



# KOSMIČKO ZRAČENJE KAO INDIKATOR NOVE FIZIKE I GALAKTIČKIH INTERAKCIJA

*Tijana Prodanović, Univerzitet u Novom Sadu*

*Aleksandra Dobardžić, Univerzitet u Beogradu*

*Jovana Petrovic, Univerzitet u Beogradu*

*Vlasto Petras, Univerzitet u Novom Sadu*

*Darko Donevski, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille*

*Dejan Urošević, Univerzitet u Beogradu*

*Tamara Bogdanović, Georgia Institute of Technology*

*Olaf and Anita Reimer, University of Innsbruck*

*Brian Fields, University of Illinois at Urbana-Champaign*

*Vasiliki Pavlidou, University of Crete*

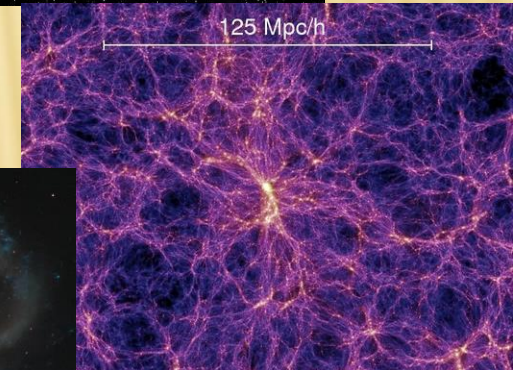
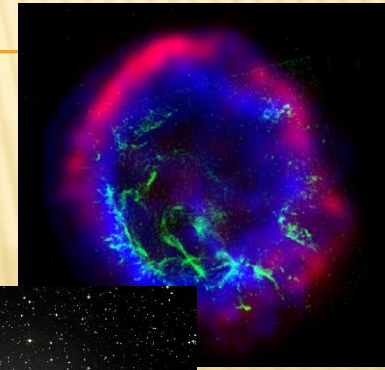


# ZAŠTO KOSMIČKO ZRAČENJE?

- ✘ “Svemir je akcelerator siromaha” (Zel’dovich)
- ✘ Testiramo fiziku čestica
- ✘ Ispitujemo mehanizme ubrzanja
- ✘ **Ispitujemo teško dostupne procese**
  - ✘ Osobine udarnih talasa u procesu nastanka velikih kosmičkih struktura (galaksija i jata galaksija)
  - ✘ Kosmološki barioni
- ✘ **Proizvodi litijum – primordijalni element**
- ✘ Testiramo tamnu materiju (kosmičko zračenje je “šum”)

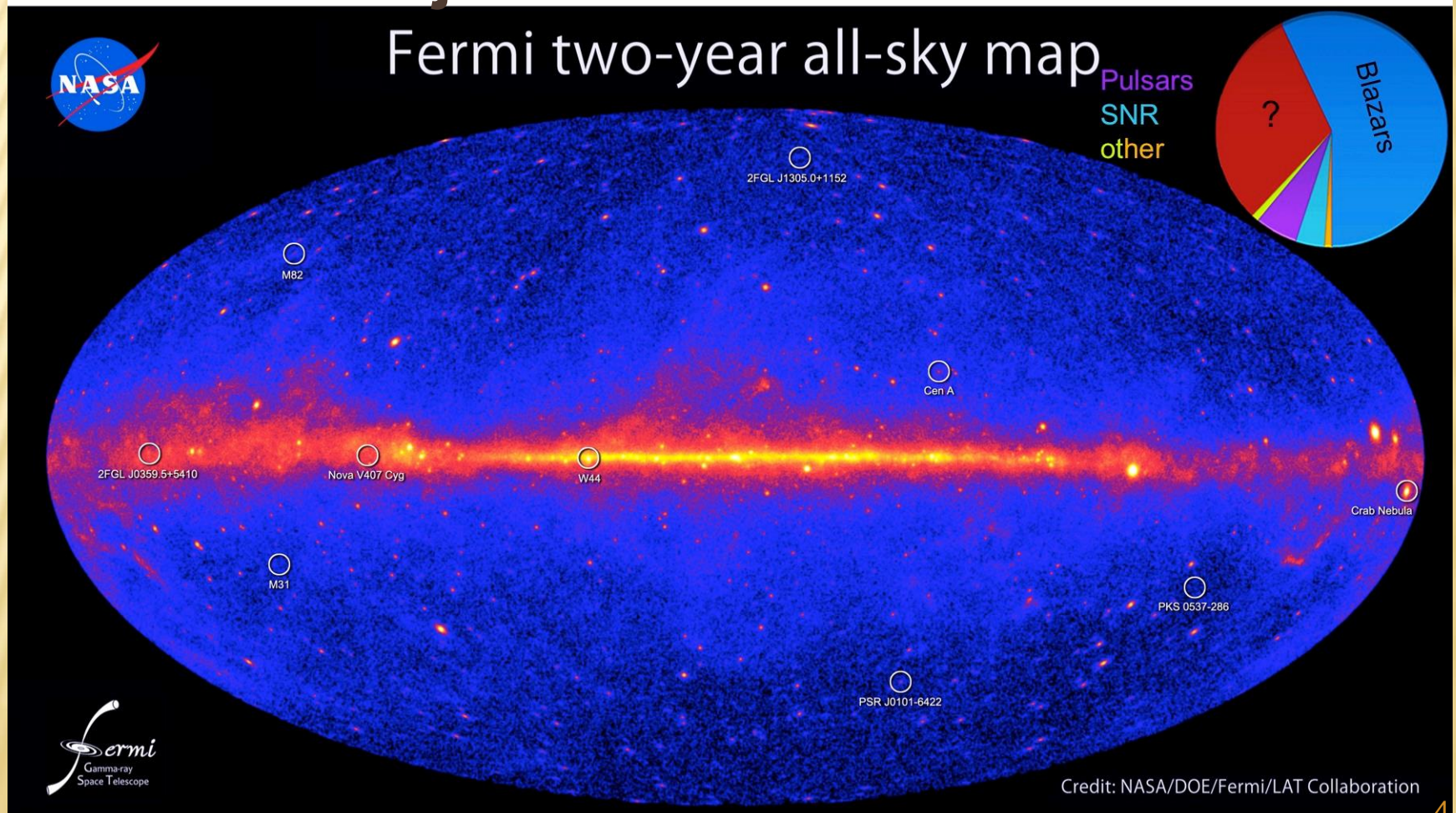
# POREKLO

- ✘ Svaki udarni talas + mag. polje je izvor kozmičkog zračenja! (Blandford & Eichler 1987)
- ✘ **Galaktičko kz (GCR)**- Ostaci supernovih (Blandford & Ostriker 1978, Bell 1978, Drury 1983)
- ✘ **CR ultravisokih energija (UHECR)** – Aktivna galaktička jezgra? (Abraham et al. 2008)
- ✘ **CR formacije struktura (SFCR)** – Udarni talasi usled formiranja struktura (*eng. Structure Formation Cosmic Rays*) (Suzuki & Inoue 2002, Kang & Jones 2002, Miniati et al. 2001, Fields & Prodanovic 2005, Dobardzic & Prodanovic 2014)
- ✘ **Plimsko CR (TCR)** - Plimski udarni talasi (Prodanovic et. al 2013)



# INDIKATORI KOSMIČKOG ZRAČENJA

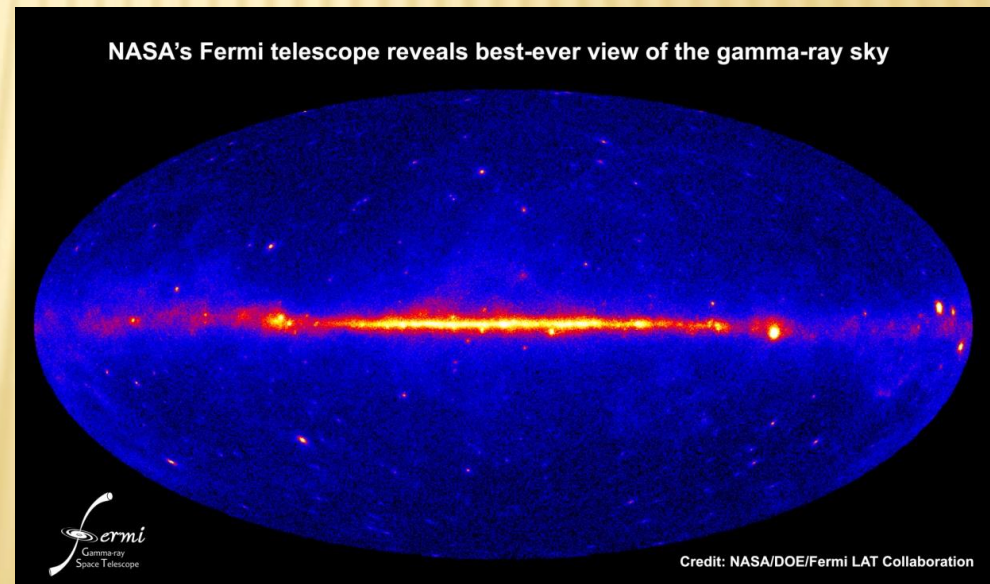
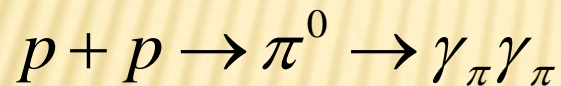
## × Gama zračenje



