

RADIOPULSARIT

URSALO 07.11.2019

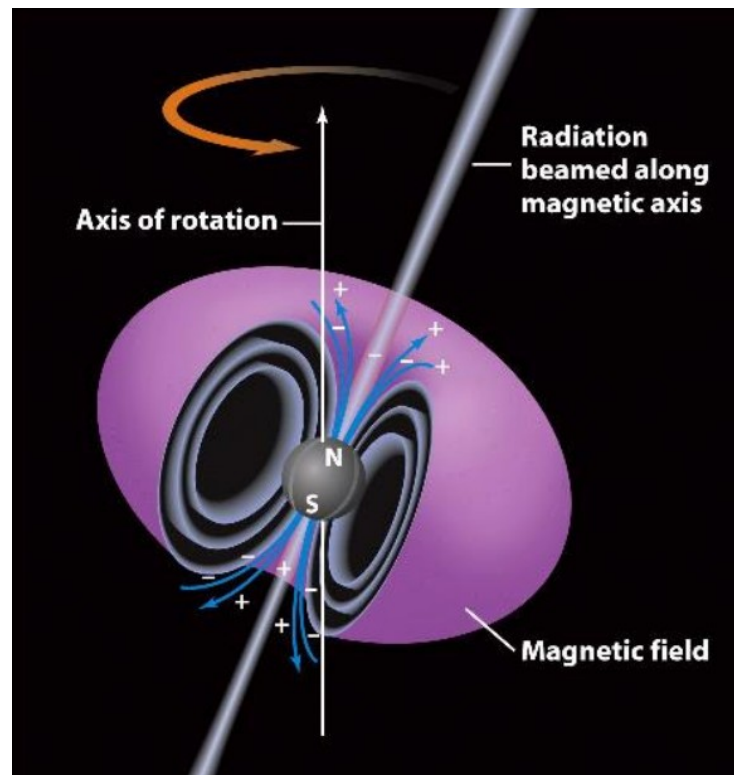
Janne Peltonen

SISÄLTÖ

- Mikä on pulsari?
- Pulsarien löytyminen
- Pulsarien muodostuminen
- Pulsarien havaitseminen
- Omat pulsarihavainnot
 - Petri Kotilainen
 - Janne Peltonen

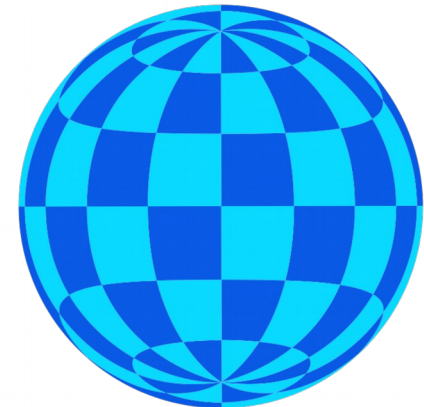
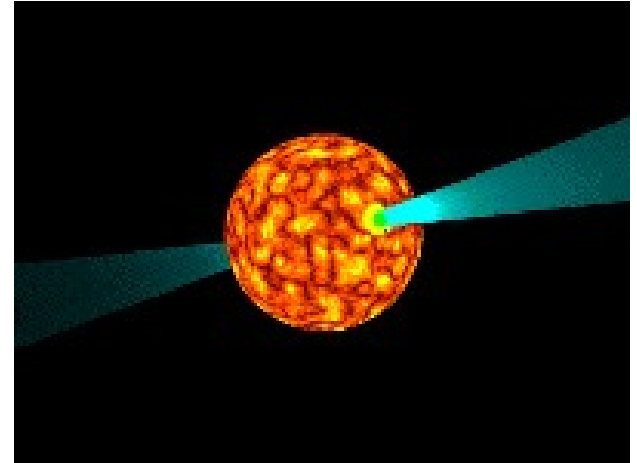
MIKÄ ON PULSARI?

- Pulsari on pyörivä neutronitähti tai valkoinen kääpiö = "pulsing star"
- Koostuu pääasiassa neutroneista
- Erittäin tiheä
- Halkaisija noin 10..30 km
- Syntyy supernovaräjähdyksessä
- Pyöriminen tuottaa radiopulsseja
- Materia johtavaa
- Dynamoefekti -> Synkrotroniradiosäteilyä

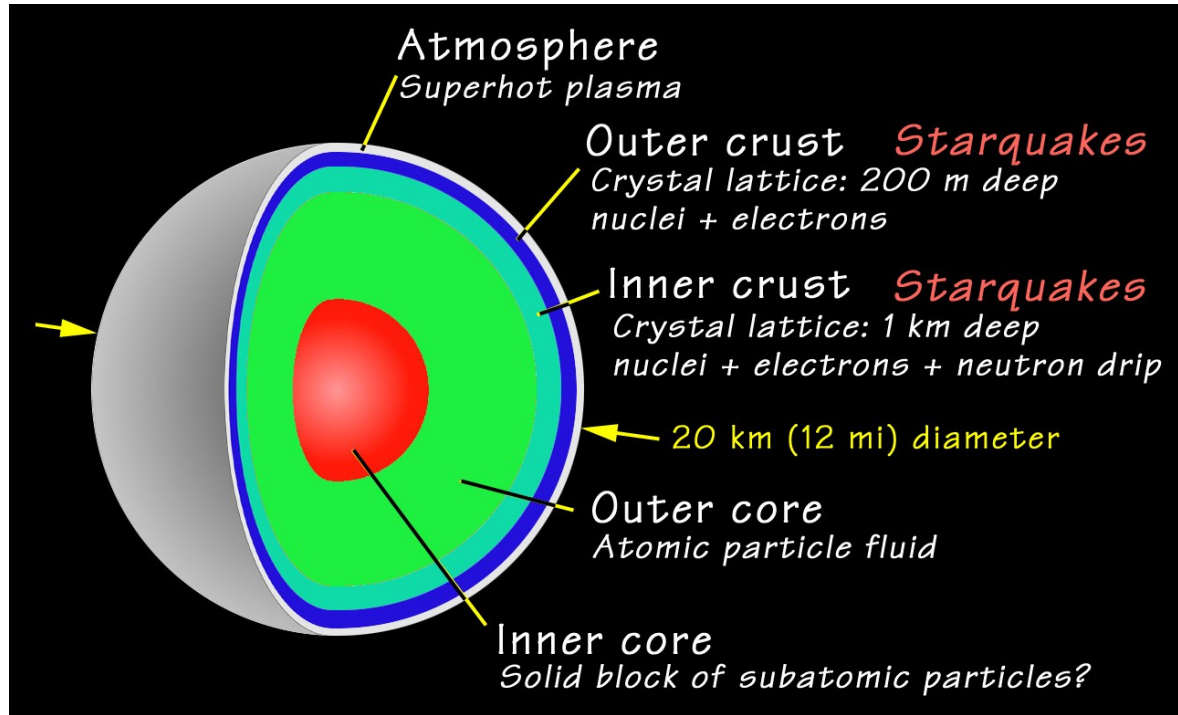


PULSARIEN OMINAISUUKSIA

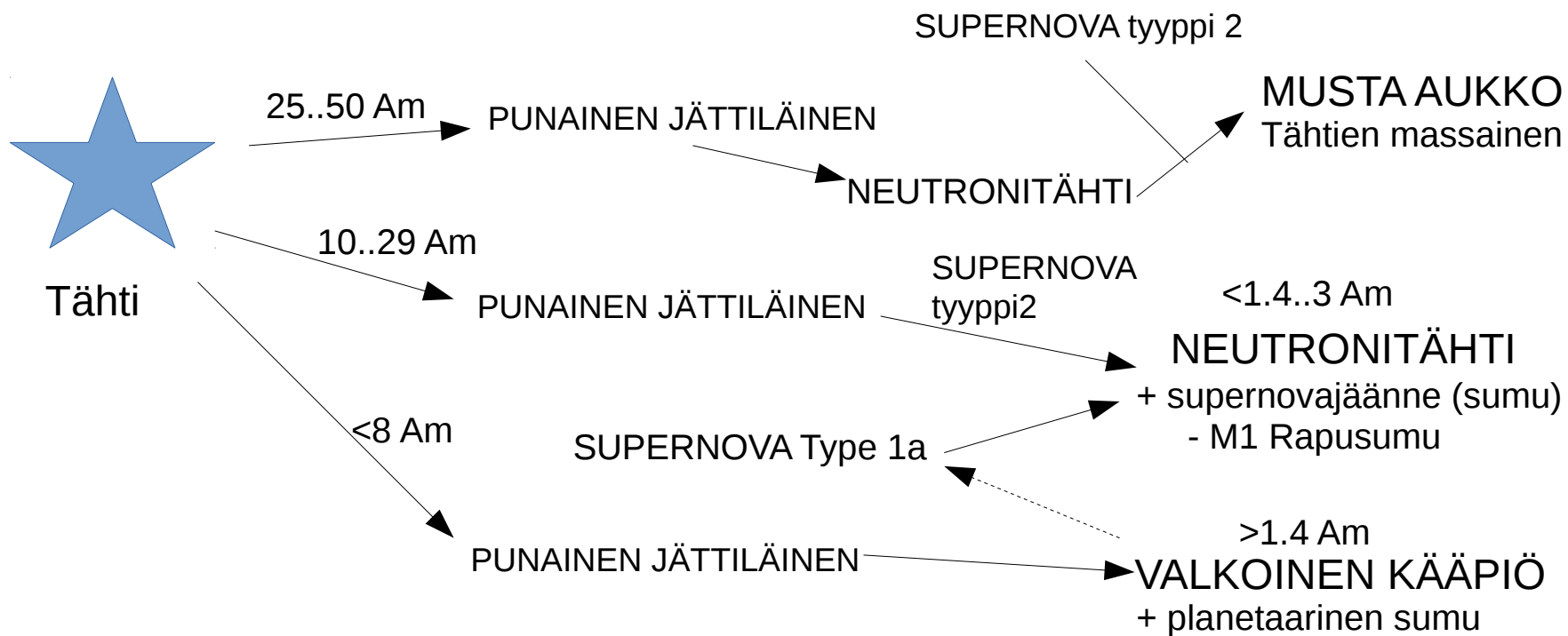
- Tiheys on noin $5 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$
- Normaali atomiytimen tiheys on $3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$
- Teelusikallinen painaisi $5.5 \cdot 10^{12} \text{ kg} = 900 \times$ Kheopsin pyramidia
- Materia on suprajohtavaa
- Magneettikenttä pinnalla $10^4 \dots 10^9$ teslaa
- Vahvin ihmisen tekemä magneetti 16 teslaa
- Pulsari menettää energiaa säteilynä ja hidastuu
- Radiosäteily, röntgensäteily yms. +(gravitaatiosäteily?)
- Nopein pulsari PSR J1748–2446ad pyörii $716 \text{ r/s} = 1.4 \text{ ms}$
- Hitain pulsari 23.5 s kierros = 0.0425 kierrosta sekunnissa
- Pakonopeus pinnalla noin $0.7 c$



