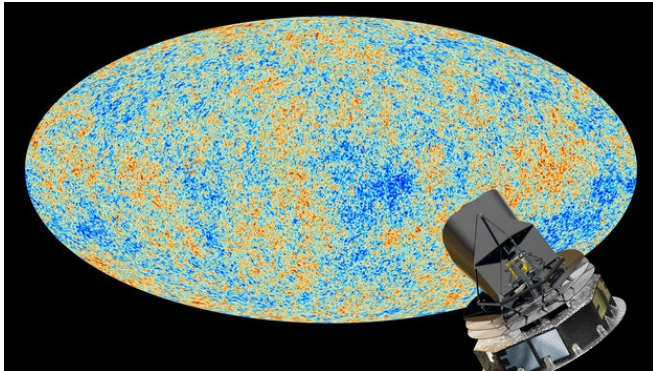


Nova saznanja o neprekidnom radio-spektru Galaktičkih ostataka supernovih nakon posmatranja svemirskim teleskopom Plank

Dušan Onić

Katedra za astronomiju, Matematički fakultet, Beograd



Svemirski teleskop Plank (ESA & Planck Collaboration)

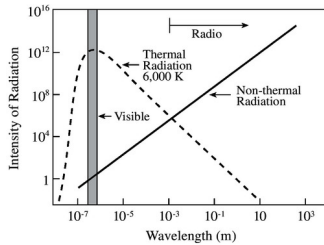
Ostaci supernovih (OSN)

- ▶ Formiranje i prostiranje bezsudarnog udarnog talasa:

rođenje i život OSN

- ▶ Uticaj međuzvezdane sredine na evoluciju OSN (i obratno)
- ▶ Gustina sredine važan parametar pri razmatranju evolucije OSN

Radio-zračenje OSN



- ▶ Neprekidni radio-spektar OSN uglavnom prati prosti stepeni zakon
- ▶ Interpretacija: Sinhrotronsko zračenje visokoenergetskih naelektrisanih čestica koje su ubrzane mehanizmom difuznog ubrzavanja čestica na udarnom talasu

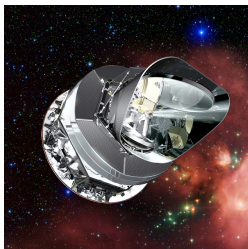
$$S_{[\text{Jy}]}(\nu) = S_{[\text{Jy}]}(1\text{GHz}) \nu_{[\text{GHz}]}^{-\alpha}$$

- ▶ *Test-particle* DSA: $\alpha = 0.5$; posmatranja: $\alpha \in (0.3, 0.8)$ (Green 2014)
- ▶ $\alpha < 0.5$ uglavnom evolutivno stari (u gustim sredinama; Onić 2013); $\alpha > 0.5$ uglavnom mladi ostaci (Bell, Schure & Reville 2011)

- ▶ Provera nekoliko teorijskih modela emisije OSN (nelinearna DSA, termalno zakočno zračenje OSN, zračenje prašine,...) oslanja se na dobro poznavanje visokofrekventnog dela radio-kontinuuuma (10-100 GHz)
- ▶ Mali broj posmatranja sa površine Zemlje na frekvencijama iznad oko 10 GHz (problem: propusnost Zemljine atmosfere)

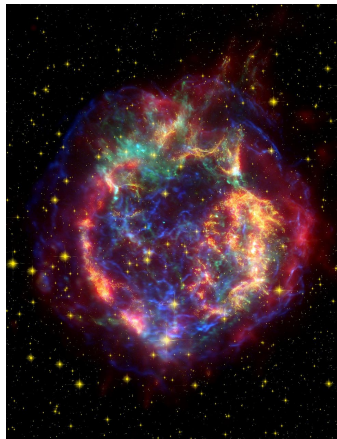
Svemirski teleskop Plank

The Low Frequency Instrument: 30, 44, and 70 GHz; The High Frequency Instrument 100, 143, 217, 353, 545, and 857 GHz (angular resolution from $31'$ to $5'$; Planck Collaboration Int. XXXI 2014, and references therein)