# INDIKATORI KOSMIČKOG ZRAČENJA

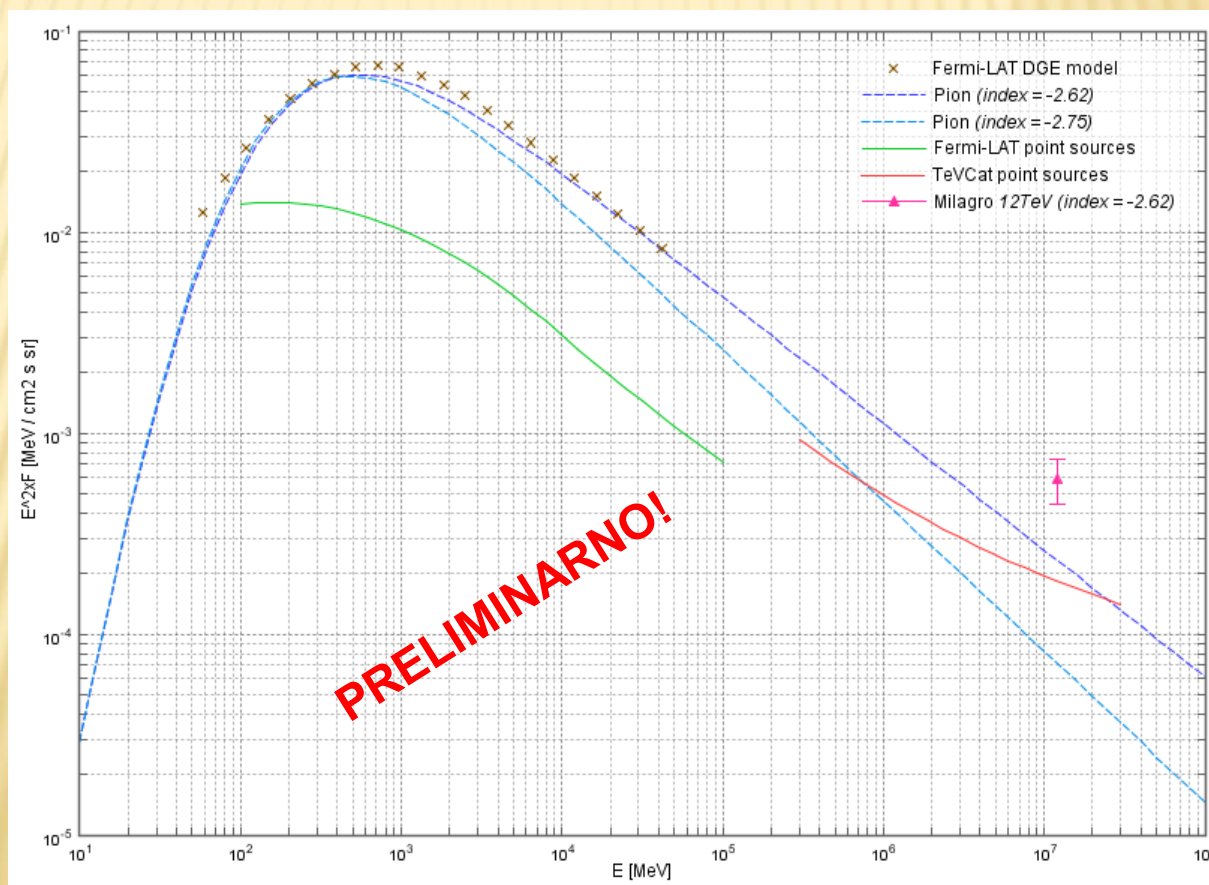
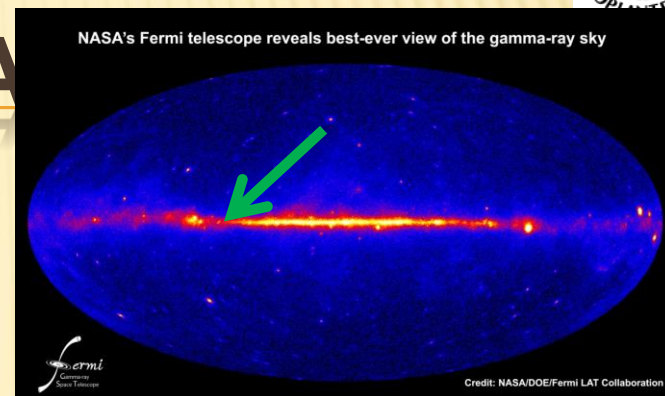
## × Gama zračenje

- + Otkriva pravac
- + Leptonsko – inverzno Komptonovo rasejanje
- + Hadronsko – raspad neutralnih piona



# GAMA ZRAČENJE DISKA

- ✘ Kosmičko zračenje u akciji
- ✘ galaktičko difuzno i tačkasti izvori



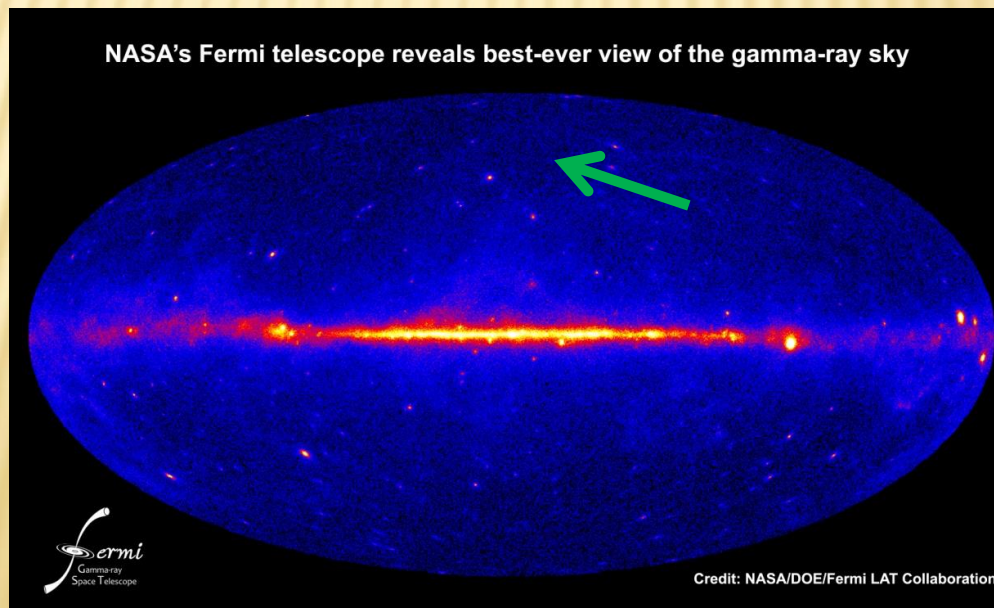
Petrović, Kovačević, Prodanović 2016 (in progress)

# VANGALAKTIČKO GAMA ZRAČENJE

## × Istorija kosmičkog zračenja

### + gamazračna pozadina (EGRB)

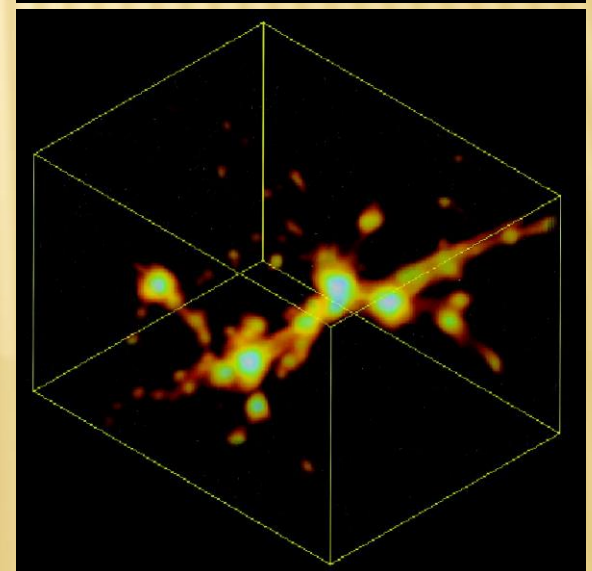
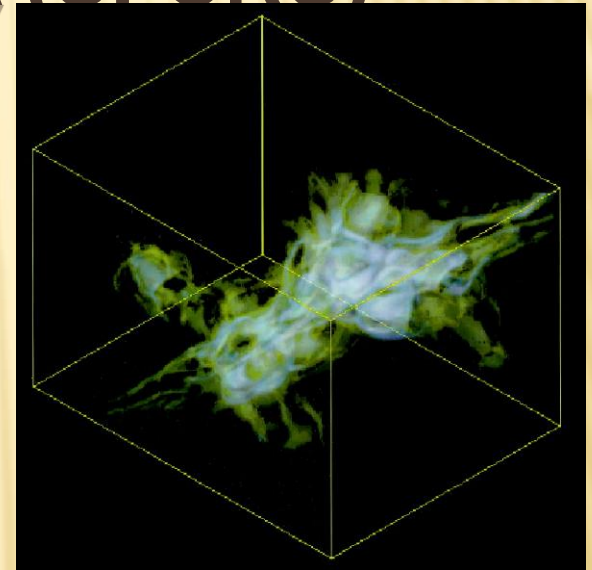
- × Garantovani izvori – normalne galaksije (Pavlidou & Fields 2002)
- × Očekivani izvori – formiranje velikih struktura
- × Egzotični izvori (tamna materija)



# KOSMIČKO ZRAČENJE USLED FORMIRANJA STRUKTURA (SFCRS)

Miniati et al. 2000

- ✗ Kosmološko kosmičko zračenje
  - + Udarni akrecioni talasi tokom nastanka jata galaksija (eg. Miniati 2000)
  - + Doprinosse gamazračnoj pozadini (Loeb & Waxman 2000)
  - + Očekivana detekcija na jatima galaksija (eg. Colafrancesco & Blasi 1998, Brunetti et al 2012)
  - + Ali Fermi-LAT merenja dala samo limite
  - + SFCRs i dalje nedetektovani!