PULSARIN RAKENNE



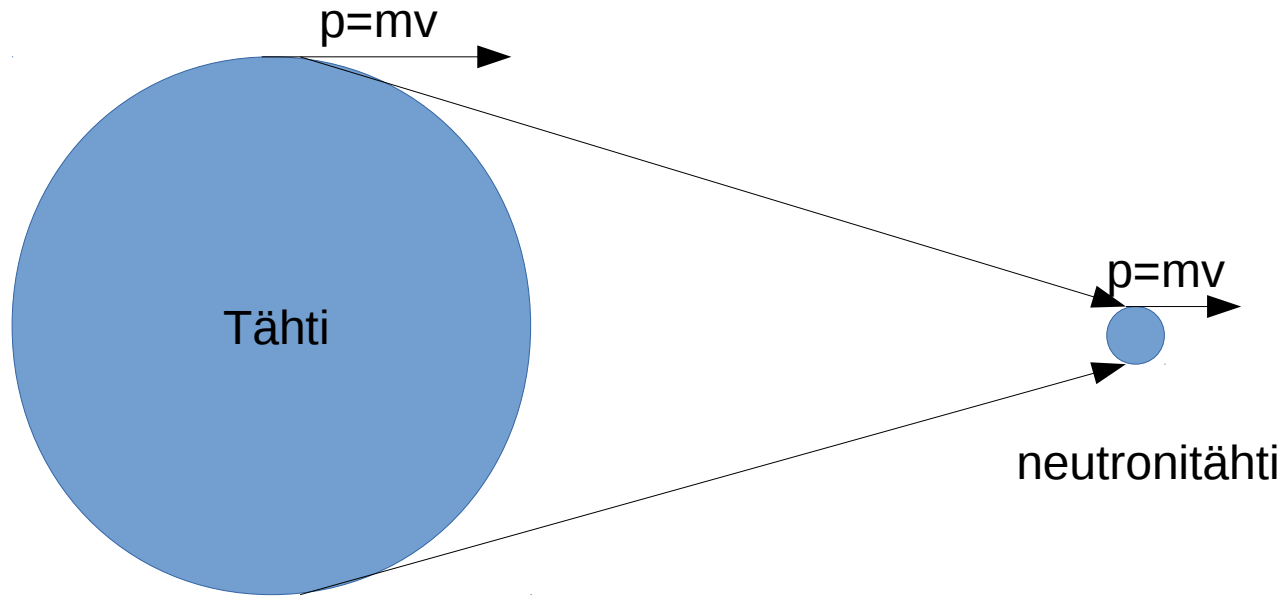
PULSARIEN MUODOSTUMINEN



Chandrasekharin raja on valkoisen kääpiön suurin mahdollinen massa = $1.4 M_{\odot}$

Tolmanin–Oppenheimerin–Volkoffin raja on neutronitähtien massan teoreettinen yläraja = noin $3 M_{\odot}$

PULSARIEN MUODOSTUMINEN

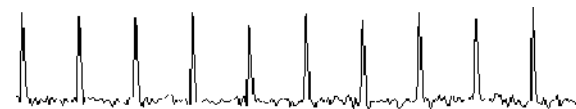
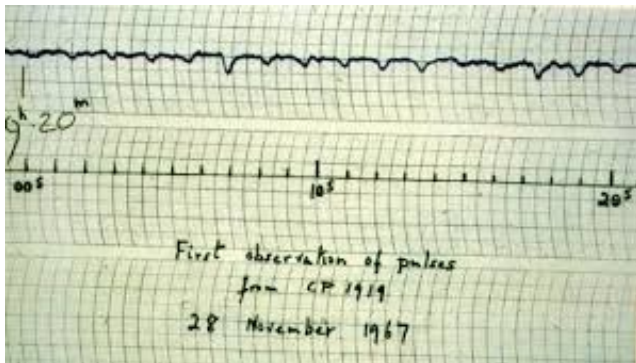


Pyörimismäärä säilyy ja säteen pienentyessä pyörimisnopeus kasvaa

Jos Aurinko muuttuisi neutronitähdeksi noin 20km, niin se pyörisi 550 kierrosta sekunnissa (1.8ms)

PULSARIEN LÖYTYMINEN

- Ensimmäinen pulsari PSR 1919+21 löytyi vahingossa 28.10.1968
- Löytäjinä Jocelyn Bell Burnell ja Antony Hewish
- Tutkivat aurinkotuulen aiheuttamaa tuikkimista “interplanetary scintillation”
- 1974 Antony Hewish ja Martin Ryle saivat löydöstä Nobelin palkinnon



LGM?

PULSARIEN HAVAITSEMINEN

- Havaitsemisen vaikeus
- Pulsarin ilmiöitä radiotaajuudella
- Antenni
- Vastaanotin
- Ohjelmistot
- Omat pulsarihavainnot

PULSARIN SIGNAALI

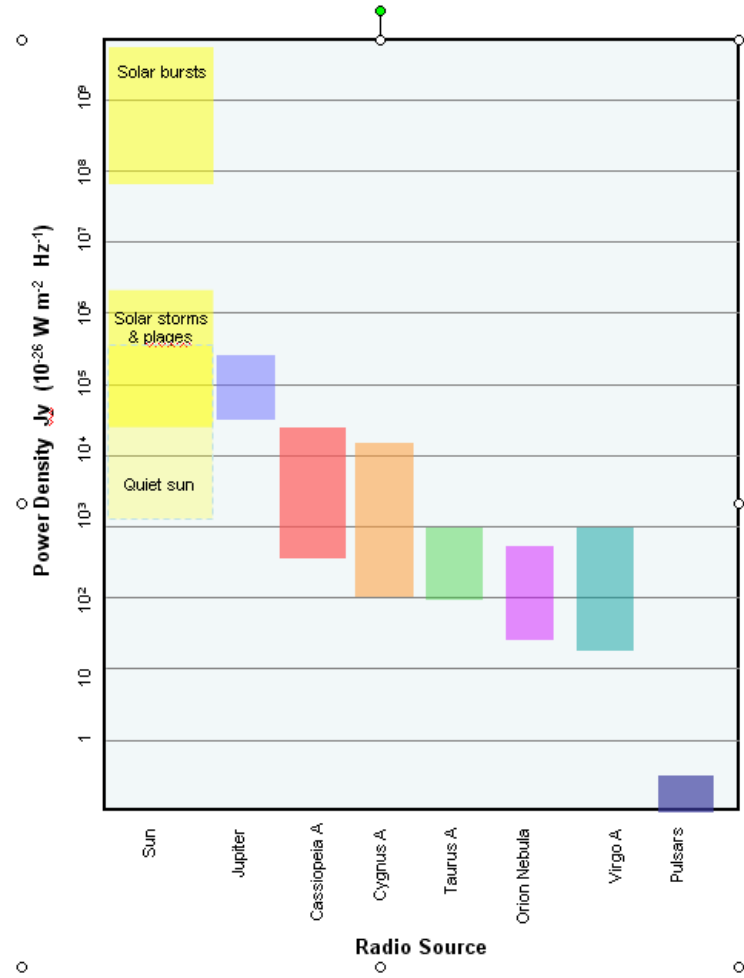
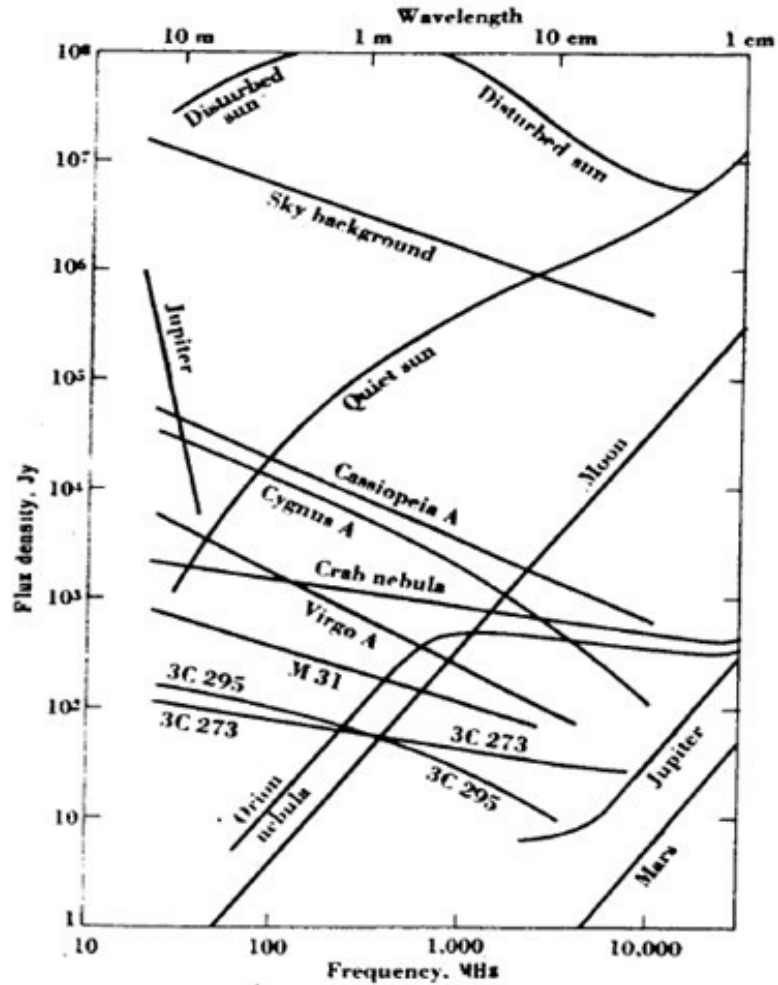
- Signaali on hyvin heikko
- Vahvimman B0833-45 “Vela” pulsarin fluxi on vain 5000 mJ =5 J
- Vahvimman Suomessa näkyvän pulsarin B0329+54 flux on 1500 mJ =1.5 J
- Auringon flux on noin 400000 J .. 1000000 J
- Kuun lämpökohina 800 J ja näkyy 0.25dB signaalin nousuna 4m antennilla
- Kuusta heijastuva EME-signaali on noin 10000 J, 3kHz kaistalla
- Noin 25dB:n ≈300 x systeemin parannus tarvitaan vs 4m antenni..!!
- Pulsari tuottaa synkrotronisäteilyä, jonka intensiteetti pienenee taajuuden kasvaessa
 - Flux 400MHz on paljon suurempi kuin flux 1400MHz (eron määrä riippuu pulsarista)

