



PuGli-S: Primeros *glitches* detectados desde el IAR

E. Zubieta^{1,2}, S. del Palacio^{2,3}, F. García², G. Gancio², C.O. Lousto⁴, J.A. Combi⁵
& Colaboración PuMA

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA-UNLP, Argentina

³ Department of Space, Earth and Environment, Chalmers University of Technology, Suecia

⁴ Rochester Institute of Technology, EE.UU.

⁵ Departamento de Física, Universidad de Jaén, Jaén, España

Contacto / ezubieta@iar.unlp.edu.ar

Resumen / Los púlsares cuentan con una rotación excepcionalmente estable. Sin embargo, su alta estabilidad rotacional puede resultar perturbada por *glitches*, fenómeno que consiste en un aumento repentino en su frecuencia de rotación, cuya causa no se encuentra comprendida en su totalidad. Desde el año 2018, la colaboración PuMA utiliza las antenas del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) para monitorear con alta cadencia un grupo de púlsares brillantes del hemisferio sur que han presentado *glitches* con anterioridad. En este trabajo reportamos la detección y caracterización de: i) dos *glitches* en PSR J1048–5832, los cuales resultaron ser los más pequeños de los 7 *glitches* previamente reportados para este púlsar; ii) el *glitch* más reciente en el púlsar de Vela, y iii) un *glitch* en PSR J0742–2822, el más grande observado en este púlsar hasta la fecha.

Abstract / Pulsars are objects with exceptionally stable spin. However, their rotational stability can be perturbed by a sudden increase in their spin frequency known as a *glitch*. The cause of the glitches is not clearly understood yet. Using the antennas from the Argentine Institute of Radio Astronomy (IAR), since 2018, the PuMA collaboration monitors with high cadence a set of pulsars from the southern hemisphere that have shown glitches before. Here we report the detection and characterization of: i) two glitches in the pulsar PSR J1048–5832, which are the smallest of the 7 glitches previously detected on this pulsar; ii) the most recent glitch in the Vela pulsar, and iii) a glitch in PSR J0742–2822, which is the strongest glitch reported for this pulsar so far.

Keywords / pulsars: general — radio continuum: general — methods: data analysis

1. Introducción

Los púlsares son estrellas de neutrones de las cuales recibimos un pulso de radiación por cada rotación que dan en torno a su eje. Su gran momento de inercia les brinda una rotación muy estable, lo que los vuelve relojes naturales de alta precisión. En general, la frecuencia de rotación de los púlsares disminuye de forma regular debido a la pérdida de momento angular a través de emisión electromagnética.

Sin embargo, algunos púlsares presentan *glitches** (Manchester, 2018). Este fenómeno consiste en un aumento repentino de la frecuencia de rotación del púlsar, a veces seguido por un período de relajación. Actualmente, el modelo más aceptado del mecanismo que produce los *glitches* es el de Baym et al. (1969). En éste, se propone que el interior de la estrella de neutrones se encuentra en estado superfluido, lo que permite que se generen vórtices cuánticos que se acoplan con la superficie de la estrella (Haskell, 2017). Al rotar el superfluido a una velocidad distinta que la superficie de la estrella, se genera una tensión que conduce a que los vórtices se desacoplen, ocasionando un intercambio de momento angular entre el interior de la estrella y la corteza de la misma, dando lugar al *glitch*.

A 50 años del descubrimiento del primer *glitch*

(Radhakrishnan & Manchester, 1969), aún no se tiene un modelo capaz de describir y predecir estos eventos adecuadamente debido al desconocimiento del comportamiento de la materia a densidades tan altas. Por este motivo, el estudio fenomenológico y observacional de los *glitches* es una herramienta de gran utilidad para estudiar propiedades de los púlsares, tales como su masa, el estado de superfluidez, y la ecuación de estado de la materia en su interior (Link et al., 2000; Haskell & Melatos, 2015).

