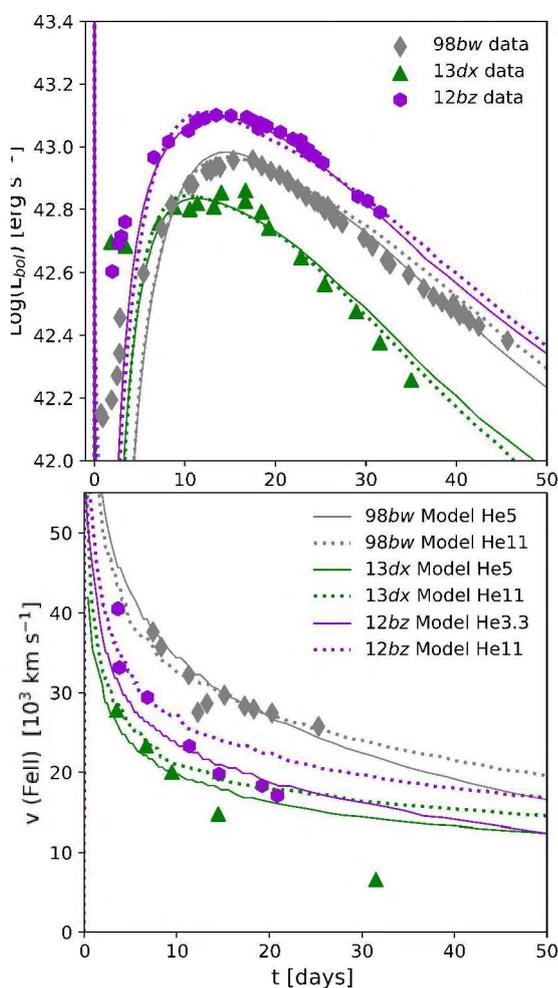
Los parámetros libres del código son: masa pre-SN ( $M_{\text{preSN}}$ ), energía de explosión (E) y la masa de  $^{56}\text{Ni}$  ( $M_{\text{Ni}}$ ). Tanto  $M_{\text{cut}}$  como la masa eyectada post-explosión ( $M_{\text{ej}}$ ) son también tenidos en cuenta, dada la relación  $M_{\text{preSN}} = M_{\text{cut}} + M_{\text{ej}}$ . Para identificar el modelo más adecuado, ajustamos los parámetros libres y buscamos aquella combinación que mejor represente las  $L_{\text{bol}}$ , y la evolución de velocidades de manera simultánea.

Para más del 60% de los objetos de la muestra, encontramos dos soluciones posibles. Una asociada a modelos iniciales pre-SN de baja masa ( $M_{\text{preSN}} < 8 M_{\odot}$ ) y otra asociada a modelos de alta masa ( $M_{\text{preSN}} \geq 8 M_{\odot}$ ). Los parámetros correspondientes a los mejores modelos, se muestran en la Tabla 2. A su vez, en la Figura 2 mostramos, a modo de ejemplo, los modelos hallados para 3 de las SNs de la muestra, tanto la solución de baja masa como la de alta masa (líneas sólidas y punteadas respectivamente).

Como se observa en la Tabla 2, las GRB-SNs son objetos muy energéticos ( $E \sim 10 \text{ foe}$ ) y ricos en níquel ( $M_{\text{Ni}} \gtrsim 0.2 M_{\odot}$ ), en comparación con las SNs de colapso gravitatorio normales (ver por ejemplo Taddia, F. et al. (2018)). Sin embargo, podemos notar que precisamente las SNs vinculadas a XRFs, son aquellas que presentan los valores más bajos de  $M_{\text{Ni}}$  de toda la muestra, lo cual está en acuerdo con que son también fenómenos de menor luminosidad que las GRB-SNs (Heise et al., 2001).

#### 4. Discusión y conclusiones

En este estudio, exploramos las características de SNs asociadas con estallidos de rayos gamma. Nuestro objetivo principal fue estimar sus propiedades físicas características. Para ello, trabajamos con una muestra que incluye ocho GRB/XRF-SNs y calculamos sus CLs bolométricas utilizando una metodología lo más uniforme posible. Para los objetos seleccionados, realizamos



**Fig. 2.** Comparación entre observables y modelos para las SNs 1998bw, SN 2013dx y SN 2012bz. *Panel superior:* CLs bolométricas. *Panel inferior:* Evolución de las velocidades de expansión. Se muestran dos modelos posibles: de baja masa (línea sólida) y de alta masa (línea punteada).

