



Detección de un *glitch* en PSR J1048–5832 desde el IAR

E. Zubieta¹, V. Sosa-Fiscella^{2,3}, J.A. Combi^{3,4,5}, S. del Palacio³, F. Garcia³, L. Combi^{2,3}, G. Gancio³,
C.O. Lousto², F. López Armengol², E. Gutierrez³, A. Simaz-Bunzel³, F. Fogantini³ &
Colaboración PuMA.

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

² Rochester Institute of Technology, EE.UU.

³ Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET–CICPBA–UNLP, Argentina

⁴ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

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

Contacto / ezequielzubietaa1@gmail.com

Resumen / Los púlsares son estrellas de neutrones magnetizadas y muy densas, por lo cual tienen un momento de inercia muy grande. En consecuencia, su rotación es extraordinariamente estable, al punto que pueden considerarse como uno de los relojes más precisos del Universo. Sin embargo, la estabilidad rotacional de algunos púlsares resulta perturbada por *glitches*, que consisten en un aumento repentino de la frecuencia de rotación del púlsar. La causa de los mismos no es bien entendida. Desde la colaboración PuMA se lleva a cabo un monitoreo de alta cadencia de una muestra de púlsares del hemisferio sur que presentan *glitches* utilizando las antenas del Instituto Argentino de Radioastronomía. En este trabajo, presentamos nuestra detección de un *glitch* en el púlsar PSR J1048–5832, y la caracterización del mismo a través de la técnica de *pulsar timing*. Este *glitch* es el más pequeño de los siete reportados en este púlsar.

Abstract / Pulsars are magnetized and very dense neutron stars. Their very high moment of inertia renders them with an extraordinarily stable rotation, making pulsars one of the most accurate clocks in the Universe. However, the rotational stability of some pulsars is disturbed by glitches, which consist of a sudden increase of the rotation frequency of the pulsar. The physical mechanism behind these glitches is still not well understood. The PuMA collaboration has been monitoring with high cadence since 2017 a set of pulsars from the southern hemisphere that had shown glitches before by using the antennas from the Argentine Institute of Radio astronomy (IAR). In the present study, we report the detection of a glitch in the pulsar PSR J1048–5832 and its characterization through the pulsar timing technique. This glitch is the smallest of the seven glitches reported in this pulsar.

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

1. Introducción

Los púlsares son estrellas de neutrones magnetizadas con un momento de inercia muy grande (del orden de 10^{45} g cm²), lo que como resultado hace que su rotación sea extraordinariamente estable. Por lo tanto, pueden considerarse como uno de los relojes más precisos en el Universo. Existen dos clases de púlsares: aquellos con períodos de milisegundos, que forman parte de sistemas binarios y son lo suficientemente estables como para alcanzar la precisión de un reloj atómico (Hobbs, 2014), y los más lentos, que generalmente presentan irregularidades en sus patrones temporales.

Los púlsares disminuyen su frecuencia de rotación de forma continua debido a la pérdida de momento angular a través de emisión electromagnética. No obstante, algunos de ellos presentan un aumento repentino en su frecuencia de rotación, seguido por una disminución de la misma hasta alcanzar el valor que tenía inicialmente. Este fenómeno se denomina *glitch** (Manchester, 2018). Actualmente, se cree que los *glitches* se deben a un acople entre la rotación del material de su interior y la superficie de la estrella de neutrones. En este escenario, los

neutrones en el interior de la estrella se encontrarían en estado de superfluido, lo que permitiría que se generen vórtices cuánticos que se acoplan a la corteza de la estrella (Haskell, 2017). Esto produciría una tensión entre el interior de la estrella y la corteza que, eventualmente, provocaría que los vórtices se desacoplen, intercambiando momento angular entre el material del interior de la estrella y la corteza, dando lugar al *glitch*.

Aunque este es el modelo más aceptado, a 50 años del descubrimiento del primer *glitch* (Radhakrishnan & Manchester, 1969), todavía no se ha obtenido un modelo cuantitativo que pueda describir ni predecir estos eventos adecuadamente. Por lo tanto, el estudio observacional y fenomenológico de los *glitches* resulta de gran interés para la comunidad científica ya que es una herramienta clave para conocer el estado de la materia a altas densidades. El análisis de *glitches* permite investigar propiedades de los púlsares, como su masa, y obtener información del estado de la materia en su interior, por ejemplo, el estado de superfluidez y la ecuación de estado de la materia a densidades extremas.