Desde el año 2018, el grupo PuMA** (Pulsar Monitoring in Argentina) realiza en el Instituto Argentino de Radioastronomía observaciones con alta cadencia de púlsares (Gancio et al., 2020) que han presentado al menos un *glitch* (Lousto et al., 2022). Este monitoreo resulta de gran relevancia ya que las observaciones de alta cadencia aumentan la probabilidad de detección de mini *glitches* y la caracterización de decaimientos exponenciales cortos de los saltos en frecuencia. Hasta el momento, hemos registrado dos *glitches* en el púlsar de Vela (2019 y 2021) (Lopez Armengol et al., 2019; Sosa-Fiscella et al., 2021), dos en PSR J1048–5832 (2020 y 2021) (Zubieta et al., 2022b,c) y uno en PSR J0742–2822 (2022) (Zubieta et al., 2022a). En este trabajo presentamos el análisis de los últimos cuatro *glitches* mencionados.

*Del inglés, anomalía.

**<http://puma.iar.unlp.edu.ar>

2. Técnica de *pulsar timing*

Por un lado, la rotación de los púlsares se monitorea registrando los tiempos de arribo (ToAs) de los pulsos. Por el otro, se desarrolla un modelo matemático que caracteriza la rotación del púlsar y la propagación de los pulsos por el medio interestelar, llamado modelo de *timing*, utilizado para predecir los ToAs. Luego, calculando los residuos como el apartamiento entre los ToAs observados y los predichos por el modelo, se pueden estudiar fenómenos físicos diversos como la propagación de ondas gravitacionales, las propiedades del medio interestelar y la estructura interna de los púlsares que da lugar a los *glitches* (Lorimer & Kramer, 2004).

La evolución temporal de la rotación del púlsar se puede modelar como (Espinoza et al., 2011):

$$\phi(t) = \phi_0 + \nu_0(t-t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}_0(t-t_0)^2 + \frac{1}{6}\ddot{\nu}_0(t-t_0)^3, \quad (1)$$

con ν_0 , $\dot{\nu}_0$ y $\ddot{\nu}_0$ la frecuencia de rotación, y sus respectivas derivadas. Al ocurrir un *glitch*, el púlsar sufre un aumento repentino en su frecuencia, por lo cual los pulsos comienzan a llegar antes que lo predicho por el modelo de *timing*. En este caso, los residuos comienzan a diverger de manera lineal, como se muestra en la Fig. 1a).

Los *glitches* se caracterizan fenomenológicamente a través de un agregado al modelo de *timing*, suponiendo que inducen un salto en la fase del púlsar, ϕ_g (McCulloch et al., 1983):

$$\phi_g = \Delta\phi + \Delta\nu_p(t-t_g) + \frac{1}{2}\Delta\dot{\nu}_p(t-t_g)^2 + \frac{1}{6}\Delta\ddot{\nu}_p(t-t_g)^3 + \sum_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_g}{\tau_d^i}\right) \right] \Delta\nu_d^i \tau_d^i. \quad (2)$$

El salto en fase adicional $\Delta\phi$ puede utilizarse para contrarrestar la incerteza en el momento del *glitch*. Luego, $\Delta\nu_p$, $\Delta\dot{\nu}_p$ y $\Delta\ddot{\nu}_p$ son los cambios permanentes en la frecuencia y sus derivadas, t_g es el instante del *glitch*, $\Delta\nu_d^i$ son componentes del salto en frecuencia, las cuales decaen luego de un tiempo τ_d^i , y pueden o no estar presentes en el modelo del *glitch*. Estos componentes del salto en frecuencia que decaen de forma exponencial fueron detectados por primera vez por McCulloch et al. (1983). El salto en frecuencia total del *glitch* se calcula como $\Delta\nu_g = \Delta\nu_p + \sum_i \Delta\nu_d^i$, y el salto total en la derivada de la frecuencia se calcula como $\Delta\dot{\nu}_g = \Delta\dot{\nu}_p - \sum_i \Delta\nu_d^i/\tau_d^i$. Finalmente, se define el grado de recuperación del *glitch* como $Q^i = \Delta\nu_d^i/\Delta\nu_g$.