1 Jansky = $1e-26$ W/m²/Hz = -230 dBm/m²/Hz

4m antennin ala on 12.7 m²

100m antennin ala on 7854 m² = 625x = +28dB

PULSARIN SIGNAALI



RATKAISU HEIKKOON SIGNAALIIN

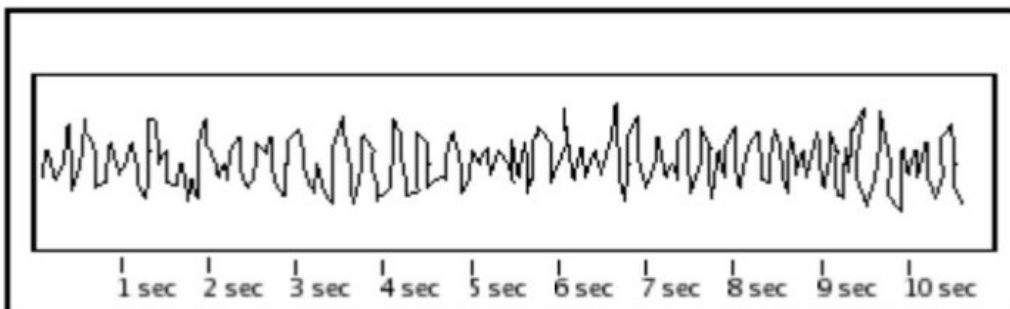
- Lisätään mittausaikaa
 - 4x aikaa lisää on 2x / 3dB:tä lisää herkkyyttä (S/N)
- Lisätään kaistanleveyttä (Hertsejä lisää)
 - 4x kaistaa lisää on 2x / 3dB:tä lisää herkkyyttä (S/N)
- Lisäämällä molempia saadaan hyvä herkkyys
 - Mittausaika kasvatetaan tunteihin, esim. 2h=7200s
 - Kaistanleveys esim. 2MHz tai 10MHz

RATKAISU HEIKKOON SIGNAALIIN

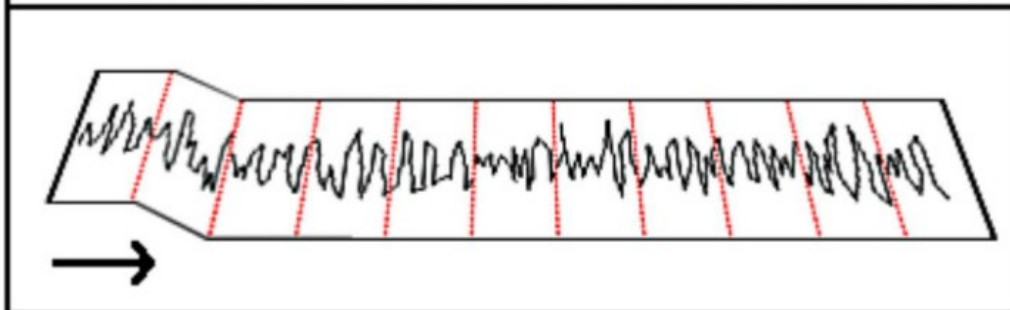
- Pulsarin signaali on jaksollinen ja toistuva
- Yksittäistä pulssia ei voi nähdä
- Ratkaisu on summata monta pulssia yhteen → PINOAMINEN !!

PULSARISIGNAALIN PINOAMINEN

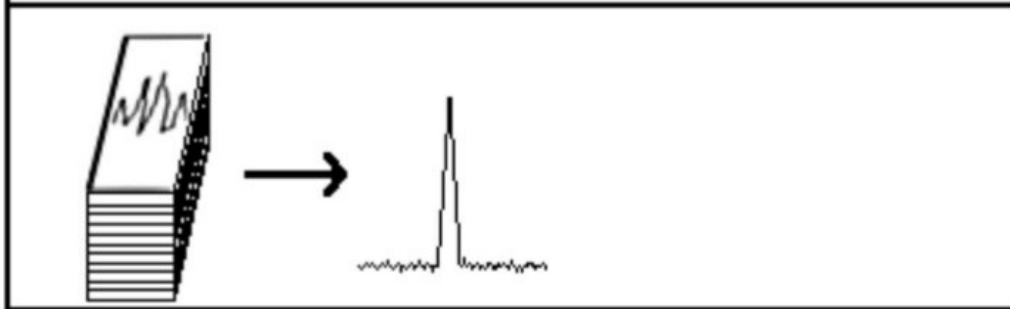
Signaali antennista on
600x heikompi kuin kohina



Palat siirretään
päällekkäin

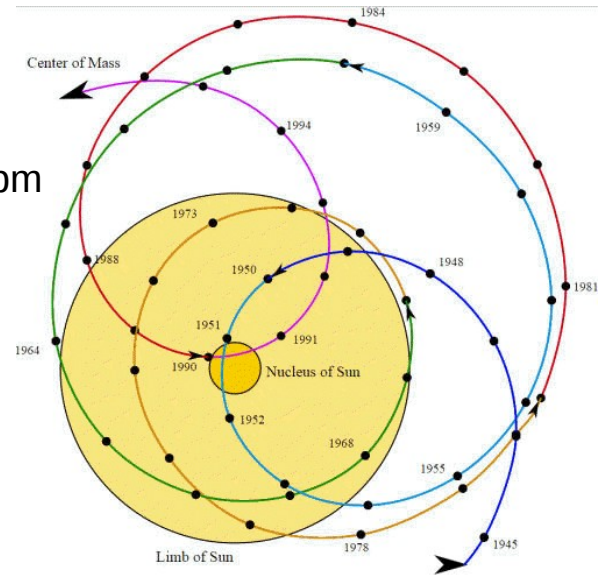


Summattu signaali



PULSARISIGNAALIN PINOAMINEN

- Pinoamiseen tarvitaan tarkka tieto pulssin toistumisen jaksonajasta
- Pulssin jaksonaikaan vaikuttaa Dopplerilmiö, joka pitää kompensoida pois
 - Maan liike avaruudessa
 - Maan rataliike Auringon ympäri $\rightarrow \pm 100\text{ppm}$
 - Auringon liike universumiin nähden \sim Jupiter
 - Maan pyörimisliike, koska antenni on Maan pinnalla $\rightarrow \pm 1.5\text{ppm}$
 - Prekessioliike
 - Nutaatioliike
- Vastaanottimen kellon on oltava hyvin vakaa
 - Atomikello
 - 10MHz rubidiumreferenssi



Barycentric = referenssinä aurinkokunnan keskipiste \Rightarrow korjataan aurinkokunnan liike
Geocentric = referenssinä Maan keskipiste \Rightarrow korjataan em. lisäksi Maan liike radallaan
Topocentric = referenssinä observatorio/antenni \Rightarrow korjataan em. lisäksi Maan pyörimisliike

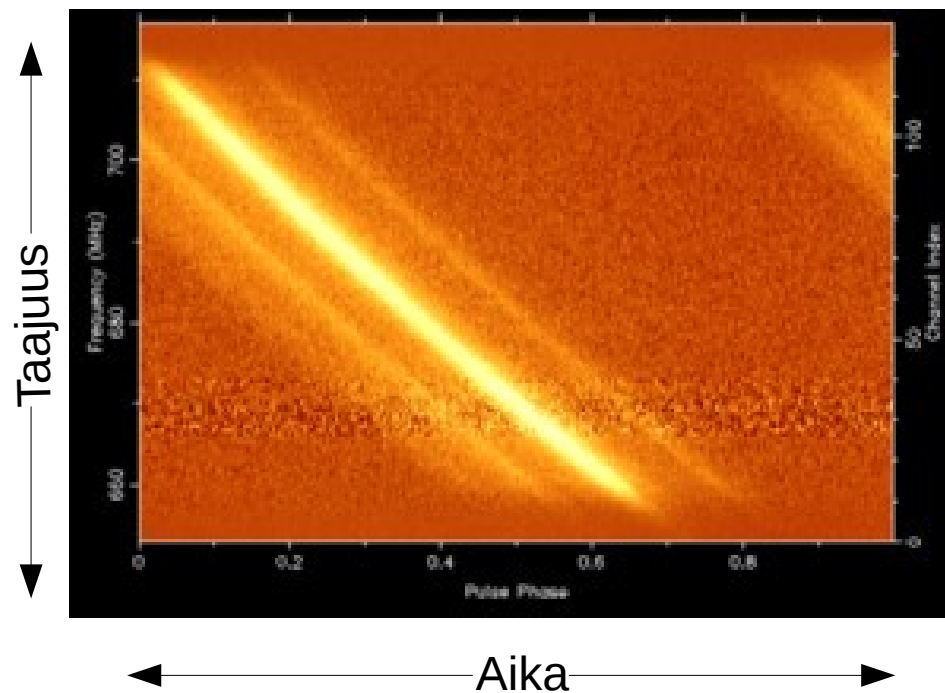
PULSARISIGNAALIN PINOAMINEN

- “tempo”-ohjelma laskee polynomimallin pulsarin liikkeestä
 - Joe Taylor et al. ~60..70-luvun tietokoneohjelma
 - Luo 5. asteen polynomimallin havaintopaikan ja pulsarin välimatkan muutoksesta ajan funktiona
 - Laskenta perustuu pulsarien taulukkotietoon (tunnetut pulsarit taulukossa)
 - Suorittaa tarvittavat ratalaskelmat
 - Ohjelmalle annetaan havaintoaika MJD-formaatissa (7.11.2019=58794)
 - $MJD = \text{Modified Julian Date} = JD - 2400000.5$
 - Havaintopaikan koordinaatit tarvitaan myös
- “polyco2period”-ohjelma laskee havaintohetkelle pulssinajan polynomimallista
- Pulssinaika voidaan syöttää pinoamisohjelmalle