Desde el 2017, el grupo PuMA** (Pulsar Monito-

*Del inglés, anomalía.

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

ring in Argentina) realiza en el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) observaciones con alta cadencia de una muestra de 15 púlsares que presentan *glitches* (Gancio et al., 2020). En particular, se han registrado tres *glitches*: dos en el púlsar de Vela (PSR J0835–4510; Lopez Armengol et al., 2019; Sosa-Fiscella et al., 2021), de los cuales el último se está analizando con las técnicas desarrolladas en (Lousto et al., 2022), y uno en el púlsar PSR J1048–5832, el cual se describe en el presente artículo.

2. Técnica de *pulsar timing*

La rotación de los púlsares puede ser monitoreada regularmente registrando los tiempos de arribo (TOAs) de los pulsos en radio. Además, si puede desarrollarse un modelo físico de la rotación del púlsar y del medio interestelar (que afecta a la propagación de los pulsos) capaz de predecir los TOAs de los pulsos, entonces los apartamientos entre los TOAs observados y los predichos pueden utilizarse para inferir información acerca del púlsar y de su entorno. Esta técnica, conocida como *pulsar timing*, es de gran robustez gracias a la alta estabilidad rotacional de los púlsares y permite estudiar una gran variedad de fenómenos astrofísicos, incluyendo las propiedades del medio interestelar, la propagación de ondas gravitacionales, y la estructura interna de los púlsares que da lugar a los *glitches* (Lorimer & Kramer, 2004).

En un modelo de *timing*, la evolución temporal de la fase de rotación del púlsar se parametriza utilizando una expansión de Taylor (Basu et al., 2021):

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

donde ν_0 , $\dot{\nu}_0$ y $\ddot{\nu}_0$ son la frecuencia de rotación, y su primera y segunda derivada, respectivamente. La diferencia entre los TOAs de los pulsos de este modelo con los TOAs observados se denominan residuos. En un modelo preciso, los residuos se encuentran agrupados en torno al cero. En presencia de un *glitch*, el púlsar sufre un cambio repentino en su frecuencia de rotación, por lo cual el modelo deja de ser válido y los residuos muestran un patrón como el que se muestra en la Figura 1.

Estas desviaciones debidas a *glitches* se modelan fenomenológicamente asumiendo que el *glitch* induce un salto en la fase del púlsar (McCulloch et al., 1987):

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

donde $\Delta\phi$ es un salto en fase que se utiliza para contrarrestar la incerteza en el momento del *glitch*, $\Delta\nu_p$, $\Delta\dot{\nu}_p$ y $\Delta\ddot{\nu}_p$ son los cambios en la frecuencia, y en su primera y segunda derivada, respectivamente, t_g es el instante del *glitch*, $\Delta\nu_d$ es otra componente del salto en frecuencia, la cual decae luego de un tiempo τ_d , y puede o no estar presente en el modelo del *glitch*. Luego, el salto total en frecuencia debido al *glitch* se calcula como $\Delta\nu_g = \Delta\nu_p + \Delta\nu_d$, y el salto total en la derivada de la

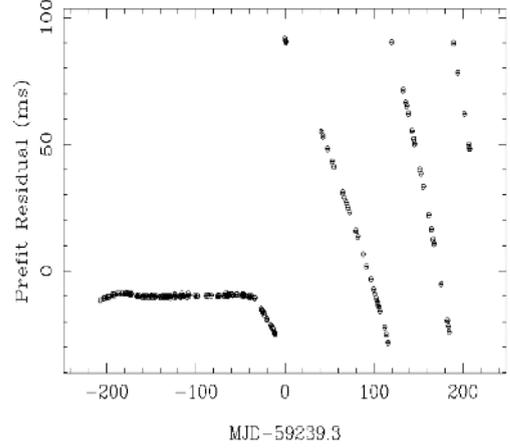


Figura 1: Residuos del púlsar J1048–5832. Se aprecia un cambio en el comportamiento de los residuos debido al *glitch* ocurrido en $MJD \sim 59205$ (22/12/2020). En este caso, para los residuos se obtiene $RMS = 25.81$ ms.

frecuencia se calcula como $\Delta\dot{\nu}_g = \Delta\dot{\nu}_p - \Delta\nu_d/\tau_d$. Estos parámetros pueden incluirse en el modelo de *timing* para caracterizar al *glitch* minimizando los residuos.