3. Resultados y discusión

3.1. Vela: *Glitch* 2021

El 23 de Julio de 2021 reportamos la detección de un nuevo *glitch* en el púlsar de Vela. En la Fig. 1a) se muestran los residuos en un lapso de ~ 45 d alrededor del *glitch*. La ocurrencia del *glitch* produce un cambio en los residuos que se evidencia a partir del $\text{MJD} \approx 59517.6$. Luego de incluir los parámetros correspondientes a los saltos permanentes ($\Delta\phi$, $\Delta\nu$, $\Delta\dot{\nu}$ y $\Delta\ddot{\nu}$) de la Ec.(2) en el modelo de *timing*, obtuvimos los residuos que se muestran en la Fig. 1b). Allí se observa un comportamiento que se corresponde con la presencia de componentes

Tabla 1: Parámetros del modelo de *timing* para el *glitch* de Vela del 22 de Julio 2021 y sus respectivas incertezas a 1σ .

Parámetro	Valor
t_g (MJD)	59417.6194(2)
$\Delta\nu_p$ (s^{-1})	$1.381518(1) \times 10^{-5}$
$\Delta\dot{\nu}_p$ (s^{-2})	$-8.59(4) \times 10^{-14}$
$\Delta\ddot{\nu}$ (s^{-3})	$1.16(3) \times 10^{-21}$
$\Delta\nu_{d1}$ (s^{-1})	$3.15(12) \times 10^{-8}$
τ_{d1} (días)	6.400(2)
$\Delta\nu_{d2}$ (s^{-1})	$9.9(6) \times 10^{-8}$
τ_{d2} (días)	0.994(8)
$\Delta\nu_g/\nu$	$1.2469(5) \times 10^{-6}$
$\Delta\dot{\nu}_g/\dot{\nu}$	0.084(5)
Q_1	0.00226(9)
Q_2	0.0071(4)

con decaimiento exponencial. En la Tabla 1 reportamos los valores obtenidos para los saltos en frecuencia y los demás parámetros que caracterizan al *glitch*. Encontramos dos componentes del salto en frecuencia que decaen de manera exponencial. Su detección a partir de los residuos y la comparación con tiempos de decaimientos de todos los *glitches* anteriores se muestra con mayor detalle en (Zubieta et al., 2022c).

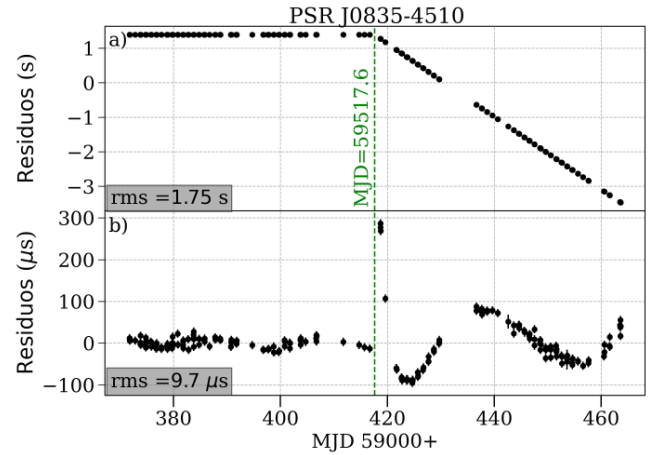


Figura 1: Residuos del púlsar Vela. *Panel a)*: Comportamiento de los residuos indicativo de un *glitch* en $\text{MJD} \approx 59517.6$. *Panel b)*: Residuos siguiendo el modelo de la Ecuación 2 para describir el *glitch* sin incluir los términos exponenciales. Se observa comportamiento exponencial luego del *glitch*.

