

Técnicas de detección automática de eventos transitorios en Galaxias

Bruno Sánchez^{1,2,3}, Marcelo Lares^{2,3,4}, Mariano Domínguez^{2,3,4,5}, Martín Beiroz⁵

1) FaMAF-UNC-Córdoba

2) OAC-UNC-Córdoba

3) IATE-CONICET-Córdoba

4) CONICET

5) University of Texas at Brownsville



Resumen: La fotometría de múltiple época de galaxias es un gran campo para la exploración y el descubrimiento de eventos astrofísicos en el dominio temporal. Aún no se ha definido una técnica estándar para este tipo de estudios, y las limitaciones de los instrumentos son de relevancia para los métodos aplicables y su efectividad. Definimos una figura de mérito comparativa entre diversas herramientas de búsqueda de transitorios, enfocándonos en eventos tipo *Kilonova* dentro de galaxias. Las búsquedas se llevaron a cabo en curvas de luz sintéticas, extraídas de imágenes simuladas, donde presentamos una galaxia con diversos perfiles de Sérsic. Dentro de este escenario se inyectaron eventos transitorios. Se aplicaron técnicas de fotometría de apertura y de fotometría de diferencias de imágenes intentando detectar el transitorio simulado. Para ello aplicamos diferentes métodos de análisis de señales temporales, tales como filtrados lineales.

Las Kilonovas: La búsqueda de la evidencia experimental de las Ondas Gravitacionales (GW) exige confirmación de los eventos detectados mediante algún trazador astrofísico detectable por radiación electromagnética (EM). Los candidatos más firmes para trazadores son los llamados eventos de fusión de objetos compactos (*Compact Object Mergers, COM*) en los cuales objetos masivos, como Estrellas de Neutrones (ver Fig 1.) o Agujeros negros, se fusionan y dan origen a diferentes estallidos de radiación EM (Tabla 1), e.g. los GRB's de corta duración. Entre estas contrapartes EM se destaca un Fenómeno llamado *Kilonova* (Fig. 2) el cual se estima que posee los parámetros ideales para la confirmación de las GW.

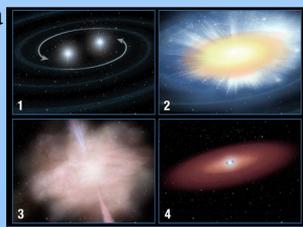


Figura 1: etapas del proceso COM: 1) Sistema binario de Estrellas de Neutrones, 2) contacto entre los objetos, 3) evento *kilonova* + un jet de radiación γ , 4) disco post-fusión enfriándose.

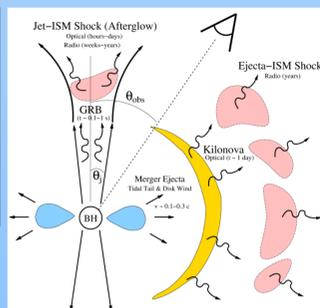


Figura 2: esquema del evento de fusión de objetos compactos, donde se aprecian las diferentes contrapartes EM del suceso.

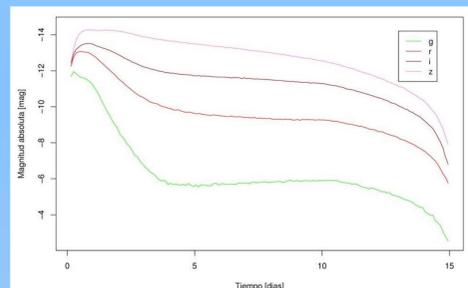


Fig. 3: curva de luz del modelo de *Kilonova* [3].