el modelado hidrodinámico de las CLs y las velocidades de expansión simultáneamente. De esta manera, derivamos los parámetros físicos que mejor reproducen los observables. En la mayoría de los casos, encontramos una degeneración en los modelos, hallando dos soluciones posibles: una asociada a modelos pre-SN de baja masa, y otra asociada a modelos pre-SN de alta masa. Esta última solución, además requiere la consideración de  $M_{\text{cut}} \geq 6.9 M_{\odot}$ . Por lo tanto, la asociamos a la formación de un agujero negro estelar. Notamos que sin importar el modelo elegido, las GRB-SNs resultan ser objetos con energías altas, ricos en  $^{56}\text{Ni}$  y por lo tanto muy luminosos. Además, ambas soluciones comparten el requisito común de necesitar una baja  $M_{\text{ej}}$  para encontrar un modelo adecuado. Los valores encontrados para  $M_{\text{ej}}$  ( $\sim 0.8$  a  $4 M_{\odot}$ ) son similares a los observados en SNs de colapso gravitatorio normales. La solución asociada

a modelos de alta masa parece ser la más natural para explicar este tipo de eventos, ya que los mismos suelen estar vinculados a progenitores muy masivos, y los parámetros hallados están en concordancia con otros estudios. Sin embargo, las soluciones de modelo de masa baja no pueden ser descartadas completamente. Aunque estos eventos están asociados con  $M_{\text{ZAMS}}$  grandes, las mismas podrían verse potencialmente afectadas por algún mecanismo intenso de pérdida de masa, resultando en una pre-SN menos masiva. Esta posibilidad, no ha sido investigada en profundidad en trabajos previos, y abordarlo contribuiría significativamente a resolver la degeneración en el modelado.

*Agradecimientos:* Agradecemos a la Asociación Argentina de Astronomía por el espacio otorgado para compartir nuestro trabajo con la comunidad científica.

## Referencias

- Agui Fernandez J.F., et al., 2023, GRB Coordinates Network, 34597, 1
- Ashall C., et al., 2019, MNRAS, 487, 5824
- Bersten M.C., Benvenuto O., Hamuy M., 2011, The Astrophysical Journal, 729, 61
- Brout D., et al., 2022, The Astrophys. J., 938, 110
- Cano Z., et al., 2011, The Astrophys. J., 740, 41
- Cano Z., et al., 2017a, Astronomy and Astrophysics, 605, A107
- Cano Z., et al., 2017b, Advances in Astronomy, 2017, 8929054
- Cardelli J.A., Clayton G.C., Mathis J.S., 1989, ApJ, 345, 245
- Cobb B.E., et al., 2004, The Astrophys. J. l, 608, L93
- DÉlia V., et al., 2015, Astronomy and Astrophysics, 577, A116
- Deng J., et al., 2003, Nuclear Physics A, 718, 569
- Deng J., et al., 2005, The Astrophys. J., 624, 898
- Dessart L., Hillier D.J., 2005, Astronomy and Astrophysics, 439, 671
- Gal-Yam A., et al., 2004, The Astrophys. J. l, 609, L59
- Galama, T. J., et al., 1999, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 138, 465
- Heise J., et al., 2001, E. Costa, F. Frontera, J. Hjorth (Eds.), *Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era*, 16–21, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Hjorth J., et al., 2003, Nature, 423, 847
- Ho A.Y.Q., et al., 2020a, The Astrophys. J., 902, 86
- Ho A.Y.Q., et al., 2020b, ApJ, 893, 132
- Lyman J.D., Bersier D., James P.A., 2014, MNRAS, 437, 3848
- Mazzali P.A., et al., 2006, Nature, 442, 1018
- Modjaz M., et al., 2016, The Astrophysical Journal, 832, 108
- Nomoto K., Hashimoto M., 1988, Physics Reports, 163, 13
- Paxton B., et al., 2010, The Astrophysical Journal Supplement Series, 192, 3
- Pian E., Palazzi E., Perley D., 2016, Transient Name Server Discovery Report, 2016-1090, 1
- Pian E., et al., 2006, Nature, 442, 1011
- Schulze S., et al., 2014, Astronomy and Astrophysics, 566, A102
- Soffitta P., et al., 1998, IAU Circulars, 6884, 1
- Sugimoto D., Nomoto K., 1980, SSRv, 25, 155
- Taddia, F., et al., 2018, A&A, 609, A136
- Taddia, F., et al., 2019, A&A, 621, A71
- Tanaka M., et al., 2009, The Astrophysical Journal, 692, 1131