Julian Date 0 = 12h Jan 1, 4713 BC

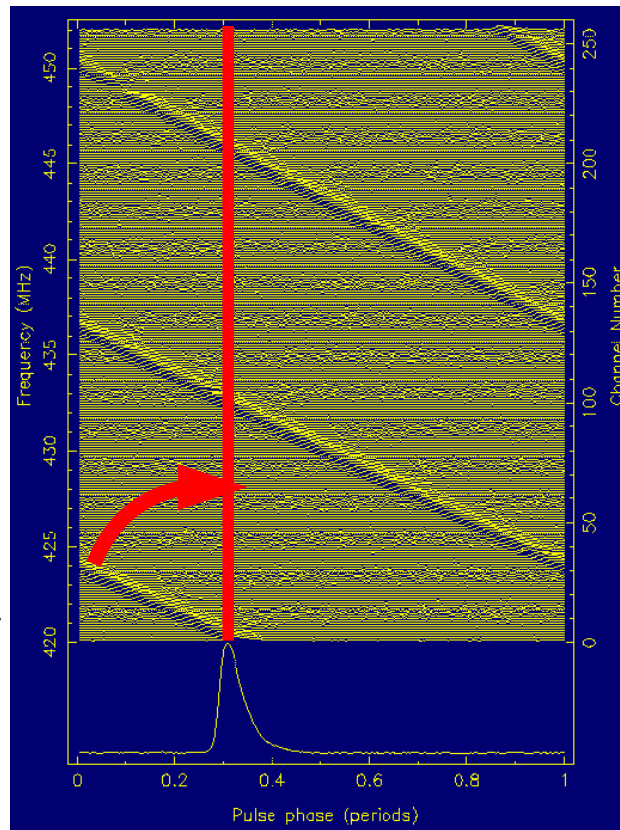
PULSARIN DISPERSIO

- Tähtienvälinen aine aiheuttaa radiosignaalin dispersion ~elektronit
- Signaali saapuu havaintopaikalle eri aikaan riippuen taajuudesta
- Isompi taajuus saapuu ensin
- Dispersion voi korjata pois
- Dispersion antaa arvion etäisyydestä
- $d_{\text{parsek}} = DM/ne$, 1 parsek = 3.26 vv
- $ne \sim 0.03$, electron density of ism electrons/cm³
- Esim M1 pulsar: $(56.77/0.03) * 3.26 = 6169.0$ vv



PULSARIN DISPERSION KORJAUS

- Dispersio voidaan korjata jakamalla signaali useaan taajuuskanavaan
- Kanavia voi käsitellä eri viiveillä keskenään
- Datasta lasketaan FFT → saadaan esim. 64 kanavaa
- FFT:n "binit" siirrellään ajassa kohdalleen
- Signaali desimoidaan noin 16x datamäärän pienentämiseksi
- Saadaan ns. "Filterbank"-formaattia, 6h on noin 16Gt
- Filterbank-tiedosto syötetään pinoamisohjelmalle
- Pinoamisohjelma summaa signaalin aika- ja taajuustasossa
- Pinoamisohjelma hakee parhaan korrelaatiopiikin kokeilemalla



OMIEN PULSARIHAVAINTOJEN SUUNNITTELU

#	NAME	<u>PSRJ</u>	<u>RAJ</u>	<u>DECJ</u>	P0	<u>DM</u>	W50	S400	S1400
			(hms)	(dms)	(s)	(cm ⁻³ pc)	(ms)	(mJy)	(mJy)
1	B0329+54	J0332+5434	03:32:59.40	54:34:43.30	0.71452	26.76	6.6	1500	203
2	B1749-28	J1752-2806	17:52:58.60	-28:06:37.30	0.562558	50.37	6.1	1100	47.8
3	B0531+21	J0534+2200	05:34:31.90	22:00:52.00	0.033392	56.77	3	550	14
4	B0950+08	J0953+0755	09:53:09.30	07:55:35.70	0.253065	2.97	8.9	400	100
5	B1642-03	J1645-0317	16:45:02.00	-03:17:57.80	0.38769	35.76	3.4	393	11.5
6	J0341+5711	J0341+5711	03:41:00	57:11:00	1.888	100	*	364.7	*
7	B2016+28	J2018+2839	20:18:03.80	28:39:54.20	0.557953	14.2	14.9	314	30
8	B1929+10	J1932+1059	19:32:14.00	10:59:33.30	0.226519	3.18	5.7	303	28.7
9	B0740-28	J0742-2822	07:42:49.00	-28:22:43.70	0.166762	73.73	4.2	296	26
10	B1133+16	J1136+1551	11:36:03.10	15:51:14.10	1.187913	4.84	5.9	257	20
11	B1933+16	J1935+1616	19:35:47.80	16:16:39.90	0.358738	158.52	6	242	57.8
12	B1937+21	J1939+2134	19:39:38.50	21:34:59.10	0.001558	71.02	0.038	240	15.2
13	B2111+46	J2113+4644	21:13:24.30	46:44:08.80	1.014685	141.26	32.1	230	19
14	B0628-28	J0630-2834	06:30:49.40	-28:34:42.70	1.244419	34.42	63.3	206	31.9
15	B1859+03	J1901+0331	19:01:31.70	03:31:05.90	0.65545	402.08	11	165	4.2

400MHz 1400MHz

Pulssin toistoaika

Dispersion määrä

<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

ANTENNI

1.3GHz Syötöllä



ANTENNI

- 432MHz syötöllä

- Kuva on ensimmäiseltä
pulsarin havaintokerralta
Säkylästä 1.7.2019

-Etuvahvistin on syötön
alapuolella



Syöttöantenni
Jukka Hietaranta OH1FF

VASTAANOTTIMET

- RTL-SDR, BW_max=2MHz
- BladeRF, BW_max=28MHz
- USRP B210, BW_max=56MHz

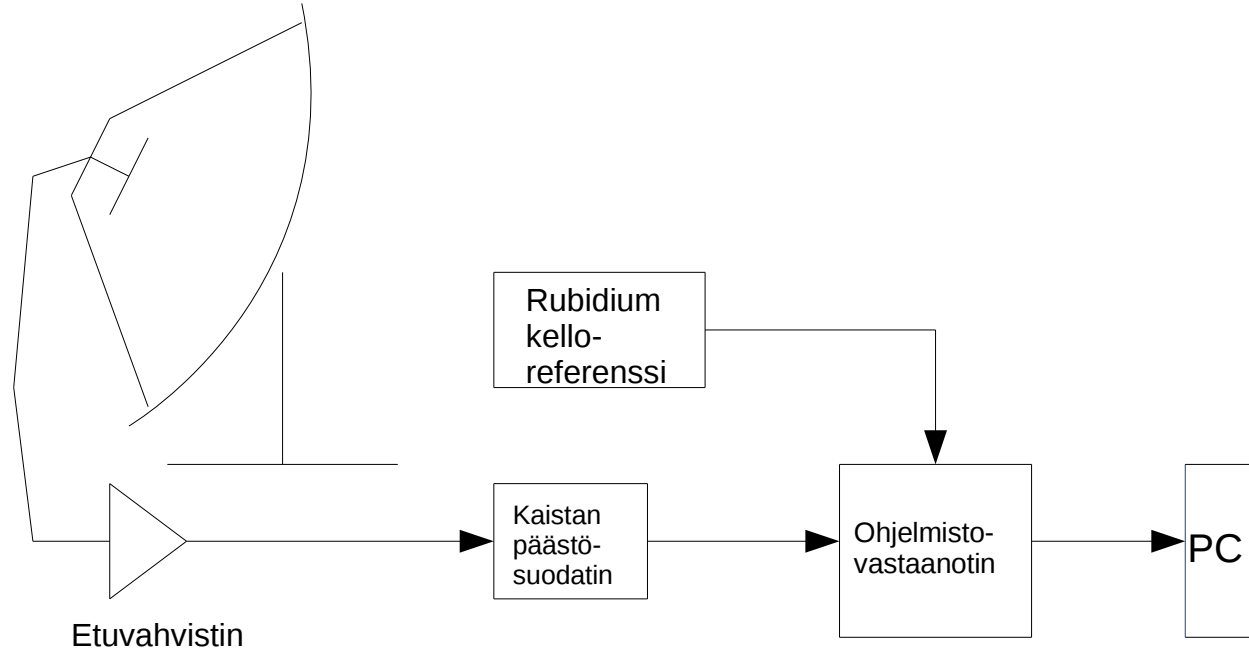
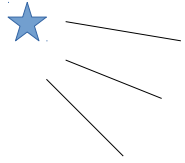


RTL_SDR



USRP B210

VASTAANOTINSYSTEEMI

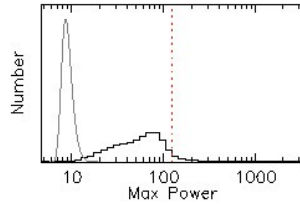


RADIOHÄIRIÖIDEN POISTO

- Paikalliset häiriösignaalit ovat olennaisesti vahvempia (esim. 1000000x..)
- Vaikea löytää laajaa taajuusväliä, jossa ei olisi muuta radioliikennettä
- Filterbank-tiedostosta luodaan häiriönpoistotiedosto ns. “mask-file”
- “rfifind”-ohjelma muodostaa maskaus-tiedoston (mask-file)
- Signaalit, joilla ei ole dispersiota, eivät ole pulsareita (DM=0)
- Kohinan keskiarvosta liikaa poikkeavat signaalit ovat häiriöitä
 - Aikatasossa poikkeavat
 - Taajuustasossa poikkeavat

