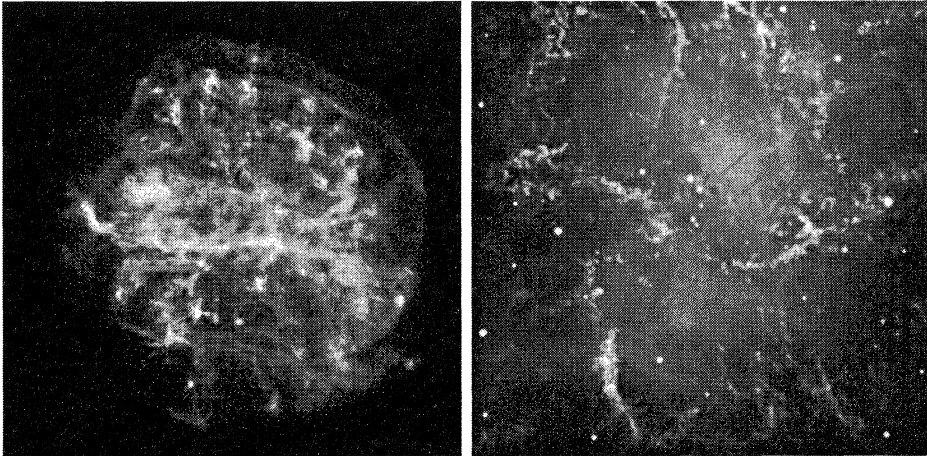


## Usporavanje pulsara u maglici Rakovice

*Krešimir Pavlovski<sup>1</sup>, Zagreb*

Blijedo bijelo-plavičasto svjetlo maglice Rakovice dolazi od sinhrotronskog zračenja. Relativistički ubrzani elektroni kruže oko silnica magnetskog polja isijavajući jako polarizirano sinhrotronsko zračenje.



*Slika 1. Ostaci supernovâ: maglica G292.0+1.8 u zvijezdu Centaurus snimljena u rentgenskom dijelu elektromagnetskog spektra pomoću satelita Chandra X-ray Observatory (lijevo) i maglica Rakovice (M1) u zvijezdu Taurus snimljena 8-m teleskopom Kuyen European Southern Observatory u Čileu (desno). Strelicama su označeni pulsari čijim usporavanjem maglice svijetle. Pojavu supernove u kojoj je nastao pulsar PSR0531+21 i maglica Rakovice pratili su i zabilježili kineski astronomi 1054. godine. Pulsar u maglici G292.0+1.8 je nešto stariji, starost mu se procjenjuje na 1600 godina.*

Izvor energije je rotirajuća neutronska zvijezda – pulsar, u sru Rakovice. U tom letećem vrtuljku pohranjena je ogromna količina rotacijske kinetičke energije. Izrazit ćemo rotacijsku kinetičku energiju  $KE_{rot}$  preko perioda rotacije  $\tau$  i momenta tromosti  $I$  neutronske zvijezde:

$$KE_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{2\pi^2 I}{\tau^2}. \quad (1)$$

Prema tome, ukoliko se period rotirajuće neutronske zvijezde mijenja, mijenjat će se i iznos rotacijske kinetičke energije. Produljenje perioda (usporavanje zvijezde) ujedno znači gubitak rotacijske energije. Napišimo promjenu rotacijske kinetičke energije kada  $\tau$  raste a  $\omega$  opada:

$$\frac{\Delta KE_{rot}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{I \Delta(\omega^2)}{\Delta t}. \quad (2)$$

<sup>1</sup> Autor je redoviti profesor astronomije i astofizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: krešimir@phy.hr, <http://www.phy.hr/~kresimir>

Za malu promjenu kutne brzine  $\Delta\omega$  bit će  $\Delta(\omega^2) = (\omega + \Delta\omega)^2 - \omega^2 \sim 2\omega\Delta\omega$ , tako da je:

$$\frac{\Delta(\omega^2)}{\Delta t} \sim 2\omega \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (3)$$

Iznos promjene kutne brzine (kutno ubrzanje  $\alpha = \Delta\omega/\Delta t$ ), odredit ćemo iz promjene perioda. Kutna brzina je  $\omega = 2\pi/\tau$  tako da je

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 2\pi \frac{\Delta(1/\tau)}{\Delta t} = 2\pi \frac{[(1/\tau) - (1/(\tau + \Delta\tau))]}{\Delta t} \sim 2\pi \frac{\Delta\tau/\tau^2}{\Delta t}. \quad (4)$$

Iz jednadžbe (2), (3) i (4) slijedi

$$\frac{\Delta KE_{rot}}{\Delta t} = \frac{(2\pi)^2 I \Delta\tau}{\tau^3 \Delta t}. \quad (5)$$

Tablica 1. Promjena perioda vrtnje pulsara PSR0531+21 u maglici Rakovice. Period je izražen u milisekundama. JD označuje julijanske dane, vremensku skalu koju astronomi koriste za vremensko obilježavanje trenutka motrenja.