Ilustracija svemirskog teleskopa Plank (ESA)

Primer mladog Galaktičkog OSN: Cas A



A false color image Cas A using observations from the Hubble, Spitzer and Chandra (NASA/JPL-Caltech)

- ▶ Prividno veoma sjajan radio-izvor
- ▶ Najverovatnije istorijska SN pre oko 353–343 godina (Ashworth 1980; Fesen et al. 2006)
- ▶ Sekularno slabljenje sjaja (Baars et al. 1977; Vinyaikĭn 2014, and references therein)

Mladi OSN: nelinearni DSA efekti

- ▶ Pritisak kosmičkog zračenja \Rightarrow promene u energetsom spektru ubrzanih čestica
- ▶ Energetski spektar elektrona malih energija postaje *mekši* (radio-kontinuum je strmiji) a energetski spektar elektrona visokih energija postaje *tvrdi* (radio-kontinuum je ravniji) nego u *test-particle* slučaju
- ▶ Krivi (u log-log skali) energetski spektar čestica generiše krivi (konveksni) sinhrotronski radio-kontinuum kod mladih ostataka (Ellison & Eichler 1984; Reynolds & Ellison 1992)

Za opis neprekidnih radio-spektara mladih OSN možemo koristiti stepeni zakon sa promenljivim spektralnim indeksom

$$S_{[\text{Jy}]}(\nu) = S_{[\text{Jy}]}(1\text{GHz}) \nu_{[\text{GHz}]}^{-\alpha+a \log \nu_{[\text{GHz}]}} ,$$

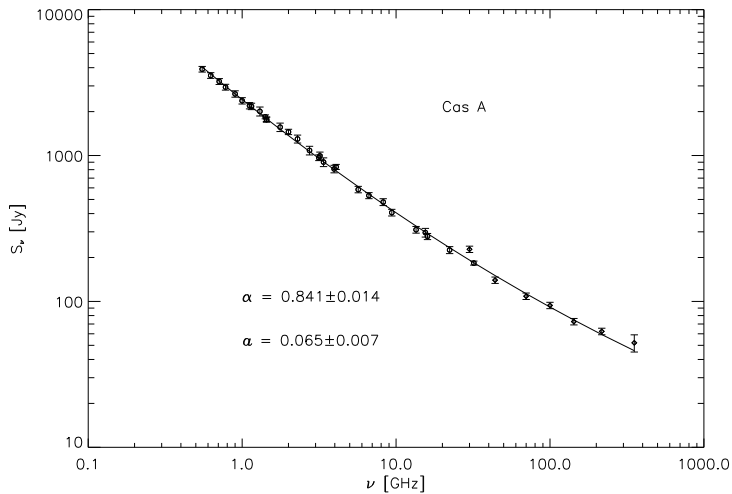
gde je α standardni sinhrotronski spektralni indeks a parametar a predstavlja tzv. parametar krivine, pri čemu teorija nelinearnog DSA predviđa $a > 0$ (Houck & Allen 2006; Vinyaik'in 2014, and references therein)

- ▶ Energetski spektar čestica možemo približno predstaviti preko

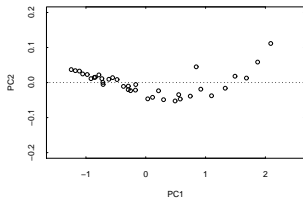
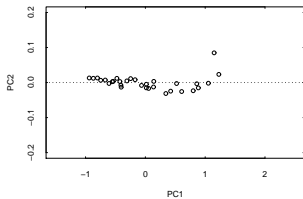
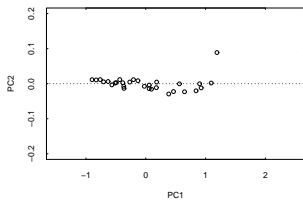
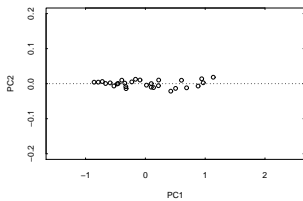
$$N(E)dE = K \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma + b \log \frac{E}{E_0}} dE,$$

gde je $b = 4a$ krivina energetskog spektra, $E_0 = 1$ GeV i Γ energetski spektralni indeksa na E_0 (pojednostavljeni model po uzoru na Allen et al. 2008) i odrediti sinhrotronsku emisivnost (uz dodatak termalne apsorpcije na nižim frekvencijama)