# MODELIRANJE SFCCR ZRAČENJA

## × Šta nam treba:

+ Model evolucije izvora (akrecioni udarni talasi)

(Pavlidou & Fields 2006)

+ Fluks gama zračenja jednog izvora

### × Nemamo

★ Koristimo limit detekcije nekog jata

★ Dobijamo samo gornju granicu ukupnog gama fluksa od svih jata galaksija (Dobardzic & Prodanovic 2014)

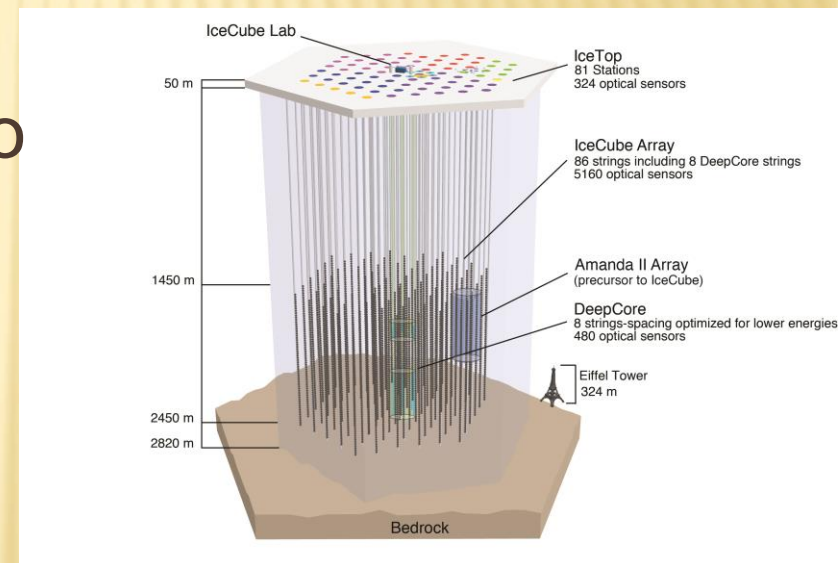
### × Imamo

★ Iskoristimo fluks visokoenergetskih neutrina (Dobardzic & Prodanovic 2015)

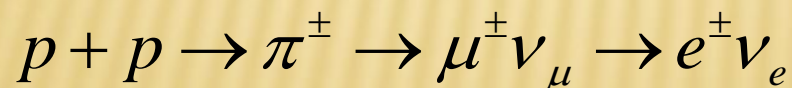
# MODELIRANJE SFCCR ZRAČENJA

✘ IceCube detektovao visokoenergetske (TeV-PeV!) neutrine (IceCube Collaboration 2014, 2015)

- + Spektar  $g \sim 2$  i  $g \sim 2.4$
- + Izotropno – vangalaktičko
- + Izvori: aktivna galaktička jezgra, jata galaksija itd.?

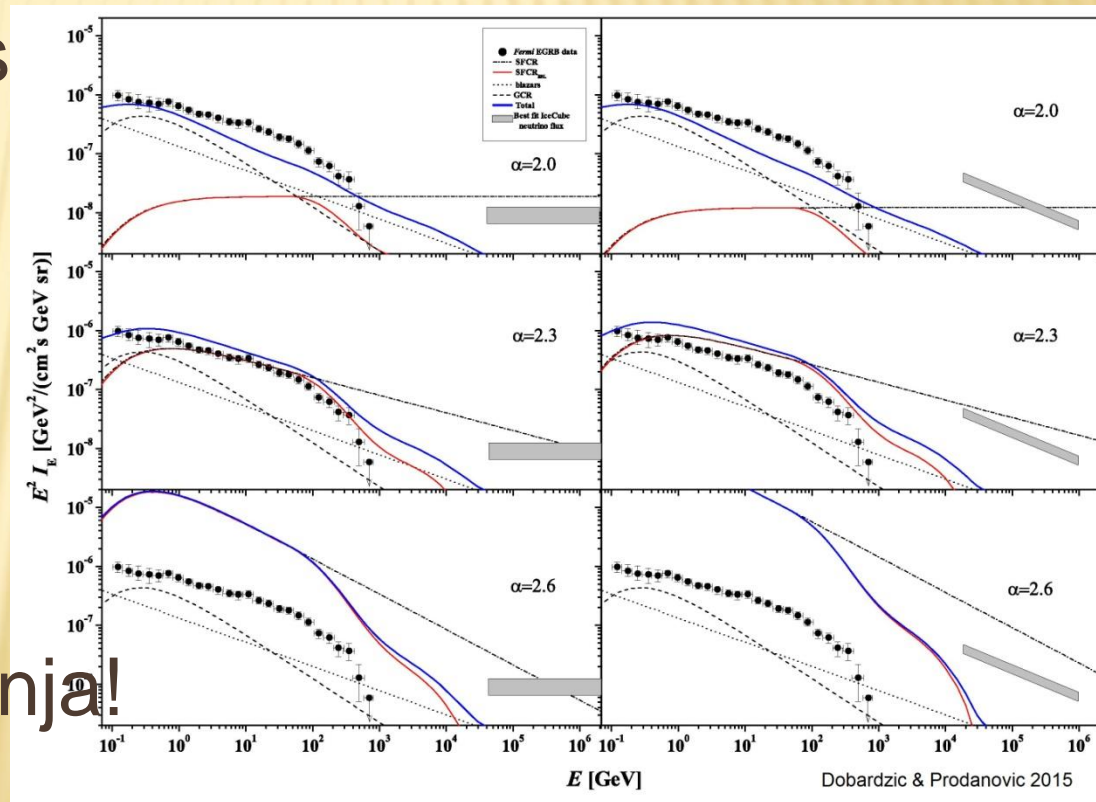


✘ Pretpostavimo da je od SFCCRs!



# MODELIRANJE SFCCR ZRAČENJA

- ✘ IceCube detektovao visokoenergetske (TeV-PeV!) neutrine (IceCube Collaboration 2014, 2015)
- ✘ SFCCR gama fluks = 2x neutrinski (za spektralni indeks 2)
- ✘ Najjači limit!
- ✘ Govori o izvorima i efikasnosti ubrzanja!

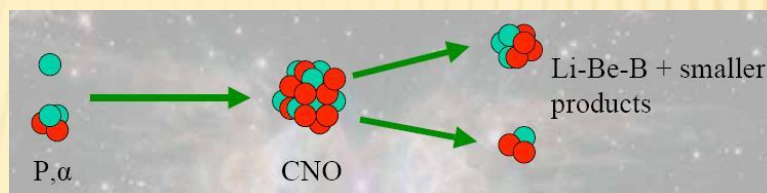


# SFCR BUDUĆNOST

- ✘ Kosmočko zračenje iz velikih struktura (jata) još nije detektovano
- ✘ Mora postojati u nekoj meri
- ✘ **Bolji modeli ubrzanja čestica na jatima!**
- ✘ Čekamo detekciju jata galaksija u gama domenu
- ✘ Na ovaj način naučićemo o najranijim udarnim talasima

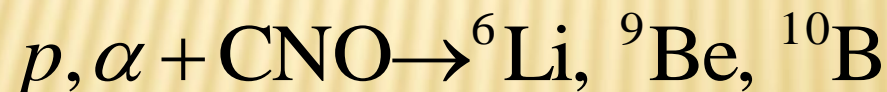
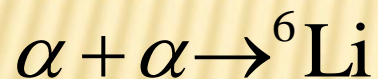
# PRIMORDIJALNI ELEMENTI I KOSMIČKO ZRAČENJE

- ✗ LiBeB nastaju u interakcijama kosmičkog zračenja



- ✗ Kosmički dozimetri -  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$  i  ${}^{10}\text{B}$

+ Nastaju samo putem kosmičkog zračenja !