3. Resultados y discusión

Para incluir el *glitch* en el modelo de *timing*, es necesario tener una estimación inicial de $\Delta\nu_g$ y $\Delta\dot{\nu}_p$. Para esto, dividimos los residuos que se muestran en la Figura 1 en múltiples regiones que incluyen entre 10 y 20 días de observaciones cada una. A continuación, utilizamos un *plug-in* de TEMPO2 (Hobbs et al., 2006) para ajustar ν_0 y $\dot{\nu}_0$ en cada una de estas regiones; los valores obtenidos son referidos al centro de cada región. Una vez ajustados estos valores, el *plug-in* grafica ν_0 y $\dot{\nu}_0$ de la frecuencia en función del tiempo, como se muestra en la Figura 2. Cada punto del gráfico se corresponde a una de las regiones definidas. En la Figura 2 a) se nota claramente el salto repentino en la frecuencia del púlsar debido al *glitch*. Entonces, a partir de estos gráficos puede obtenerse una estimación inicial para el salto en frecuencia y en su derivada: $\Delta\nu_g = 0.05 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ y $\Delta\dot{\nu}_p = 1 \times 10^{-15} \text{ s}^{-2}$. Además, a partir de la Figura 2 a), también puede estimarse que el instante del *glitch* es $t_g \approx 59205.3$. Nótese que el *glitch* introduce un cambio permanente en $\dot{\nu}$ que no está incluido en los modelos de superfluidos para *glitches* (Haskell, 2017).

Introducimos estos parámetros en el modelo de *timing* junto al resto de los parámetros del modelo de *glitch*: $t_g = 59205.3$, $\Delta\phi = 0$ y $\Delta\dot{\nu}_p = 0$. El parámetro $\Delta\phi = 0$, relacionado con el salto de fase, se utiliza para contrarrestar la incerteza en t_g . Ajustando estos parámetros para minimizar los residuos obtenemos los residuos que se muestran en la Figura 3. Los parámetros ajustados son: $t_g = 59203.8 \pm 0.3$, $\Delta\nu_g = (6.19 \pm 0.06) \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, $\Delta\dot{\nu}_g = (1.0 \pm 0.2) \times 10^{-15} \text{ s}^{-2}$ y $\Delta\ddot{\nu}_g = (5.6 \pm 0.2) \times 10^{-22} \text{ s}^{-3}$ ***. En este caso, no se detectó ningún tiempo de decaimiento luego del *glitch*.

***el valor de $\Delta\phi$ obtenido es consistente con cero.

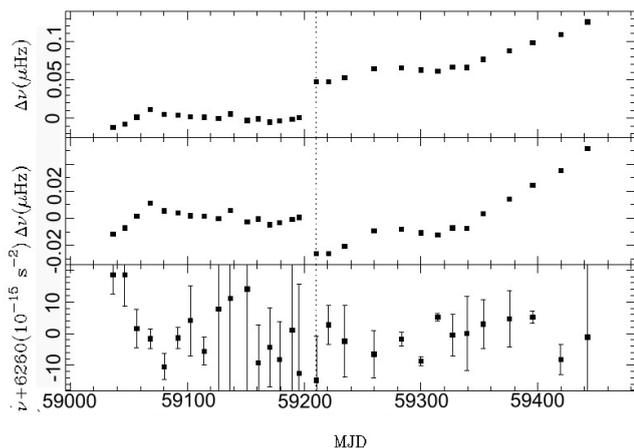


Figura 2: Ajuste de ν_0 y $\dot{\nu}_0$ para las distintas regiones temporales seleccionadas. *Panel superior*: Gráfico de ν para cada región con el gradiente pre-glitch removido. *Panel medio*: Gráfico de ν para cada región con el valor promedio después del glitch removido. *Panel inferior*: Gráfico de $\dot{\nu}$ con el valor promedio removido.