Destacamos que la caracterización de componentes del salto en frecuencia que decaen en un tiempo $\tau \sim 1$ d es posible gracias a la cadencia diaria del monitoreo en la época del *glitch*. También notamos que tanto Q_1 como Q_2 son inferiores al 0.1%, lo cual indica que el proceso del *glitch* se encuentra dominado por los saltos permanentes en frecuencia.

3.2. PSR J1048–5832: *Glitches* 2020/2021

En este púlsar primero detectamos un *glitch* en $\text{MJD} \approx 59203.9$ y otro en $\text{MJD} \approx 59540$. Esto puede verse en la Fig. 2a), donde a partir del $\text{MJD} \approx 59203.9$, los re-

Tabla 2: Parámetros de los *glitches* detectados en PSR J1048–5832 y sus incertezas correspondientes a 1σ .

Parámetro	<i>Glitch</i> 1	<i>Glitch</i> 2
t_g (MJD)	59203.9(5)	59540(2)
$\Delta\nu_p$ (s^{-1})	$7.19(7) \times 10^{-8}$	$8.02(25) \times 10^{-8}$
$\Delta\dot{\nu}_p$ (s^{-2})	$3.91(9) \times 10^{-15}$	$1(2) \times 10^{-16}$

siduos modifican su comportamiento. Luego de ajustar los saltos permanentes en la frecuencia y su derivada de ambos *glitches* en el modelo de *timing*, obtenemos los residuos que se muestran en la Fig. 2b). Los parámetros obtenidos para estos *glitches* se muestran en la Tabla 2.

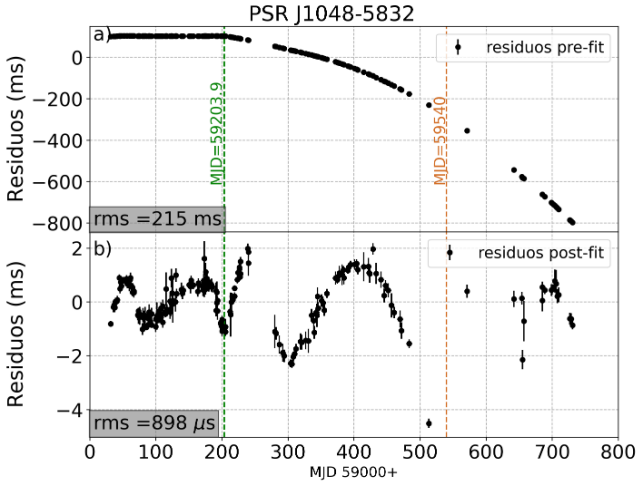


Figura 2: Residuos de PSR J1048–5832. *Panel a)*: Se aprecian cambios en el comportamiento de los residuos indicativos de un *glitch* MJD~59203.9 y MJD~59540. *Panel b)*: Residuos aleatorios obtenidos al ajustar el modelo de *timing* a ambos *glitches*.

En ambos *glitches* obtuvimos saltos relativos $\Delta\nu_g/\nu \sim 10^{-8} \ll 10^{-6}$, correspondientes a mini-*glitches*. Estos mini-*glitches* son los de menor magnitud detectados hasta el momento en este púlsar. La detección de *glitches* tan pequeños resulta posible gracias al monitoreo de alta cadencia, como el que se realiza desde el IAR. Por otro lado, no se detectó ninguna componente del salto en frecuencia que presente un decaimiento exponencial.

3.3. PSR J0742–2822: *Glitch* 2022

El 21 de septiembre de 2022, MJD=59839.4(5), fue reportado un nuevo *glitch* en PSR J0742–2822 (Shaw et al., 2022), el cual confirmamos de forma independiente 9 días más tarde. En la Fig. 3a) se muestran los residuos obtenidos antes de incluir el *glitch* en el modelo de *timing*. Luego de ajustar el modelo incluyendo la presencia del *glitch*, los residuos se reducen a lo observado en la Fig. 3b).