Contraparte	Tiempo de decaimiento	Rango del Espectro	Angulo de observación
Jet Shok ISM (afterglow) (a)	Horas – días	Óptico – UV	$\theta_{obs} < \theta_{jet}$
Jet Shock ISM (afterglow) (b)	Semanas-años	Radio	
Short GRB	0.1-1 segundo	Rayos γ	$\theta_{obs} \cong \theta_{jet}$
Kilonova	Horas – 1 día	Óptico – NIR	Emisión Isotrópica
Ejecta Shock ISM	Años	Radio	Emisión Isotrópica

Tabla 1: diferentes contrapartes del COM, según [1], con sus parámetros observacionales principales.

Nuestras simulaciones: hemos simulado imágenes astronómicas siguiendo la siguiente ecuación:

$$F(\vec{r}, t, \lambda) = A \left\{ \sum_j f_j(\lambda, t) PSF(\vec{r}, t, \lambda) + B(\vec{r}, t, \lambda) \right\}$$

\swarrow Área de telescopio \swarrow Flujo de las fuentes j \swarrow Point spread function \swarrow Ruido de lectura de ccd (bias)

la cual expresa la intensidad F de la imagen de las fuentes f en un CCD, ya habiendo y descontado la corrección por *flat field* y corriente de oscuridad. Para simplificar la simulación se asumieron valores de A y B triviales. Simulamos imágenes tales como las de la Figs. 4 y 5 correspondientes a dos galaxias con perfiles de Sérsic con valores de $n=1$, y $n=4$, y a un campo estelar denso.

Creamos entonces series temporales de imágenes de galaxias, para diferentes combinaciones instrumentales, explorando un espacio de parámetros (ver Tabla 2) de seis dimensiones que cubren parcialmente las situaciones observacionales más frecuentes dentro del área actualmente. Dentro de estas galaxias simuladas inyectamos un transitorio tipo *Kilonova* utilizando un perfil como el de la Fig 3, con el objeto de testear la capacidad de algoritmos para detectar el evento.

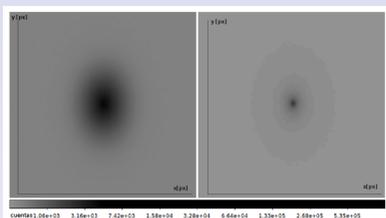


Figura 4: imágenes simuladas de dos objetos con perfiles de brillo tipo Sérsic, el de la derecha con $n=4$ (galaxia tipo elíptica), y el de la izquierda con $n=1$ (galaxia tipo disco).

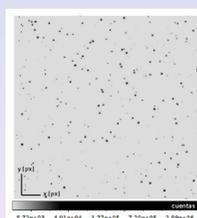


Figura 5: imagen simulada correspondiente a un campo estelar denso. Notar la posición azarosa de los objetos a lo largo de la imagen.

Dist del transitorio al centro de la gal [Re]	Índice de Sérsic de la gal.	Distancia de L. a la gal. [Mpc]	Relación S/N	Cadencia [imágenes/día]	Magnitud abs. de la galaxia
0.1, 0.7	1, 3	20, 70, 120, 170	6, 8	1, 2, 4	-18.5, -19.5, -20.5

Tabla 2: diferentes parámetros de simulación de imágenes. El espacio explorado fue 6-dimensional y constituyó de un total de 288 puntos, ascendiendo a 3555 series temporales netas utilizables

Los tests de variabilidad: hemos definido una serie de *tests* de variabilidad, con la perspectiva general de funcionar como identificadores tempranos de eventos transitorios. Se desarrollaron diversas herramientas, utilizando teoría de filtrado lineal de señales, haciendo foco en realzar un perfil con características como el de la curva de luz de una *Kilonova*. Las curvas de luz, que obtuvimos con *SExtractor*, se filtraron usando las siguientes funciones *kernel*: gaussiana, escalón, perfil característico de *Kilonova* -i.e. *Matched Filter* (Fig. 3), *algoritmo ventana*. Luego se realizaron búsquedas mediante diferentes trazadores (explicado en mayor detalle en [2]): búsqueda por área, por ajuste, por diagrama *sigma magnitud*, y búsqueda por sucesiones.