Finalmente, los saltos relativos en frecuencia y derivadas de frecuencia se muestran en la Tabla 1.

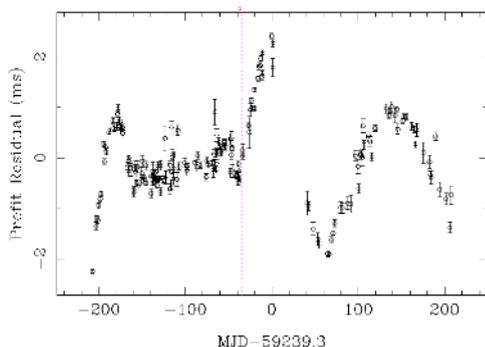


Figura 3: Residuos de todas las observaciones disponibles del púlsar al ajustar los parámetros correspondientes al modelo del *glitch*. En este caso, se obtuvo $RMS = 0.78$ ms.

Destacamos que el modelo de *timing* ajustado es satisfactorio. Esto puede verse, por un lado, en que los residuos en la Figura 3 son del orden de ~ 2 ms, lo que implica errores relativos de los residuos de $\lesssim 1.6\%$ (dado que el período del púlsar es $P = 123.7$ ms). Esta mejora también puede notarse en el RMS de los residuos, que disminuyó de $RMS = 25.81$ ms (Fig. 1) a sólo $RMS = 0.78$ ms.

El *glitch* detectado, puede catalogarse como un *mini-glitch* debido a que el parámetro $\Delta\nu_g/\nu$ es del orden 10^{-9} . Las magnitudes de los *glitches* detectados hasta el momento en el púlsar PSR J1048–5832 (Yu et al., 2013) se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Valores de los parámetros ajustados para el *glitch* detectado en MJD 59203.8.

$\Delta\nu_g/\nu$ (10^{-9})	$\Delta\dot{\nu}_g/\dot{\nu}$ (10^{-3})	$\Delta\ddot{\nu}_g$ ($10^{-24} s^{-3}$)
7.66 ± 0.08	-0.16 ± 0.03	563 ± 21

MJD	$\Delta\nu/\nu$ (10^{-9})	Referencia
48946.9	17.9	1,2,3
49034	2995	1,2,3
50791.5	768	1,2,3
52733	1838.4	3
53673.0	28.5	3
54495	3042.6	3, 4
59203.3	7.7	Este trabajo

Tabla 2: El último de los *glitches* es el reportado en este trabajo. Trabajos que reportaron otros *glitches*: 1: Wang et al. (2000), 2: Urama (2002), 3: Yu et al. (2013), 4: Weltevrede et al. (2010).

4. Conclusiones

En este trabajo hemos reportado la detección del *glitch* más pequeño hasta la fecha en el púlsar PSR J1048–5832. La detección de *glitches* tan pequeños requiere de un monitoreo con alta cadencia. Este estudio demuestra la factibilidad y la importancia de realizar este tipo de relevamientos con el observatorio del IAR.

Referencias

- Basu A., et al., 2021, MNRAS
 Gancio G., et al., 2020, A&A, 633, A84
 Haskell B., 2017, Proceedings of the International Astronomical Union, 13, 203–208
 Hobbs G., 2014, N. Capitaine (Ed.), *Journées 2013 “Systèmes de référence spatiaux-temporels”*, 115–119
 Hobbs G.B., Edwards R.T., Manchester R.N., 2006, MNRAS, 369, 655
 Lopez Armengol F.G., et al., 2019, The Astronomer’s Telegram, 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., et al., 1987, Australian Journal of Physics, 40, 725
 Radhakrishnan V., Manchester R.N., 1969, Nature, 222, 228
 Sosa-Fiscella V., et al., 2021, The Astronomer’s Telegram, 14806, 1
 Urama J., 2002, MNRAS, 330, 58
 Wang N., et al., 2000, M. Kramer, N. Wex, R. Wielebinski (Eds.), *IAU Colloq. 177: Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 202, 109
 Weltevrede P., et al., 2010, PASA, 27, 64
 Yu M., et al., 2013, MNRAS, 429, 688