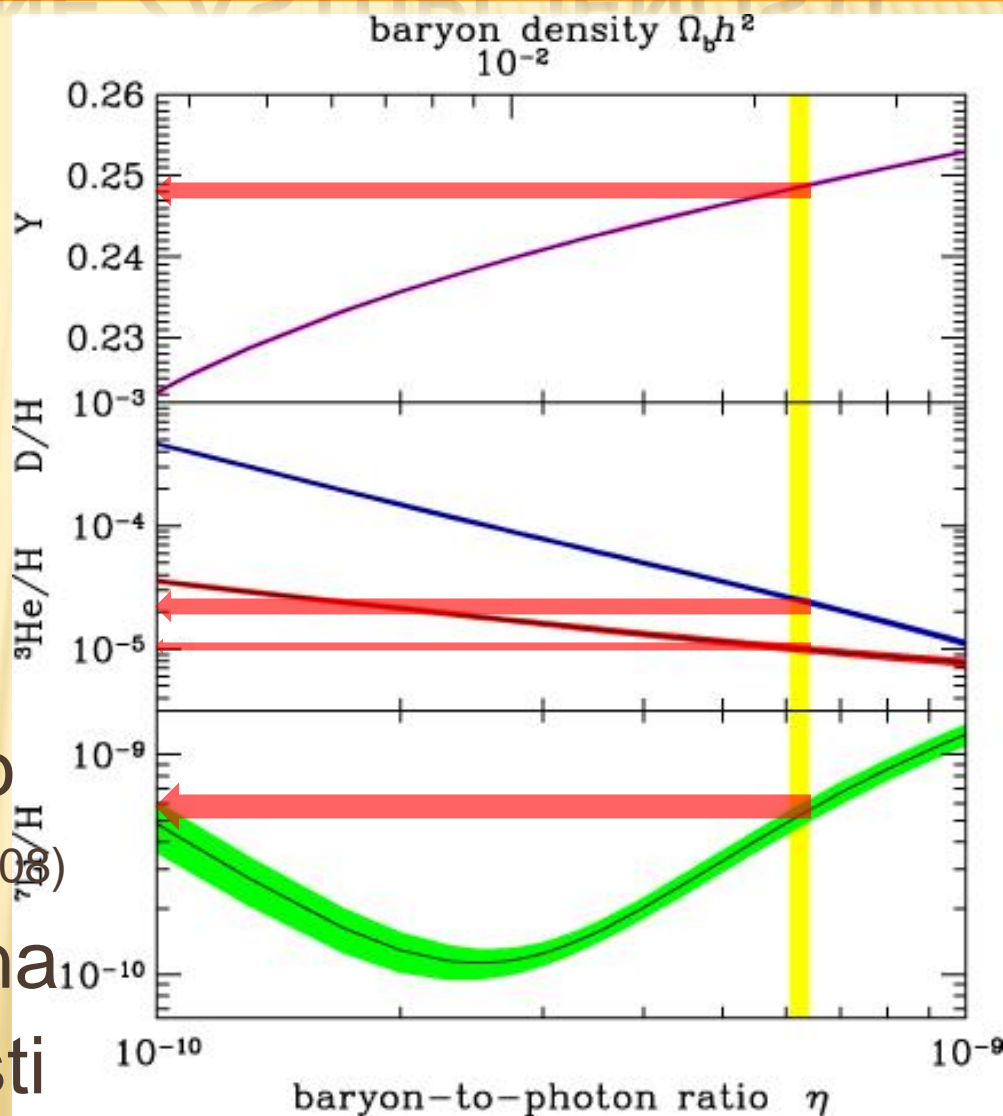


- + “snimaju” izloženost kosmičkom zračenjem
- + Testiramo izvore kosmičkog zračenja



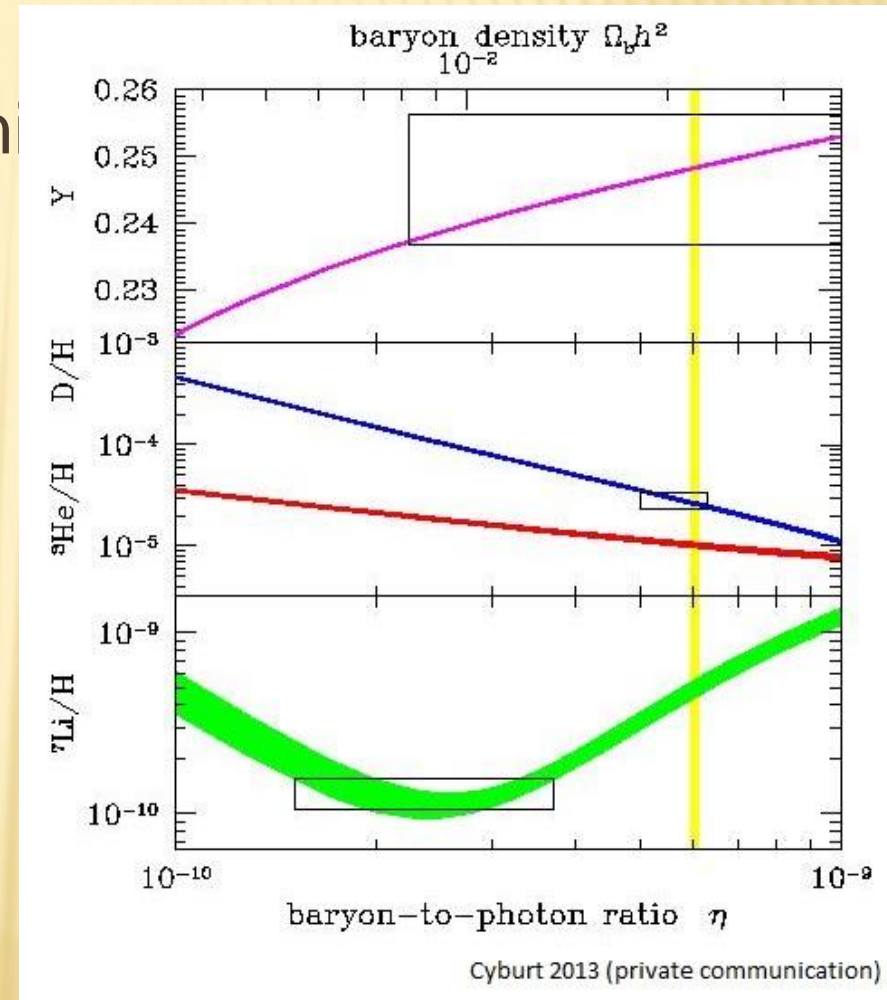
# PRIMORDIJALNE ZASTUPLJENOSTI

- ✘ “Schramm” grafik
- ✘ Zastupljenost vs gustina bariona
- ✘ Krive: Predikcije BBN modela
- ✘ Kosmičko pozadinsko zračenje (WMAP: Dunkley 2008)
  - fiksira gustinu bariona
- ✘ Očitamo zastupljenosti



# TEORIJA VS POSMATRANJA?

- ✗ BBN teorijske krive
  - ✗ CMB, Planck 2013 – barion
  - ✗ Posmatranja - pravougaonici
- 
- ✗  $^4\text{He}$  – OK 😊
  - ✗ D – super! 😊
  - ✗  $^7\text{Li}$  – problem! ☹️
- Faktor 3-4 razlike!



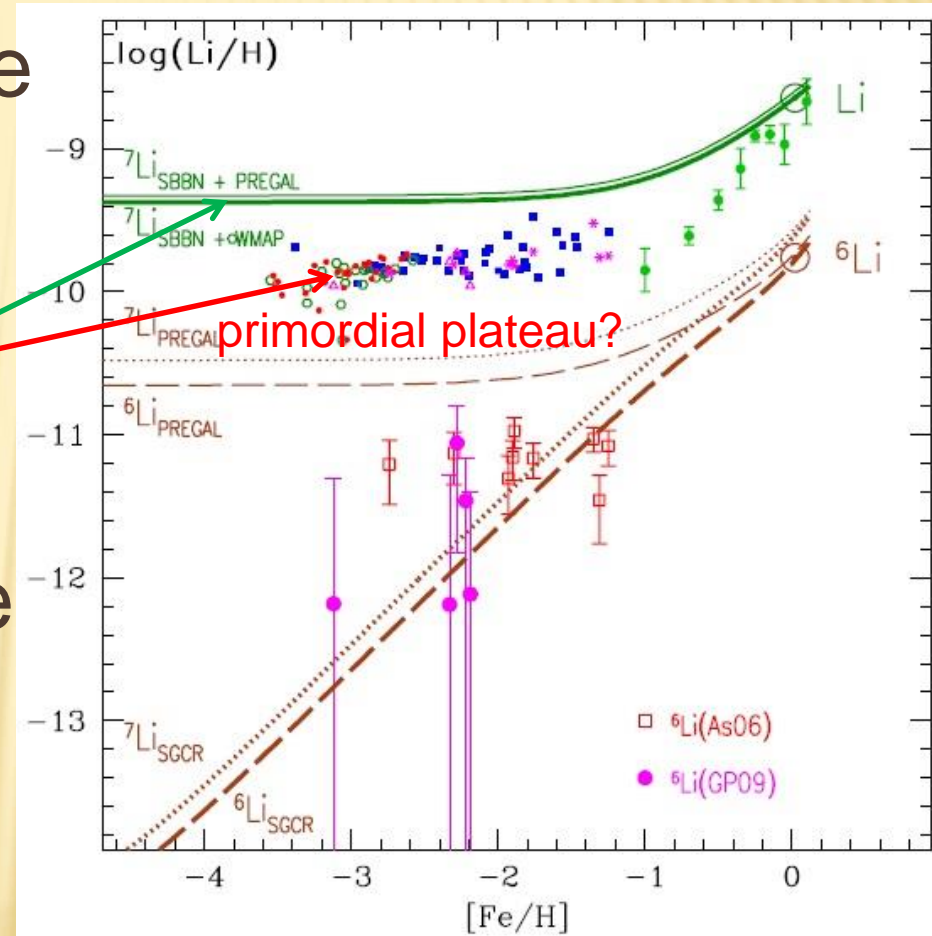
**PROBLEM LITIJUMA!**

# PROBLEM LITIJUMA

- ✘ Stare, tople, patuljaste zvezde siromašne metalima
- ✘ Mereni primordijalni “plato” ~ **2-4x niži** od teorijske primordijalne zastupljenosti

$$\left(\frac{{}^7\text{Li}}{\text{H}}\right)_p = \left(5.24^{+0.71}_{-0.62}\right) \times 10^{-10}$$

$$\left(\frac{{}^7\text{Li}}{\text{H}}\right)_{obs} = \left(1.23^{+0.68}_{-0.32}\right) \times 10^{-10}$$





# ŠTA JE UZROK PROBLEMA?

- × **Posmatranja?**
- × Merene zastupljenosti pogrešne
- × Problem modeliranja zvezdanih atmosfera?
- × **Teorija?**
- × Merene zastupljenosti ok
- × **Nova fizika?**



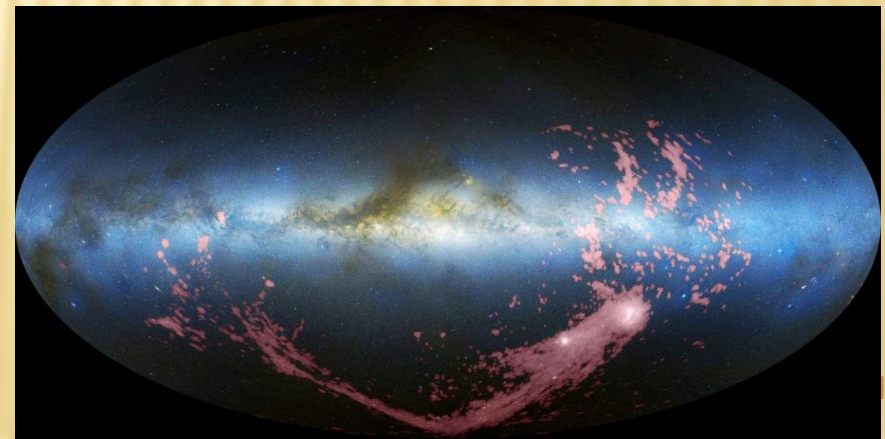
# MERITI LITIJUM NA NOVIM MESTIMA!