De esta forma poseemos definidos los siguientes tests:

D: diagrama *sigma-magnitud*;

T1C: Suavizado *kernel* gaussiano + búsqueda por sucesiones;

T2C: *Matched Filter* + búsqueda por sucesiones;

T1S: Suavizado *kernel* gaussiano + búsqueda por área;

T2S: *Matched Filter* + búsqueda por área;

T3C: Suavizado *kernel* escalón + búsqueda por sucesiones;

T1S: Suavizado *kernel* escalón + búsqueda por área;

VD: *Algoritmo Ventana* +detección por ajuste;

VC: *Algoritmo Ventana* + búsqueda por sucesiones

Resultados: Al verificar el rendimiento de los *tests* utilizamos la respuesta de éstos en la muestra con transitorio inyectado vs una muestra de control sin inyección. Calculamos las tasas de $TPR=$ true positive rate y de $FPR=false$ positive rate, i.e. tasas de verdaderos positivos y falsos positivos. El diagnóstico estándar para evaluar operadores binarios es la curva $ROC=$ respuesta del operador característica (Fig.6), que diferencia entre clasificadores al azar y clasificadores objetivos. Para discriminar se utiliza el área bajo la curva ROC (AUC), donde un valor de 0.5 determina una respuesta aleatoria. En la Tabla 3 se muestran resultados para nuestros *tests*.

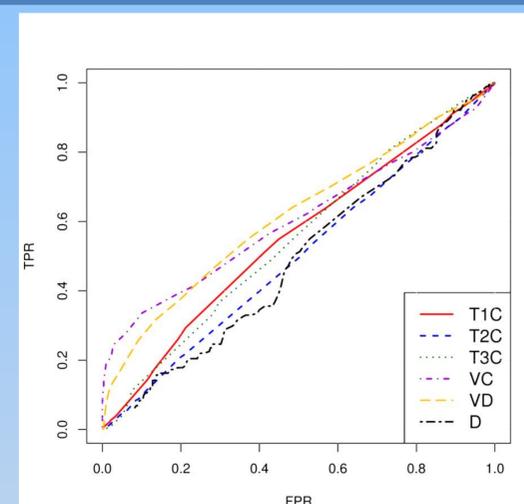


Fig. 6: curva ROC de los diferentes *Tests* definidos. Ejes: v. = True positive rate; H.= False positive rate

TEST	T1C	T2C	T3C	VD	VC	D
AUC	0.55	0.5	0.55	0.61	0.61	0.49

Tabla 3: $AUC=$ area under the curve, estimador del rendimiento de los *tests* (se excluyen los T1S, T2S, y T3S)

Conclusiones: Obtuvimos una figura de mérito para los *tests* propuestos y desarrollamos las herramientas necesarias para aplicar posibles nuevos *tests* adecuados a diferentes tipos de eventos transitorios.

La detección de fenómenos del tipo *Kilonova* puede resultar difícil mediante las técnicas de análisis de señales comunmente utilizadas, especialmente si las galaxias son débiles o lejanas.

Mostramos que las posibilidades de detección mejoran notablemente para una mayor cadencia, mayor apertura del telescopio y mayor relación señal/ruido. Mediante este análisis es posible anticipar las posibilidades de detección para una configuración instrumental dada.

Referencias Principales:

[1] Metzger, B. D. & Berger, E. 2012 [2012ApJ...746...48M](#);

[2] Sánchez, B. et. Al., T.E. de Licenciatura FaMAF 2014;

[3] Barnes J. & Kasen D. [2013ApJ...775...18B](#) 2014,

[4] Sérsic J. L., *Atlas de Galaxias Australes*, 1986.,

[5] Nissanke, S., Kasliwal, M., & Georgieva, A. 2012, arXiv:1210.6362 [astro-ph, physics:grqc], *Astrophysical Journal*, 767, 124 (2013)