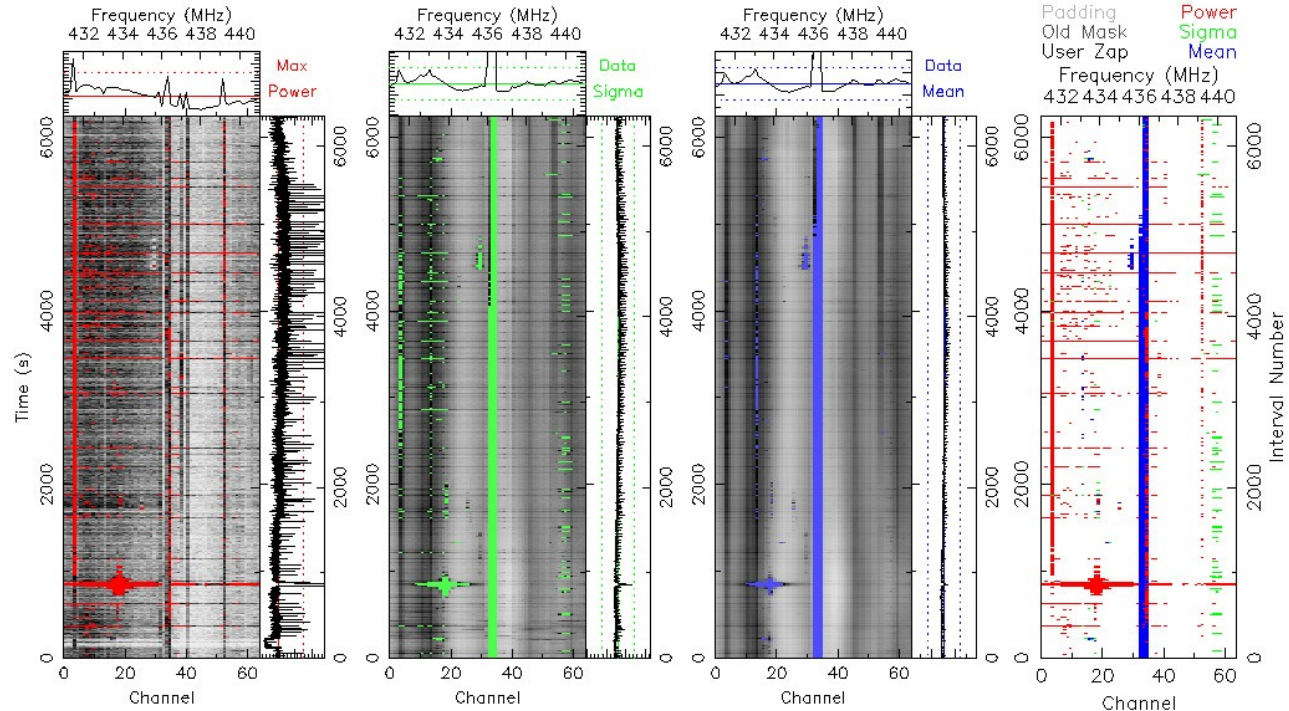
RADIOHÄIRIÖIDEN POISTO

mask_rfifind



Object: B0329+54
Telescope: Unknown
Instrument: unset
RA_{J2000} = 03:32:59.3700
DEC_{J2000} = 54:34:43.5700
Epoch_{topo} = 58680.000000000000
T_{sample} (s) = 0.0001024
T_{total} (s) = 6244.27

Num channels = 64 Pts per int = 9600
Num intervals = 6352 Time per int = 0.98304
Power: median = 56.380 σ = 14.2
min = 1.000 max = 3094.490
Sigma: median = 794.129 σ = 105
min = 0.000 max = 26654.887
Mean: median = 2988.831 σ = 351
min = 0.000 max = 39804.770



PINOAMINEN

- “PRESTO”-ohjelma
 - Suorittaa pinoamisen
 - Poistaa häiriöt käyttäen mask-fileä
 - Pinoamiseen tarvitaan tarkka pulsarin jaksonaika (Tempo & polyco2period)
 - Poistaa dispersion
 - Etsii pulsarin taajuuden tarkalleen
 - Etsii oikean dispersion määrän tarkalleen
 - Dispersio haetaan kokeilemalla alkuarvausta käyttäen