- ✘ Mali Magelanov oblak (Howk et al 2012)
  - + Metaličnost  $\sim 0.20$  solarne
  - + Izmeren litijum u gasu međuzvezdane sredine (i odnos izotopa!)
  - + Ne razmišljamo o zvezdanom modeliranju
  - + **Mereni Li u skladu sa primordijalnim...ako zvezde slabo proizvode elemente....**
  - + **Ali izmeren  $6\text{Li}/7\text{Li}$  atipično visok!?**



# MAGELANOVI OBLACI POGODNI?

- ✘ “Magellanic stream” – zbog plimskih interakcija između Magelanovih oblaka pre  $\sim 2\text{Gyr}$ ? (Diaz & Bekki 2012)
- ✘ Interakcije galaksije – udarni talasi na velikoj skali (cf. Cox et al. 2006)
- ✘ Bliski prilazi galaksija – plimski udarni talasi
- ✘ Plimski udarni talasi + magnetno polje = **plimsko kosmičko zračenje (TCR)**



# PLIMSKO KOSMIČKO ZRAČENJE: POSLEDICE

- ✘ **Povećanje zastupljenosti kosmičkih dozimetara (LiBeB)**
  - + Uticati na problem primordijalnog litijuma
  - + Implikacije za novu fiziku?
- ✘ **Pojačano netermalno zračenje – gama i radio**
  - + Teško razdvojiti od normalnog galaktičkog kosmičkog zračenja (GCR)
  - + Posledice za razumevanje evolucije galaksija

# POVEĆANJE ZASTUPLJENOSTI

- ✘ Koliko litijuma može biti proizvedeno u ovim interakcijama? (Prodanovic et al. 2013)
- ✘ U sistemu kao SMC (metaličnost ~ 1/5 solarne)
  - + Dovoljno 2 interakcije da plimsko CR naprave isto lithiuma kao galaktičko CR!

$$M_{TCR,gas} / M_{gas,SMC} \approx 2$$

- + SMC je pretrpeo bar 2 interakcije 1 sa Velikim Magelanovim oblakom i 1 sa Mlečnim putem!
- ✘ U skladu sa izmerenim visokim odnosom izotopa u SMC (Howk et al. 2012)

# POVEĆANJE ZASTUPLJENOSTI

- ✘ Li izmeren u SMC-u mora biti korigovan za dodatnu proizvodnju Li usled plimskog kosmičkog zračenja!
- ✘ Znači da izmereni Li nije u skladu sa primordijalnim!
- ✘ Rešenja problema litijuma u novoj fizici?

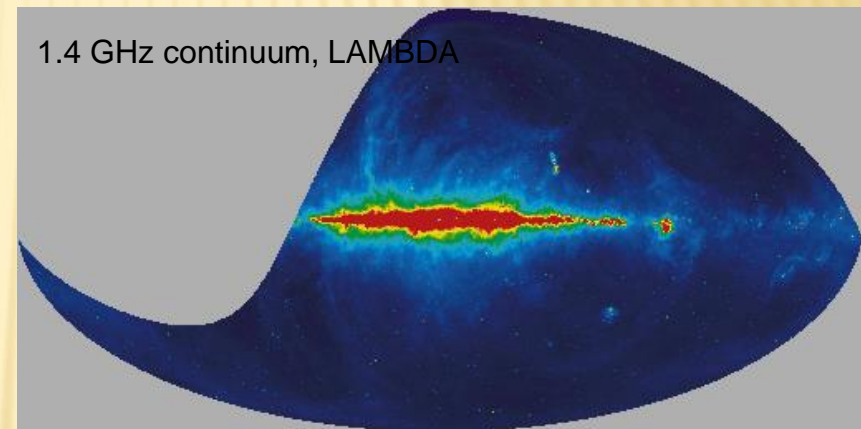
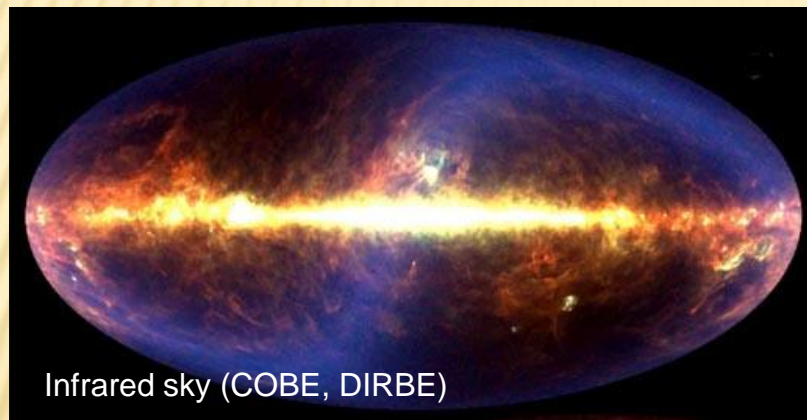
# POJAČANO NETERMALNO ZRAČENJE

- ✘ Pojačana radio emisija galaksija zbog prisustva dodatne komponente kosmičkog zračenja
  - + očekivana jaka sinhrotronska emisija
- ✘ **Posledice za korelaciju između daleke infracrvene (FIR) i radio emisije zvezdorodnih galaksija** (Donevski & Prodanovic 2015)
- ✘ Posledice po procenu stope rađanja zvezda
- ✘ Posledica po određivanje stope interakcije galaksija

# FIR-RADIO KORELACIJA

## ✘ FIR emisija prašine

+ procesovana UV svetlost **masivnih zvezda**



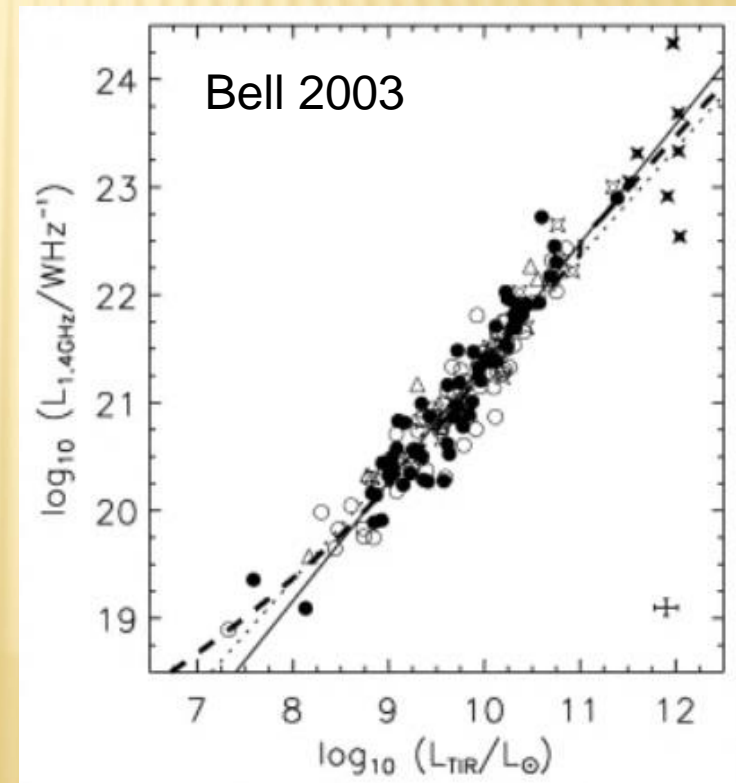
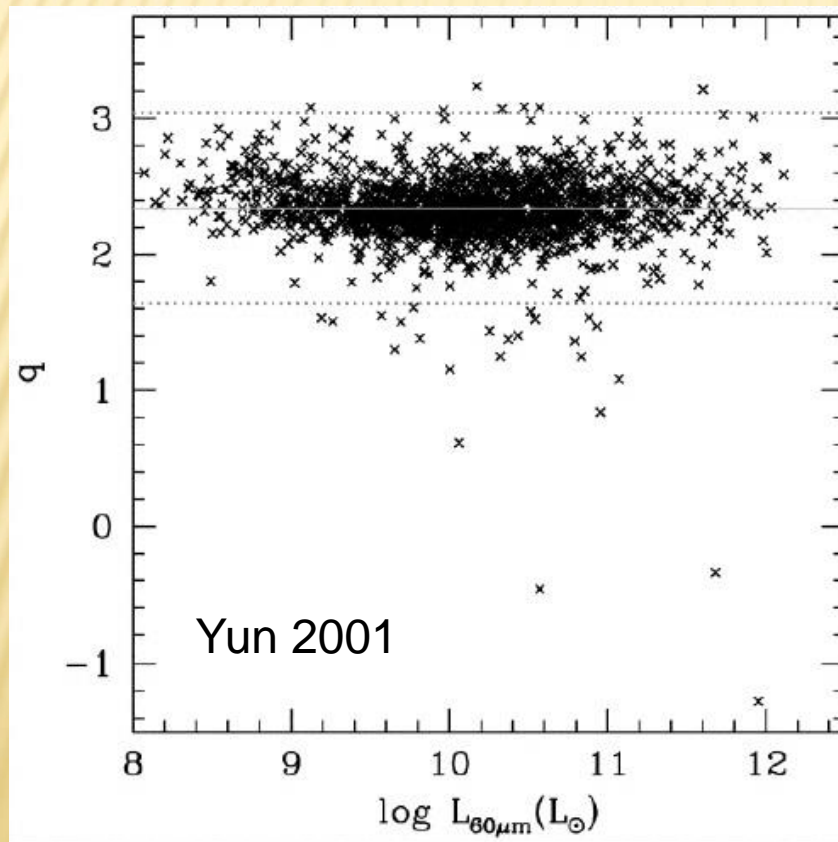
## ✘ Netermalno radio zračenje (sinhrotronsko) elektrona galaktičkog kosmičkog zračenja