En este caso obtuvimos saltos relativos $\Delta\nu/\nu = 4.29497(2) \times 10^{-6}$ y $\Delta\dot{\nu}/\dot{\nu} = 0.0510(7)$, y no detectamos

ninguna componente del salto en frecuencia con decaim-

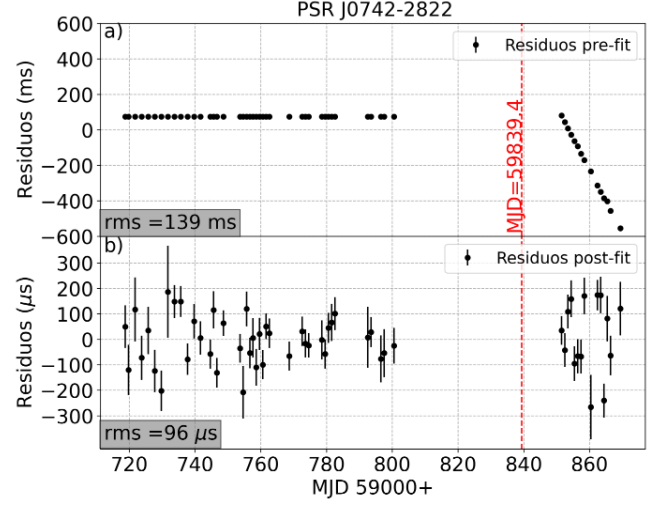


Figura 3: Residuos del púlsar PSR J0742–2822. *Panel a)*: Ocurre un cambio en el comportamiento de los residuos en MJD~59839.4. *Panel b)*: Residuos luego de incluir el *glitch* en el modelo de *timing*.

miento exponencial, probablemente debido a la falta de observaciones los primeros días posteriores al *glitch*.

4. Conclusiones

Actualmente estamos llevando a cabo un programa de monitoreo intensivo de púlsares brillantes del hemisferio Sur usando las antenas del IAR. La alta cadencia del monitoreo permite la detección de componentes exponenciales con rápido decaimiento (~ 1 d), lo cual es un aspecto crucial en el entendimiento de la física detrás de los *glitches*.

Referencias

- Baym G., Pethick C., Pines D., 1969, *Nature*, 224, 673
 Espinoza C.M., et al., 2011, *MNRAS*, 414, 1679
 Gancio G., et al., 2020, *A&A*, 633, A84
 Haskell B., 2017, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 13, 203–208
 Haskell B., Melatos A., 2015, *Int. J. Mod. Phys. E*, 24, 1530008
 Link B., Epstein R.I., Lattimer J.M., 2000, K.S. Cheng, H.F. Chau, K.L. Chan, K.C. Leung (Eds.), *Astrophysics and Space Science Library, Astrophysics and Space Science Library*, vol. 254, 117
 Lopez Armengol F.G., et al., 2019, *ATel*, 12482, 1
 Lorimer D.R., Kramer M., 2004, *Handbook of Pulsar Astronomy*, vol. 4
 Lousto C.O., et al., 2022, *MNRAS*, 509, 5790
 Manchester R.N., 2018, *Pulsar glitches and their impact on neutron-star astrophysics*
 McCulloch P.M., et al., 1983, *Nature*, 302, 319
 Radhakrishnan V., Manchester R.N., 1969, *Nature*, 222, 228
 Shaw B., et al., 2022, *ATel*, 15622, 1
 Sosa-Fiscella V., et al., 2021, *ATel*, 14806, 1
 Zubieta E., et al., 2022a, *ATel*, 15638, 1
 Zubieta E., et al., 2022b, *BAAA*, 63, 262
 Zubieta E., et al., 2022c, *arXiv e-prints*, arXiv:2210.03770