PRESTOKUVA PULSARISTA PSR B0329+54

Taajuus 435MHz

Vastaanotin:
USRP B210

Ohjelma:
Nando I1NDP

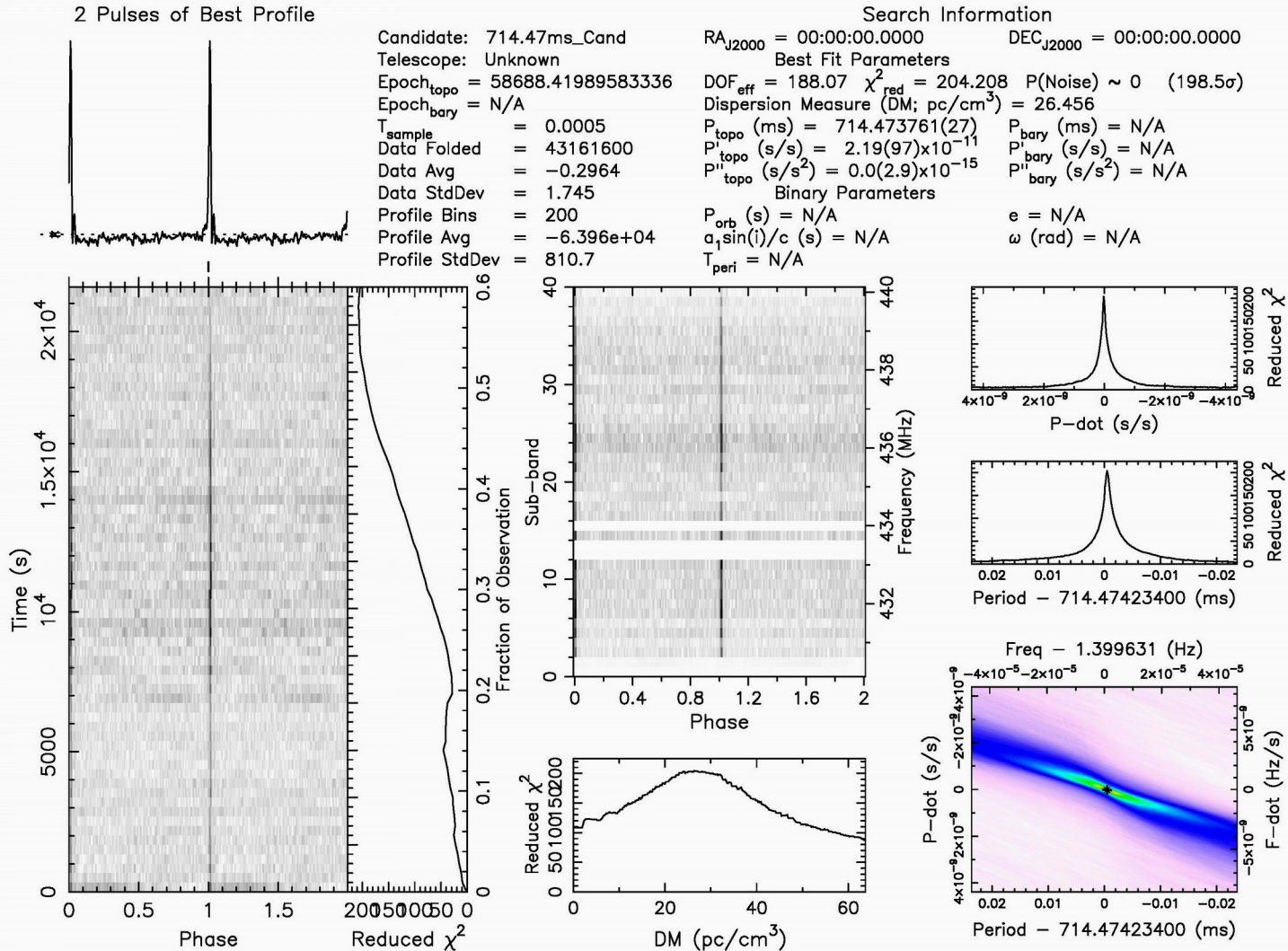
Mittausaika
noin 5.5 tuntia

Mittauksen
kaistanleveys
10MHz

Antenni 4m
paraboloidi

Kohinaluku
Noin 0.5 dB:tä

Kuva:
Petri Kotilainen



PRESTOKUVA2 PULSARISTA PSR B0329+54

Taajuus 435MHz

Vastaanotin
BladeRF

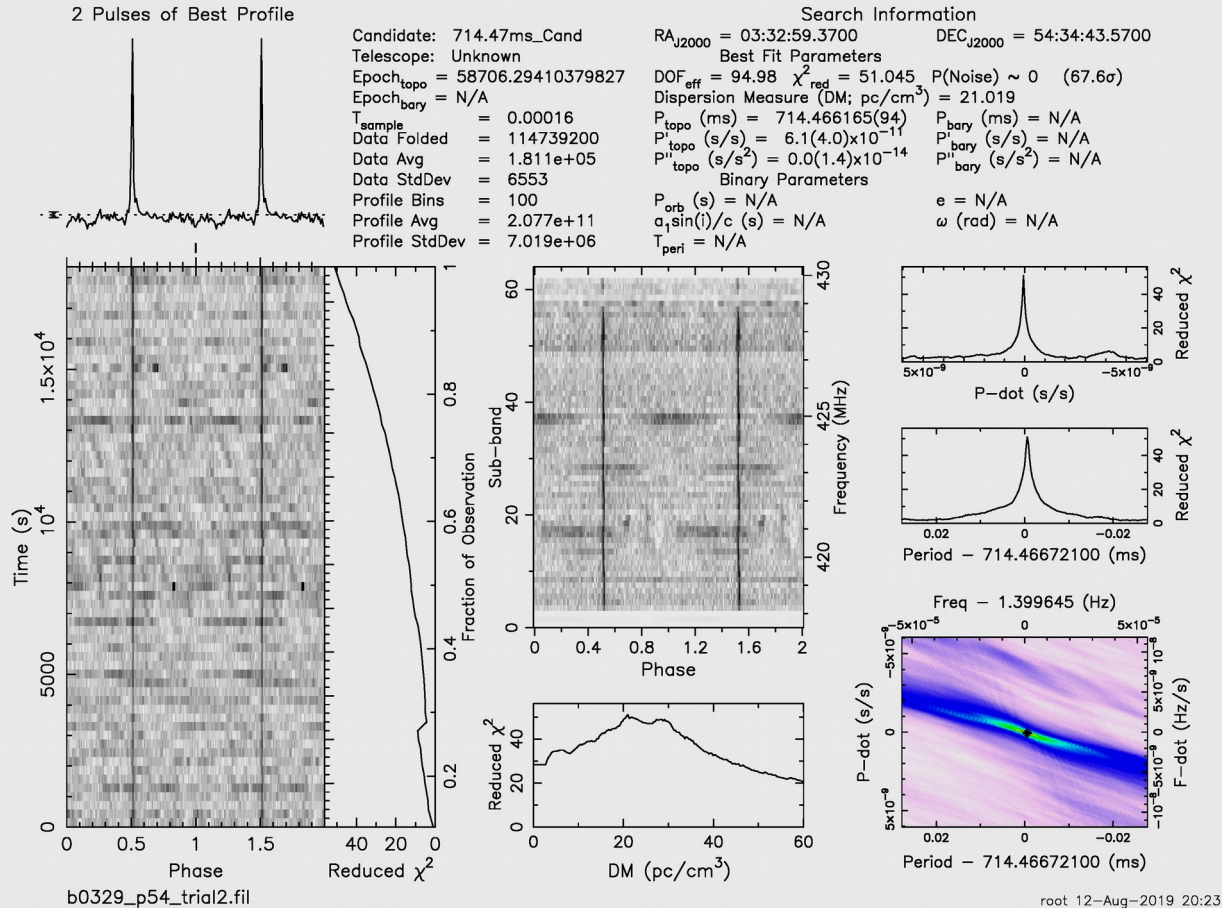
Omalla ohjelmalla

Mittausaika
noin 4 tuntia

Mittauksen
kaistanleveys
10MHz

Antenni 4m
paraboloidi

Kohinaluku
noin 0.5dB:tä

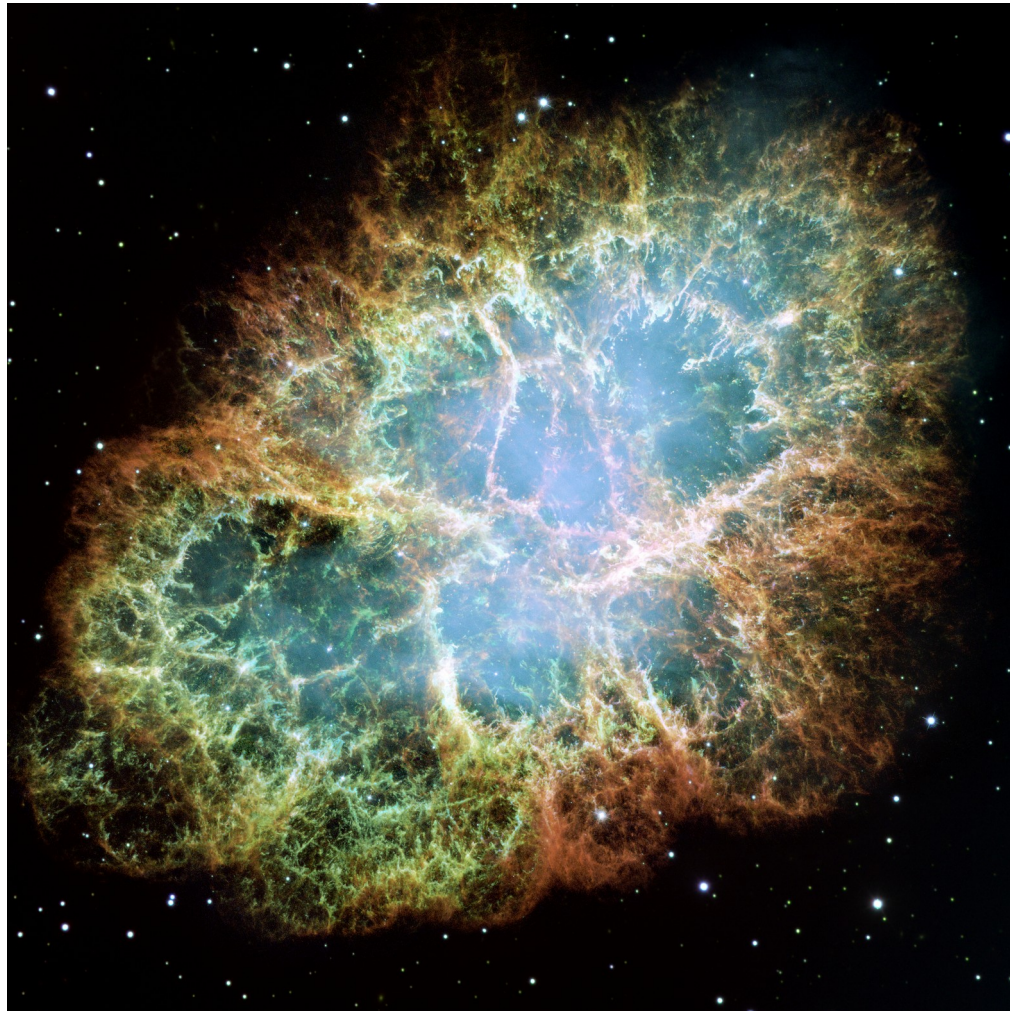


Flux S400:
1500mJ

Jaksonaika:
714.47ms

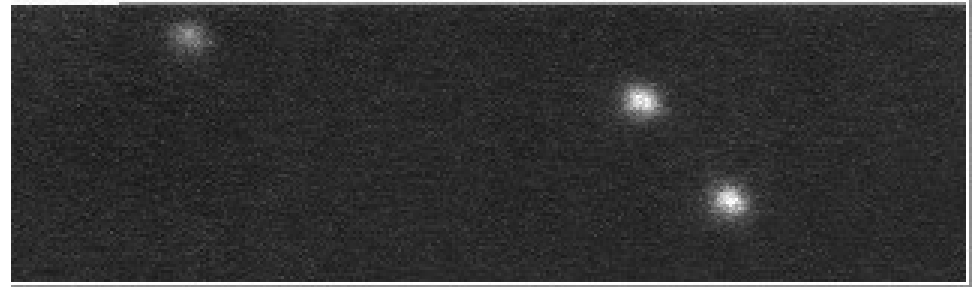
DM: 26.456

RAPUSUMU MESSIER 1



Hubble@Nasa

RAPUSUMUN M1 PULSARI PSR B0531+21



Chandra+Hubble @Nasa

PULSARI B0329+54

Vastaanotin
RTL-SDR

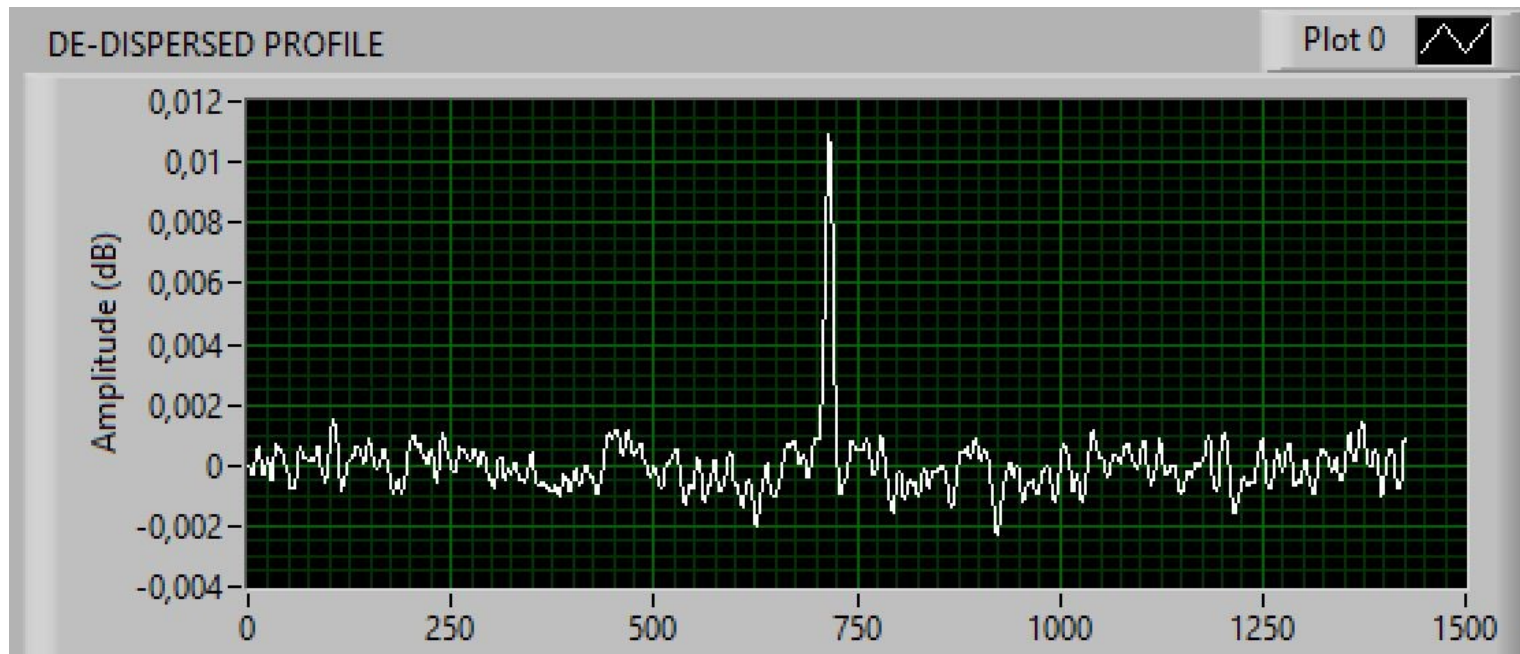
Ohjelma
Andrea IW5BHY

Mittausaika
noin 2.0 tuntia

Mittauksen
kaistanleveys
2.048MHz

Antenni 4m
paraboloidi

Kohinaluku
noin 0.5dB:tä



S400: 1500mJ

PULSARI B1133+16

Vastaanotin
RTL-SDR

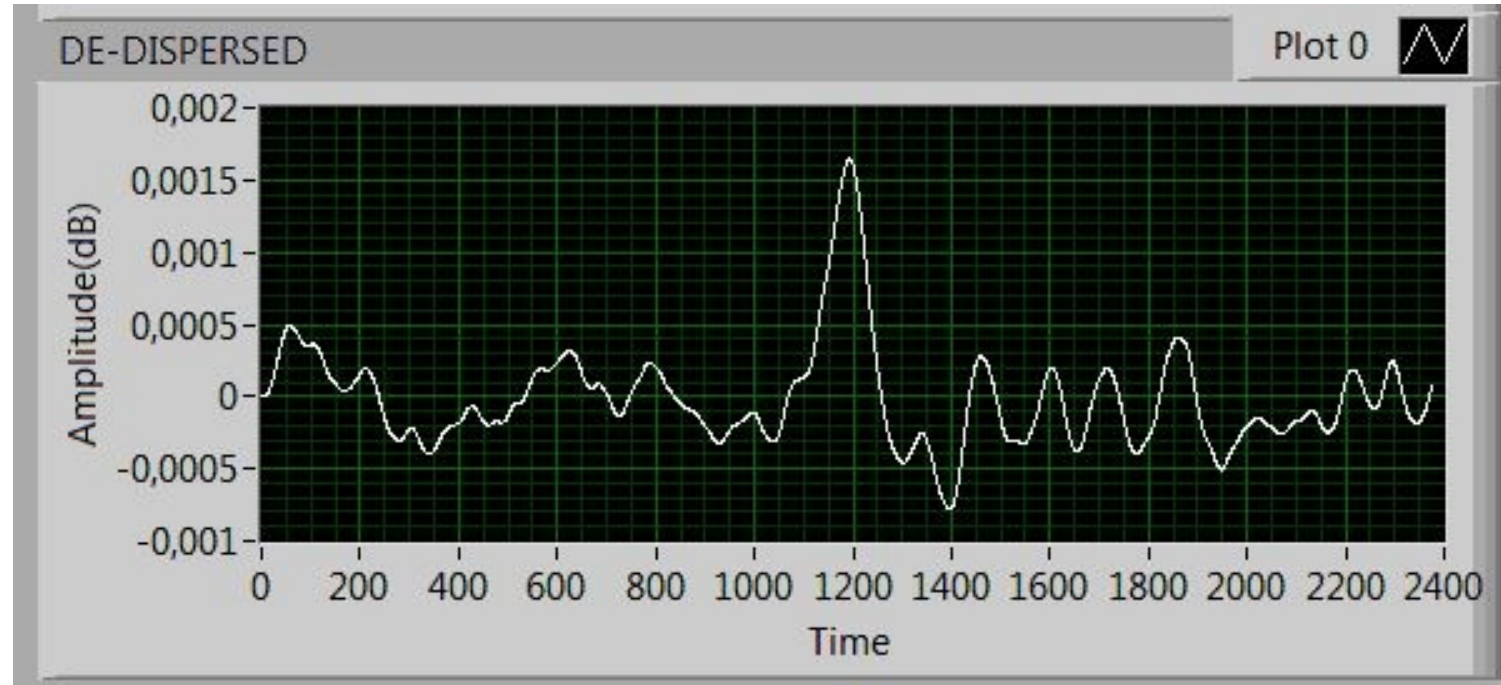
Ohjelma
Andrea IW5BHY

Mittausaika
noin 2.0 tuntia

Mittauksen
kaistanleveys
2.048MHz

Antenni 4m
paraboloidi

Kohinaluku
noin 0.5dB:tä



S400: 257mJ

Periodi: 1.19 s
DM: 4.84
Etäisyys: 1200 vv
Ikä: 5e6 v

PULSARI B1642-03

Vastaanotin