Datum	JD [d]	Period [ms]
1968/10/20	2440149.5	33.09014
1968/11/22	2440182.5	33.09114
1969/01/19.3	2440240.8	33.093492
1969/02/12.2	2440264.7	33.0943630
1969/02/20.2	2440272.7	33.0946575
1969/02/23.1	2440275.6	33.0947641
1969/03/17.1	2440297.6	33.09556393

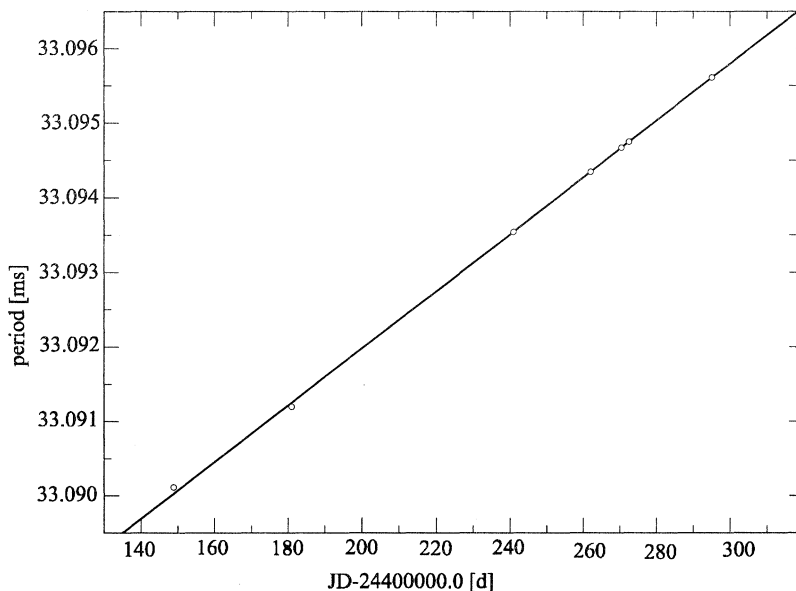
Vratit ćemo se sada na pulsar u Rakovici. Njegov je period  $\tau = 33.1$  ms (milisekunde). Prema tablici 1 možemo grafički ili računski odrediti promjenu njegovog perioda (sl. 2). Dobivamo  $\Delta\tau/\Delta t \sim 4 \cdot 10^{-13}$ . Moment tromosti pulsara izračunat ćemo iz jednadžbe za moment tromosti homogene kugle:

$$I = \frac{2}{5} M R^2, \quad (6)$$

što nakon uvrštenja vrijednosti za masu i polumjer tipične neutronske zvijezde ( $M_{nz} = 1.4 M_\odot$  i  $R_{nz} = 10$  km), za promjenu rotacijske kinetičke energije pulsara u Rakovici, prema jednadžbi (5) daje:

$$\frac{\Delta KE_{rot}}{\Delta t} \sim \frac{2}{5} \frac{4\pi^2 \cdot 1.4 (2 \cdot 10^{30})(10^4)^2}{(0.0331)^3} (4 \cdot 10^{-13}) \sim 5 \cdot 10^{31} \text{ J/s} \quad (7).$$

To je, na red veličine, jednako energiji koju zrači Rakovica u formi sinhrotronskog zračenja! Usporavanje pulsara i oslobađanje njegove rotacijske kinetičke energije, dovoljan je izvor energije koji već skoro cijeli milenij održava zračenje maglice – ostatka eksplozije supernove iz 1054. godine. Kada se pulsar ne bi usporavao, maglica se već davno ne bi vidjela.



Slika 2. Promjena perioda vrtnje pulsara PSR0531 + 21 u maglici Rakovice u vremenu od listopada 1968. do ožujka 1969. godine. Iz crteža je vidljivo da se period pulsara povećava – znači pulsar se usporuje. Upravo zahvaljujući usporavanju pulsara maglica dobiva potrebnu energiju za zračenje.

Zadatak: Gubitak energije rotirajuće zvijezde jako je osjetljiv o njezinom polumjeru. Izračunajte promjenu energije kada bi neutronska zvijezda bila 10 puta veća. Ili kada bi se radilo o bijelom patuljku čiji je tipični polumjer  $R_{bp} = 30\,000$  km. Da li bi se takva zvijezda uopće mogla vrtjeti oko svoje osi s periodom 33 ms koliko iznosi period vrtnje pulsara u Rakovici?

\*\*\*

Otiskan je izvanredni broj (F) Matematičko-fizičkog lista, trojezični

**RJEČNIK MATEMATIČKIH NAZIVA [=TERMINA],**

**DICTIONARY OF MATHEMATICAL TERMS,**

**WÖRTERBUCH DER MATHEMATISCHEN FACHWÖRTER.**

Na 64 strane nalazi se obrađeno 1 200 matematičkih natuknica (često u dubletu). Zahvaćeni su glavni pojmovi (riječi i izričaji) iz osnovnoškolske i srednjoškolske nastave matematike te nešto s prvih semestara fakulteta.

Cijena rječnika je 30 kn, za inozemstvo 8 EUR. Za narudžbe od deset i više primjeraka odobrava se 10% popusta. Žiro račun je na drugoj strani omota ovog broja.

\*\*\*

Otiskan je (1993.) izvanredni broj (E) Matematičko-fizičkog lista.

**ODABRANI ZADACI IZ MATEMATIKE S RJEŠENJIMA**

Na 64 strane nalazi se 150 zadataka iz svih područja srednjoškolske matematike, odabranih između 560 zadataka objavljenih u 31. – 40. godištu (1980./81. – 1989./90.) lista. Uz svaki zadatak je potpuni tekst rješenja, onako kako ga je dao potpisani učenik – rješavatelj.

Cijena ove zbirke je 20 kn. Za inozemstvo 6 EUR. Za narudžbe od 10 i više primjeraka odobravamo 10% popusta. Žiro-račun je na drugoj strani omota ovog broja.