+ kosmički elektroni ubrzani u ostacima supernovih nastalih od **masivnih zvezda**



# FIR-RADIO KORELACIJA

$$q_{IR} = \log \left[ \frac{S_{\nu, IR}}{S_{\nu, 1.4GHz}} \right] = 2.34$$



# VAŽAN ALAT!

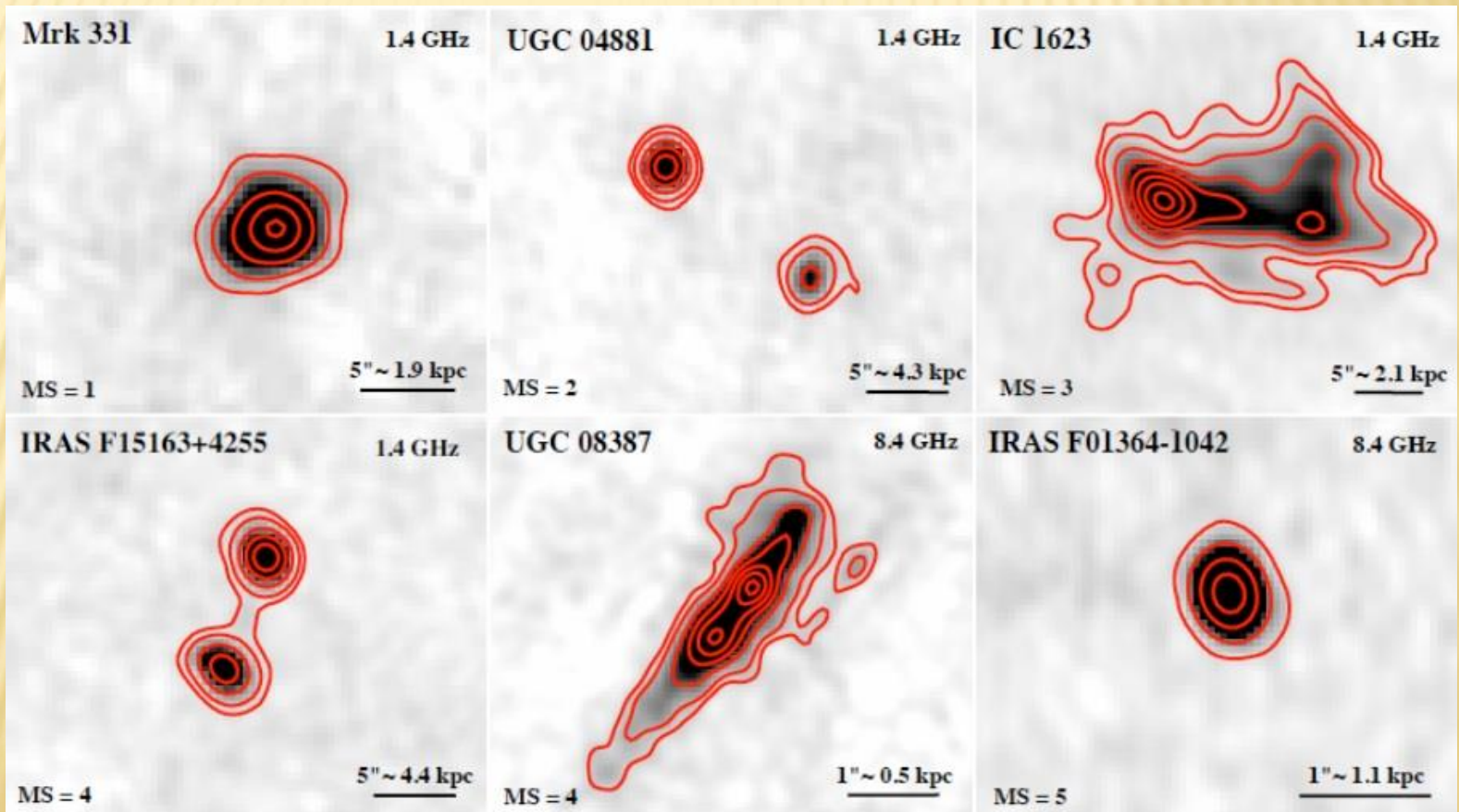
- × **FIR-radio korelacija** je indikator:
  - + Stope rađanja zvezda (evolucija galaksije)
    - × Radio posmatranja → FIR luminoznost → SFR
  - + Starosti zvezdorodnih galaksija
  - + Udaljenosti
- × Empirijski utvrđena
- × Smatra se da je stabilna – malo rasejanje

# UTICAJ GALAKTIČKIH INTERAKCIJA

- ✘ Udarni talasi – **zagrevanje i dodatno ubrzanje** čestica (plimsko kosmičko zračenje)
  - + važno u ranijim fazama interakcije
  - + najizračenije kod manje od interagujućih galaksija
- ✘ Gledamo kako se FIR-radio korelacija i spektralni indeks zračenja menjaju u različitim fazama interakcije galaksija

# FAZE SUDARA GALAKSIJA

## × “Toomre sequence”



(Murphy, 2013)

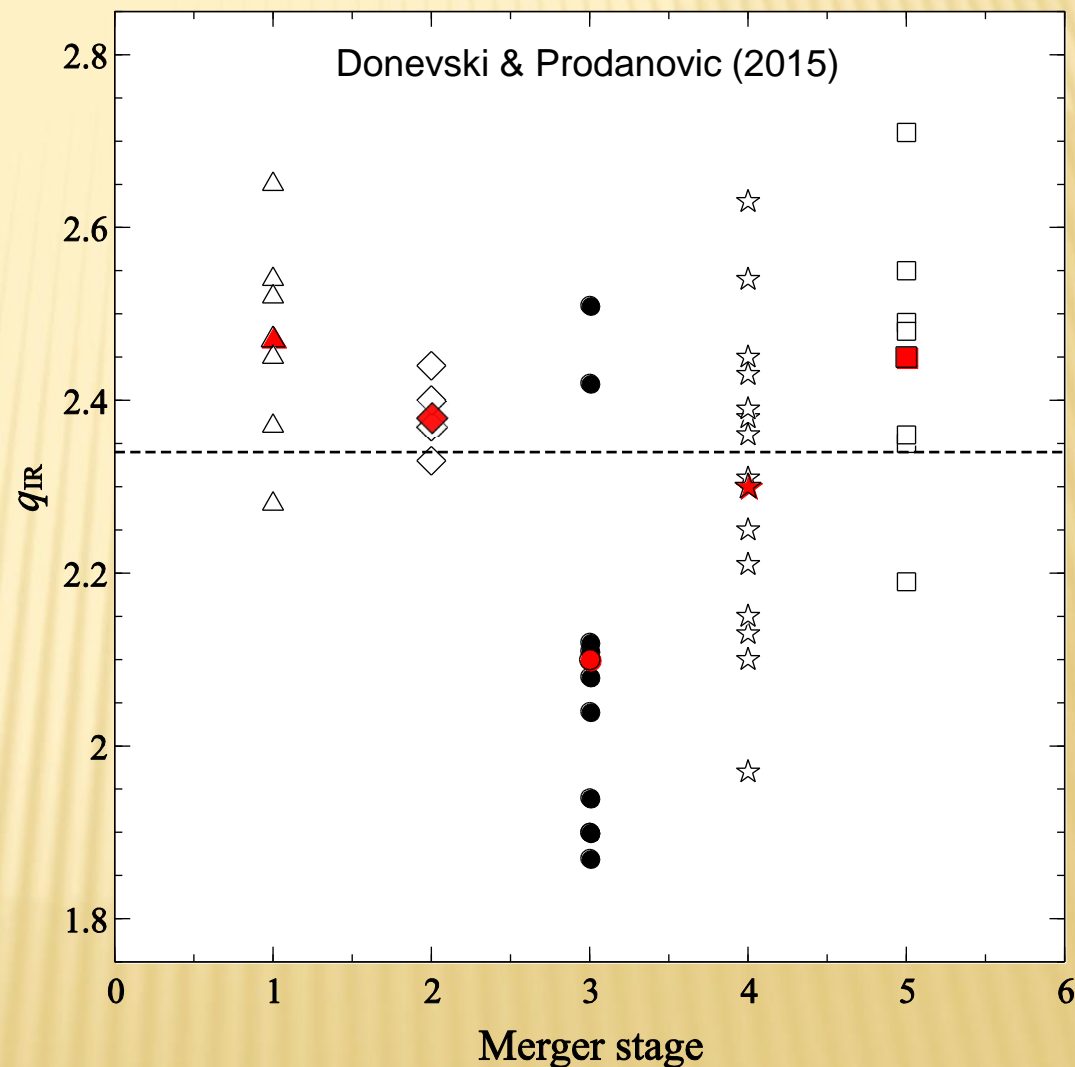
# UTICAJ GALAKTIČKIH INTERAKCIJA

- × Šta očekujemo po fazama?
  - + **vrlo rano** – udarni talas **zagreva** gas i prašinu – **pojačana IR emisija** -  $q_{IR}$  raste
  - + **rano - ubrzanje** čestica (TCRs) – **pojačana radio emisija** -  $q_{IR}$  opada
  - + **kasnije** - udarni talasi kao okidač **rađanja zvezda**
    - × mlade zvezde zagrevaju + ubrzanje čestica (GCRs) – **pojačana i IR i radio emisija** -  $q_{IR}$  opada pa raste
  - + na kraju – sve se vraća u normalu
- × FIR-radio korelacija evoluira sa fazom interakcije!