- ▶ Rezultati se poklapaju sa teorijskim predviđanjima



Onić & Urošević (2015)

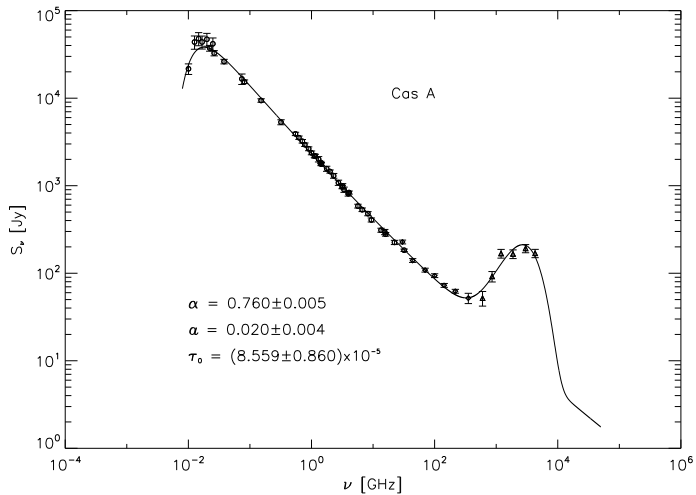


Onić & Urošević (2015)

Radio-kontinuum globalno

$$S_{[\text{Jy}]}(\nu) = S_{[\text{Jy}]}(1\text{GHz}) \nu_{[\text{GHz}]}^{-\alpha+a \log \nu_{[\text{GHz}]}} e^{-\tau_0 \nu_{[\text{GHz}]}^{-2.1}} + S_{\text{Planck}},$$

gde je τ_0 optička dubina na 1 GHz



Onić & Urošević (2015)

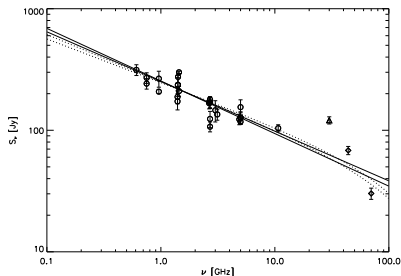
Primer evolutivno starog OSN: W44

- ▶ Interakcija sa molekulskim oblakom (širi se kroz veoma kompleksnu sredinu)
- ▶ Posmatran u γ -području (hadronski scenario; Castelletti et al. 2007; Cardillo et al. 2014)
- ▶ $\alpha = 0.37$; karakteristično za klasu OSN mešane morfologije (MM OSN)
- ▶ Radijativni rekombinacioni kontinuum u X-području: plazma se rekombinuje (još jedna karakteristika MM OSN)

- ▶ Radio-kontinuum na višim frekvencijama odstupa od očekivanog
- ▶ Sinhrotronski gubici

$$S_{[\text{Jy}]}(\nu) = S_{[\text{Jy}]}(1\text{GHz}) \nu_{[\text{GHz}]}^{-\alpha} e^{-\frac{\nu}{\nu_0}},$$

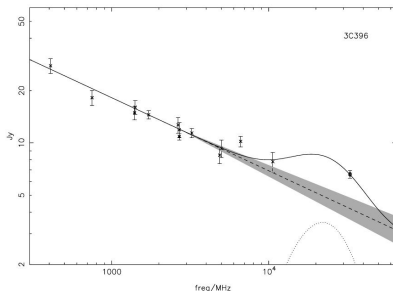
gde je ν_0 karakteristična *cut-off* frekvencija



Onić (2015)