RTL-SDR

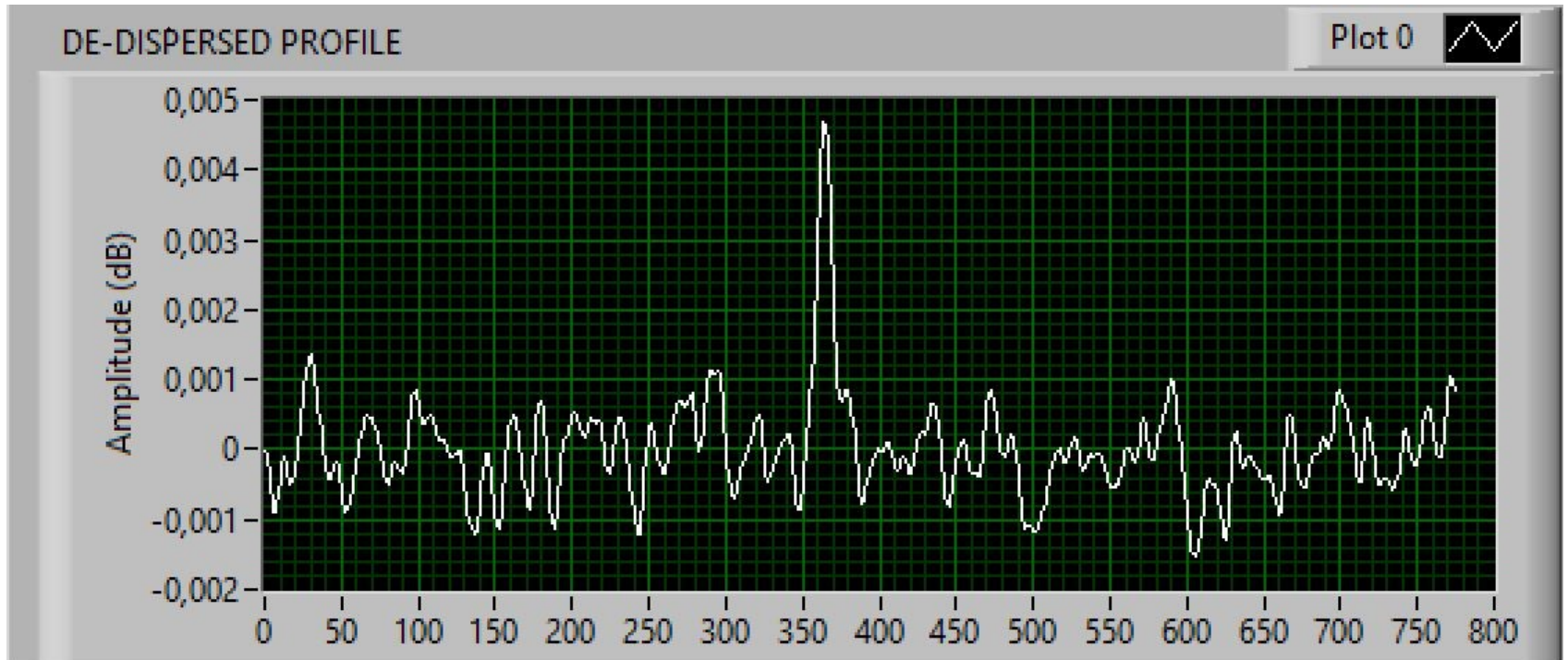
Ohjelma
Andrea IW5BHY

Mittausaika
noin 2.0 tuntia

Mittauksen
kaistanleveys
2.048MHz

Antenni 4m
paraboloidi

Kohinaluku
noin 0.5dB:tä



S400: 393mJ

Periodi: 387 ms
DM: 35.76
Etäisyys: 12600 vv
Ikä: 3.45e6 v

PRESTOKUVA PULSARISTA PSR B0329+54

Taajuus **1296MHz**

Vastaanotin
BladeRF

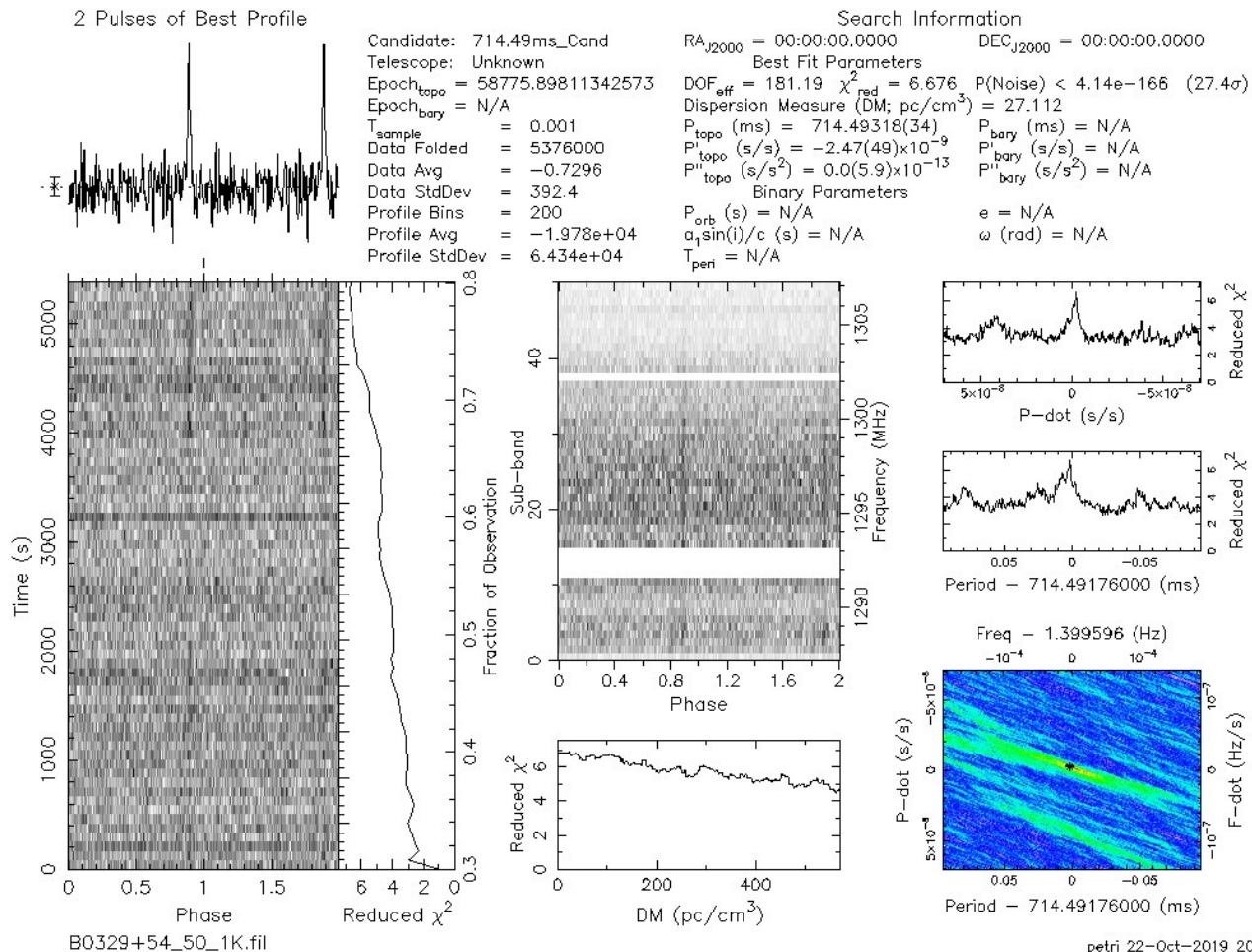
Omalla ohjelmalla

Mittausaika
Noin 1.4 tuntia

Mittauksen
kaistanleveys
10MHz

Antenni 4m
paraboloidi

Kohinaluku
noin 0.7dB:tä

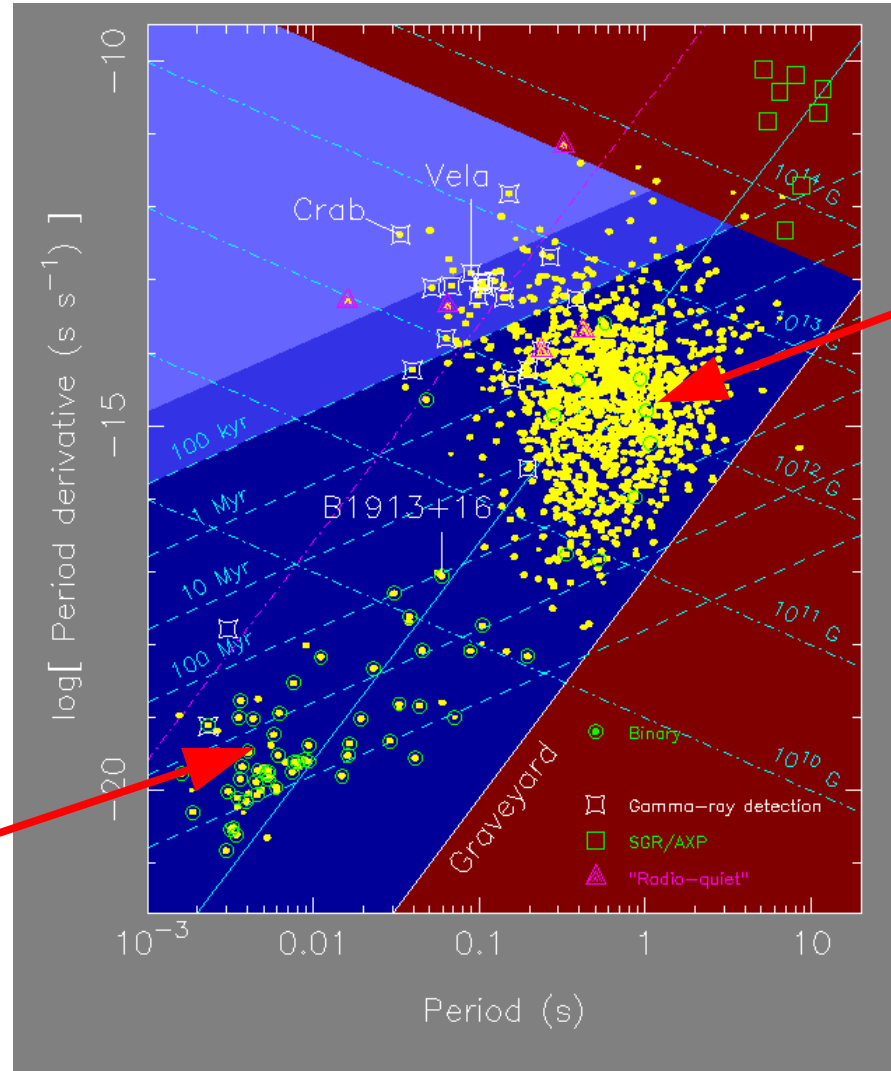


S1400: 203mJ

P-Pdot diagrammi

$$\text{Age} = \frac{1}{(n-1)} \frac{P}{\dot{P}} = \frac{P}{2\dot{P}} \quad \text{for } n=3$$

“kierrätetyt”-pulsarit
=millisekuntipulsarit



“normaalit”-pulsarit

LOITSUT

1. bladerf_sample_filterbank_v6 → B0329+54.fil
2. header B0329+54.fil -tstart → 58666.99
3. tempo -z ..58666.99 58666.99
4. polyco2period 58666.99 -p polyco.dat → 0.714510274
5. rfifind -o mask -time 1 -timesig 4 -freqsig 15 -chanfrac 1 -intfrac 1 B0329+54.fil
6. prepfold -ncpus 40 -nsub 64 -n 256 -topo -dm 26.75 -mask mask_rfifind.mask -p 0.714510274 -fine B0329+54.fil

Tempo-ohjelman alustus:

tz.in -tiedostoon pitää editoida pulsarin nimi ja havaintopaikan indeksi
Obsys.dat -tiedostoon pitää editoida havaintopaikan koordinaatit