# REZULTAT:

- ✘ Uzorak od 43 interagujuće galaksije
- ✘ Tipična, stara, vrednost FIR-radio korelacije (Yun et al. 2001):

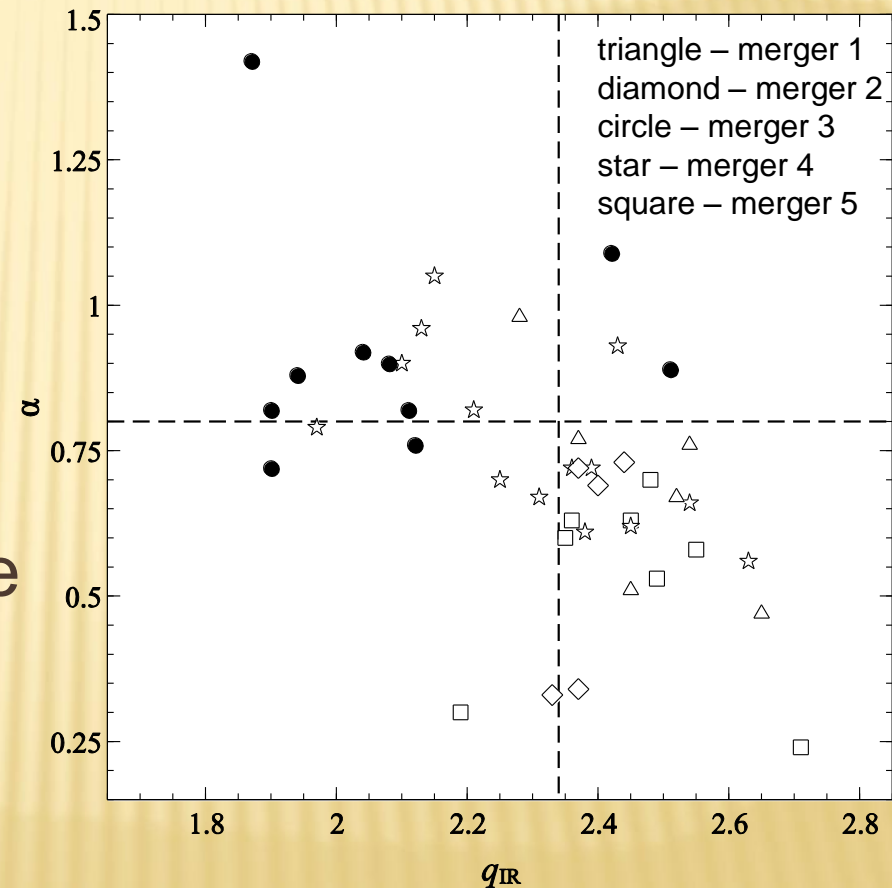
$$q_{IR} = 2.34$$



# REZULTAT: SPEKTRALNI INDEKS

- ✘ Radio fluks  $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$
- ✘ Spektralni indeks
  - + strmiji – jače netermalno zračenje
  - + Manji indeks – jača termalna komponenta
- ✘ Rane faze sudara – očekujemo prvo zagrevanje i manje indeks pa kasnije više netermalnog i veći indeks (TCRs)

Donevski &amp; Prodanovic (2015)



# INTERAKCIJE GALAKSIJA: VIŠE OD PROSTE MORFOLOGIJE

- ✘ Plimski udarni talasi i kosmičko zračenje!
- ✘ Uticaće na **zastupljenosti elemenata** – problem primordijalnog litijuma!
- ✘ Daće pojačano **netermalno zračenje** i **zagrevanje** udarnim talasima
- ✘ **Narušavaće FIR-radio** korelaciju (npr. Canameras et al. 2015, Alatao et al. 2016, Miettinen et al. 2015)
- ✘ Posledica po određivanje stope rađanja zvezda i evoluciju galaksija



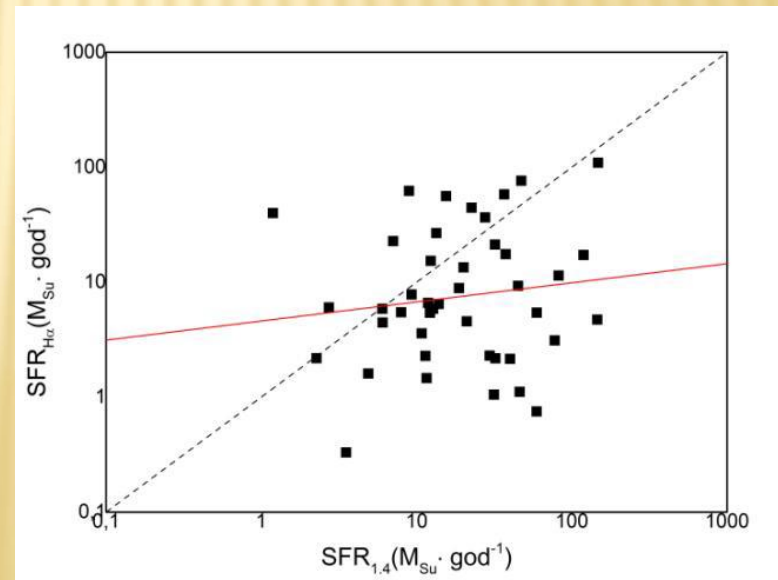
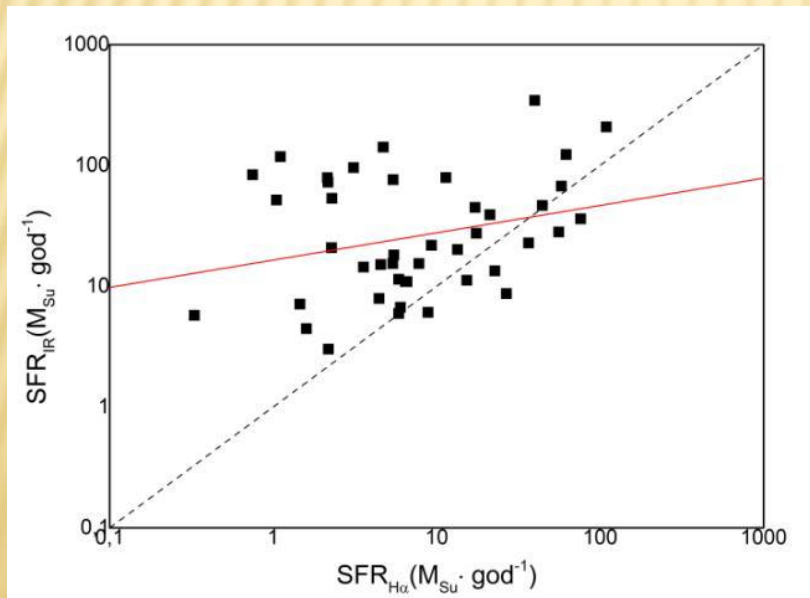
# PLIMSKO KOSMIČKO ZRAČENJE KAO NOVA METODA!

- ✘ **Moguć marker interakcije galaksija na velikim crvenim pomacima!**
- ✘ Interagujući sistemi se identifikuju danas
  - A. kao bliski parovi
  - B. preko deformisane morfologije
  - + obe metode nepouzidane za male galaksije i na velikim crvenim pomacima
- ✘ Identifikacija interakcija putem plimskog kosmičkog zračenja
  - + najznačajnije za male galaksije
  - + najizraženije za velike crvene pomake