- ▶ Grba oko 30 GHz! - *The spinning dust emission?*
- ▶ Zračenje brzo rotirajućih malih čestica prašine (SpDust) trenutno najbolje objašnjava tzv. anomalnu mikrotalasnu emisiju (zračenje difuzne MZM oko 10 – 100 GHz)
- ▶ Male čestice prašine rotiraju usled interakcije sa okolnom MZM i poljem zračenja \Rightarrow zrače usled rotacije njihovog električnog dipolnog momenta (Erickson 1957; Draine & Lazarian 1998; Ali-Haïmoud et al. 2009)

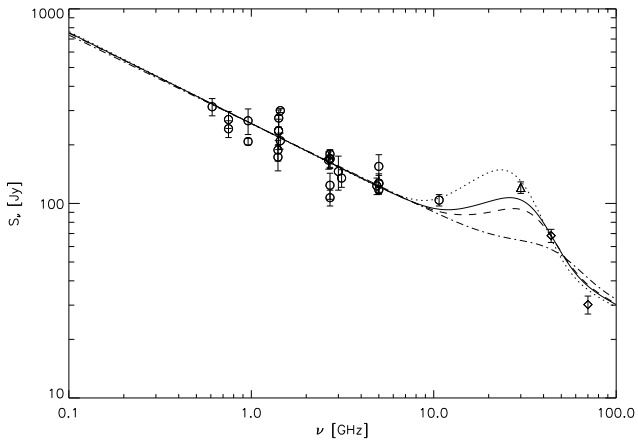
- ▶ SpDust mehanizam emisije predviđa karakterističnu grbu u radio-kontinuumu oko 30-60 GHz
- ▶ Scaife et al. (2007) su prvi analizirali radio-kontinuum jednog Galaktičkog ostatka (3C396) us svetlu SpDust modela (WNM model emisije; Draine & Lazarian 1998) - diskutabilno (Onić et al. 2012)



Scaife et al. (2007)

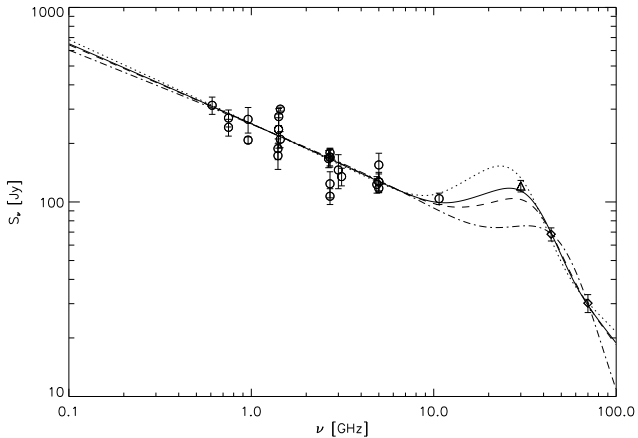
- ▶ SpDust kod (Ali-Haïmoud et al. 2009; Silsbee et al. 2011) za WNM model ($n_{\text{H}} = 0.4 \text{ cm}^{-3}$, $T = 6000 \text{ K}$), WIM ($n_{\text{H}} = 0.1 \text{ cm}^{-3}$, $T = 8000 \text{ K}$), CNM ($n_{\text{H}} = 30 \text{ cm}^{-3}$, $T = 100 \text{ K}$), i MC ($n_{\text{H}} = 300 \text{ cm}^{-3}$, $T = 20 \text{ K}$)

$$S_{[\text{Jy}]}(\nu) = S_{[\text{Jy}]}^{\text{sync}}(1\text{GHz}) \nu_{[\text{GHz}]}^{-\alpha} + S_{\text{spd}}(\nu; n, T)$$



The synchrotron power law model with inclusion of spinning dust emission (Onić 2015)

- ▶ WNM model najbolje opisuje radio-kontinuum
- ▶ Ipak, nedovoljno dobro određen spektar
- ▶ Sa druge strane, najverovatniji model daje $\alpha \approx 0.5$ za razliku od jednostavnog (sinhrotronskog modela)



The synchrotron power law model with high frequency exponential cut-off with inclusion of spinning dust emission

(Onić 2015)

Work in progress

SNR IC443