MAGNEETTIKENTTIÄ

31.869 μT - strength of Earth's magnetic field at 0° latitude, 0° longitude

5 mT – the strength of a typical refrigerator magnet

0.3 T – the strength of solar sunspots

1.25 T – magnetic flux density at the surface of a neodymium magnet

2 T – coil gap of a typical loudspeaker magnet

3 T – strength of medical magnetic resonance imaging systems in practice, experimentally up to 17 T

8 T – the strength of LHC magnets

13 T – strength of the superconducting ITER magnet system

16 T – magnetic field strength required to levitate a frog by diamagnetic levitation of the water in its body tissues)

17.6 T – strongest field trapped in a superconductor in a lab as of July 2014

27 T – maximal field strengths of superconducting electromagnets at cryogenic temperatures

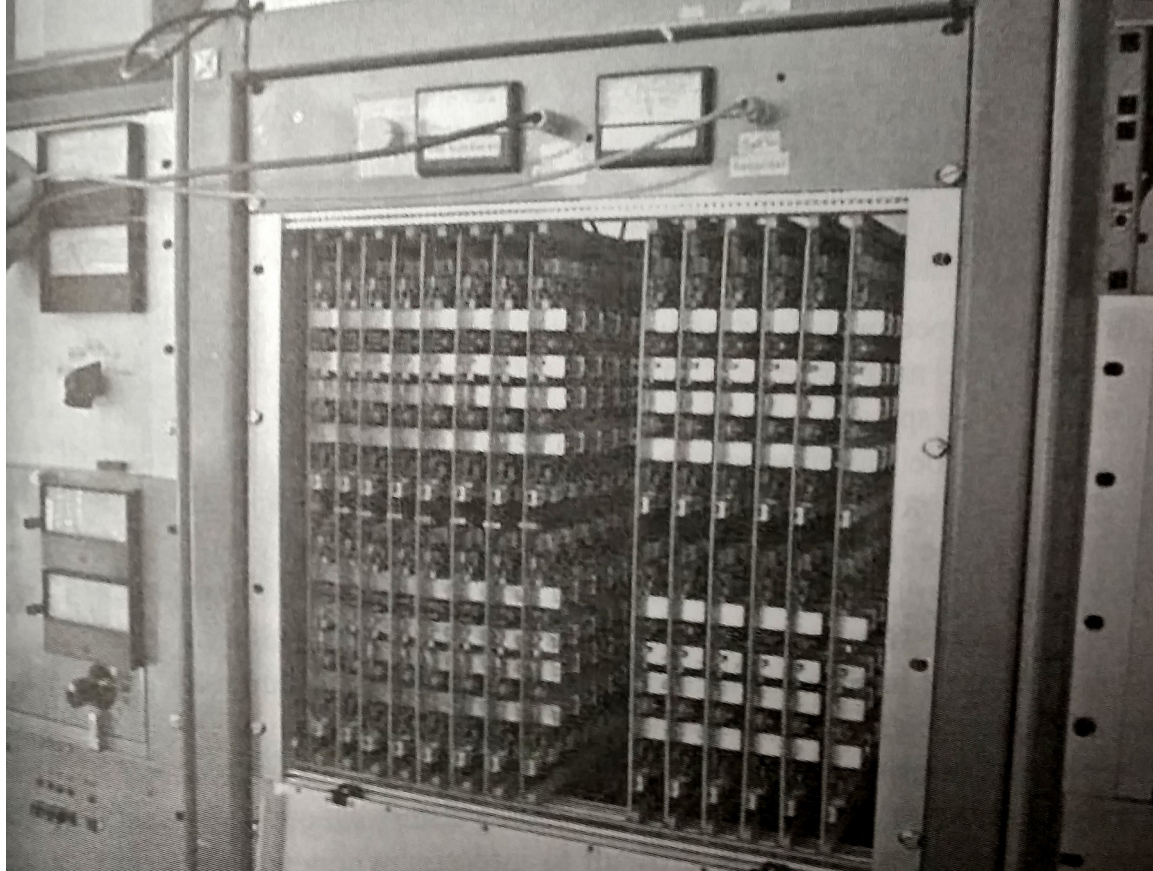
45 T – the current (2015) world record for continuous field magnets

100 T – approximate magnetic field strength of a typical White dwarf star

10^4 – 10^8 T – magnetic strength range of typical neutron stars

10^8 – 10^{11} T – magnetic strength range of magnetar neutron stars

ANALOGINEN VASTAANOTIN



Jordell UK
32*1MHz
Suodinpankki

RAPUPULSARI M1



Hubble (sin)
Chandra (pun)

PLANETAARISIA SUMUJA



M27 Nostopainosumu



M57 Lyyran rengassumu

KIITOS!