# „TO DO“ LISTA:

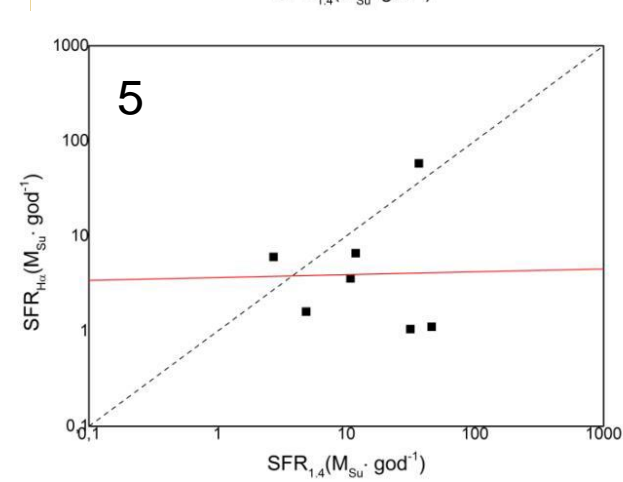
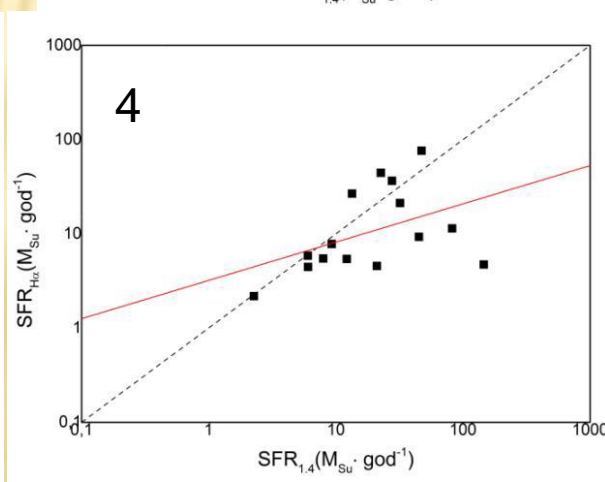
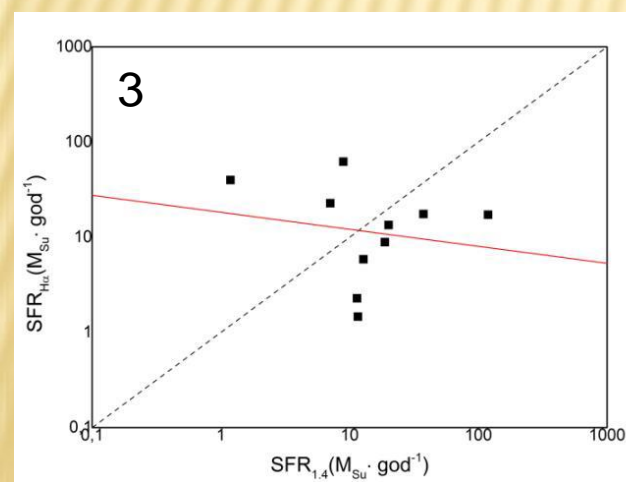
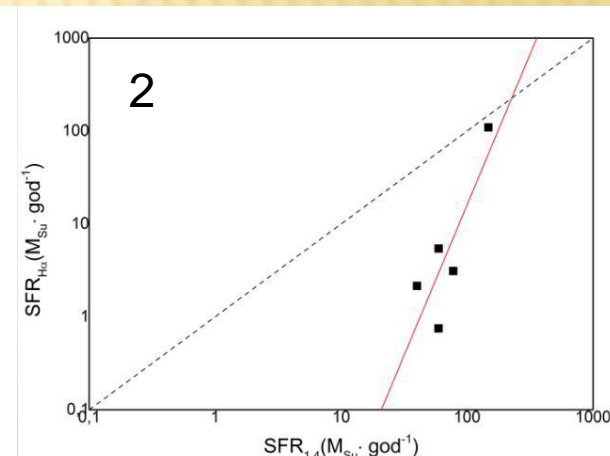
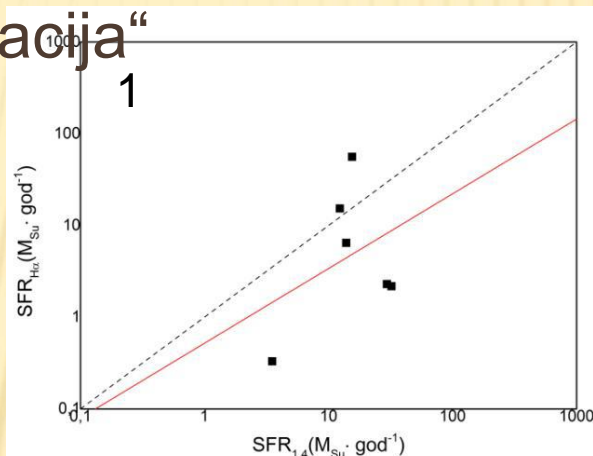
- ✘ Ispitivanje indikatora brzine formacije zvezda i uticaja faze sudara
  - + Stopa formiranja Zvezda – iz FIR radio korelacije, H $\alpha$  emisije, UV zracenja

PRELIMINARNO!



# SFR U ZAVISNOSTI OD FAZE SUDARA

- ✘ Jake varijacije u određenoj SFR vrednosti od faze do faze u zavisnosti od markera
- ✘ Moguća „kontaminacija“ usled nezvezdanih procesa
- ✘ Neophodne korekcije za H $\alpha$

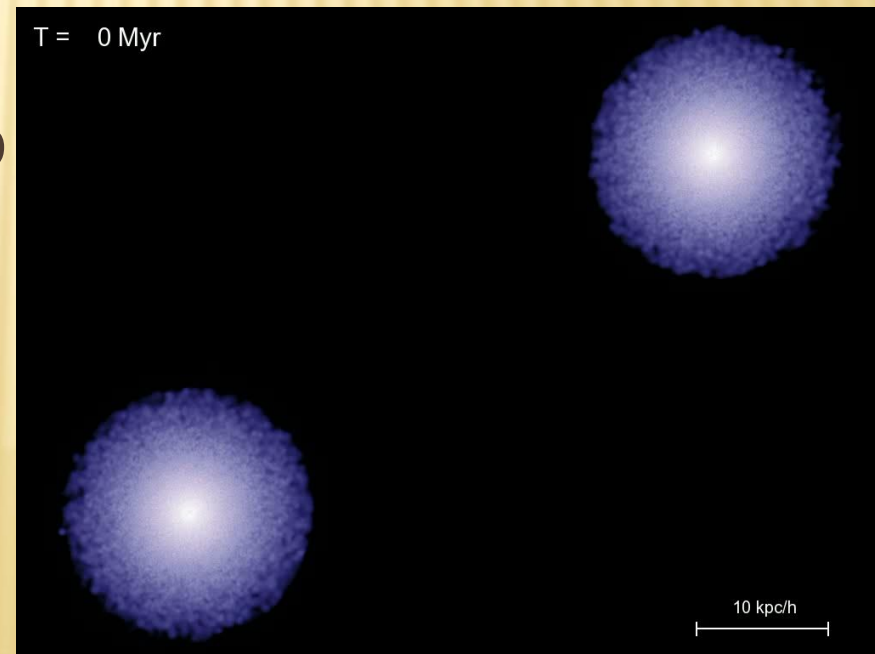
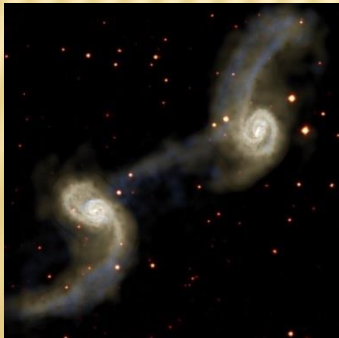


# „TO DO“ LISTA:

- ✘ Reevaluacija sistema odbačenih kao AGJ; Interagujuća galaksija ili AGJ? (Moric et al 2010, Smolcic et al 2008)
  - + Neki sistemi sa visokim spektralnim indeksom označeni kao AGJ samo na osnovu toga (bez pojačane MIR emisije) i na osnovu odstupanja od FIR-radio korelacije (Wardlow et al. 2013)
  - + IR i mm posmatranja “prašnjavih” galaksija isključuju AGJ kao izvor zagrevanja i pojačanog FIR i radio zračenja (Canameras et al. 2015)
  - + Moguća pojačana radio emisija i visok spektralni indeks zbog ubrzanja TCR
  - + Proveriti sa drugim markerima aktivnosti

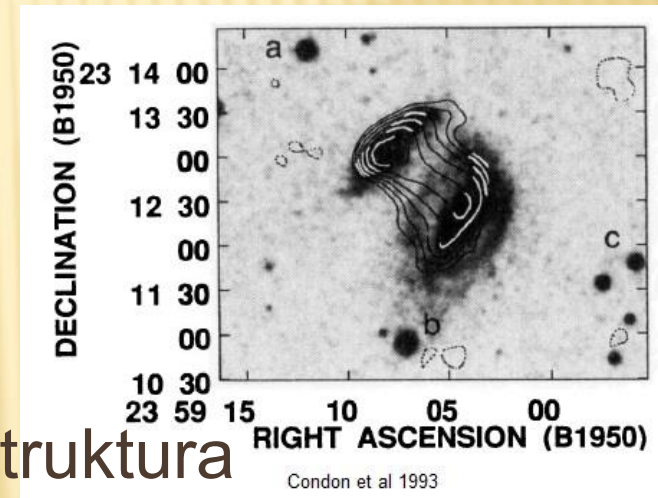
# „TO DO“ LISTA:

- ✘ Testiranje vremena disipacije udarnih talasa u postojećim MHD simulacija za različite bliske prilaze (npr. GADGET-2, MPIA Garching, Springel 2005)
  - + Trajanje i prostiranje plimskih udarnih talasa najveća nepoznanica
  - + Efikasno ubrzanje samo dok se talas prostire



# „TO DO“ LISTA:

- ✘ Procena efikasnosti ubrzanja kosmičkog zračenja
  - + Murphy 2013 analizirao uticaj faze sudara na zračenje “taffy” sistema
  - + Pretpostavka da se ubrzanje dešava samo u mostu između struktura
  - + Jednostavan model ubrzanja po uzoru na Lisenfeld & Volk 2010
    - ✘ Modelirali za dva posmatrana interagujuća sistema sa viškom radio zračenja u mostu
    - ✘ Ista analiza ali za ubrzanje u celoj galaksiji kod galaksija koje generalno pokazuju višak
    - ✘ Modelira se očekivano sinhrotronsko zračenje



# „TO DO“ LISTA:

- ✘ Veći uzorak lokalnih interagujućih galaksija – radio, IR, H $\alpha$  posmatranja
- ✘ Dodatna posmatranja manjih interagujućih galaksija.
- ✘ **Razvoj novih indikatora interakcije galaksija**
- ✘ Testiranje i primena na uzorku interagujućih galaksija na velikom crvenom pomaku – radio, IR, sub-mm (e.g. JVLA-COSMOS).

# ZAKLJUČAK

- ✘ Kosmičko zračenje - gama zračenje – litijum
- ✘ Povezani!
- ✘ Svuda gde udarni talasi i magnetno polje!
- ✘ Značajno plimsko kosmičko zračenje?
  - + Objašnjava sav litijum u Malom Magelanovom oblaku – nestandardna fizika?
  - + Utiče na FIR-radio korelaciju – marker interakcije galaksija?
  - + Mora se više ispitati! Novo polje!





HVALA 😊

PITANJA?