

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

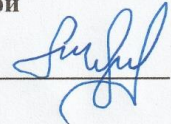
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна

Факультет радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра космічної радіофізики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Л. Ф. Чорногор
ініціали, прізвище



підпис

“ 15 ” грудня 2020 року

**Кваліфікаційна робота
магістра**

на тему:

**Вікова зміна щільності потоку залишку спалаху
наднової Кассіопея А на низьких частотах**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-66
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,
освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»



Жданко Є.Г.

Керівник
кандидат фіз.-мат. наук, с.н.с.



Бубнов І. М.

Харків 2020

Реферат

В даній роботі було отримано значення щільності потоку радіовипромінювання залишку спалаху наднової Кассіопея А на епоху 2019 р. Визначений спектральний індекс в інтервалі частот $38 \div 70$ МГц. Розрахована річна швидкість зменшення щільності потоку радіоджерела. Також представлена оцінка ефективних площ антени SELENA і антен космічних апаратів.

Abstract

In this work, the value of the radiation flux density of the Cassiopeia A supernova remnant for the epoch 2019 was obtained. The spectral index in the frequency range $38 \div 70$ MHz is determined. The annual rate of decrease in the flux density of the radio source is calculated. An estimate of the effective areas of SELENA antenna and spacecraft antennas is also presented.

ЗМІСТ

1. Вступ.....	4
2. Низькочастотні радіотелескопи.....	6
2.1. Супутникові низькочастотні радіотелескопи.....	6
2.1.1. WIND.....	6
2.1.2. STEREO.....	9
2.1.3. Juno.....	11
2.1.4. Parker Solar Probe (PSP)	12
2.2. Наземні низькочастотні радіотелескопи	13
2.2.1. УТР-2.....	13
2.2.2. ГУРТ.....	16
2.2.3. Радіотелескоп SELENA.....	17
3. Вікове зменшення щільності потоку радіоджерела Кассіопея А.....	20
3.1. Наднові зірки.....	20
3.1.1. Наднові I типу.....	22
3.1.2. Наднові II типу.....	24
3.2. Кассіопея А	26
3.2.1. Стадії взаємодії оболонки з навколишнім середовищем.....	32
3.3. Радіогалактика Лебідь А	33
4. Схема та результати вимірювання зменшення щільності потоку Кассіопеї А на 2019 рік	35
5. Висновки.....	44
6. Список літератури.....	45

1. Вступ

Дані спостережень оптичної астрономії були єдиним джерелом знань про Всесвіт за межами Землі до 30-х років минулого століття. Великий прогрес у розвитку технічних засобів астрономії, історія якої починалася з простих візуальних спостережень багато тисячоліть тому, був зроблений на початку сімнадцятого століття після винаходу оптичного телескопу. Астрономічні спостереження в радіодіапазоні створили новий напрямок в науці, званий радіоастрономією.

Ділянки електромагнітного спектра, доступні для спостережень оптичними і радіозасобами, збігаються з двома головними смугами прозорості земної атмосфери і іоносфери. Ці смуги прозорості називають оптичними і радіовікнами.

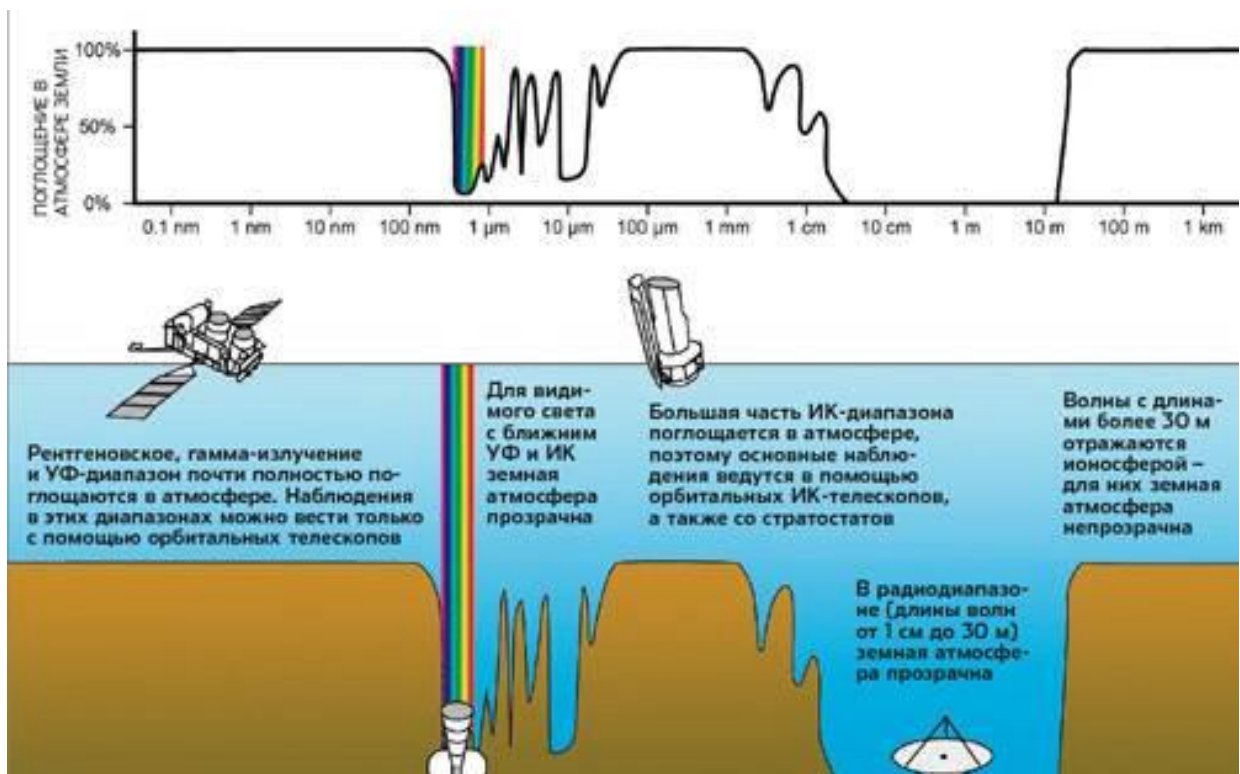


Рис. 1.1. Графік залежності прозорості земної атмосфери від довжини хвилі.

Оптичне вікно займає ділянку приблизно від 0,4 до 0,8 мкм, а більш широке радіовікно охоплює область від 1 см до 10 м. Значення 1 см і 10 м взяті умовно, оскільки через наявність кількох відносно прозорих областей в міліметровому діапазоні і епізодичних іоносферних «вікон», які з'являються в декаметровому діапазоні, межі радіовікна можуть бути встановлені в більш широкі межі від 1 мм до 200 м. Короткохвильова межа залежить від складу атмосфери, хмарного покриву і т. д., в той час як довгохвильова межа залежить від електронної щільності в іоносфері, яка, в свою чергу, є функцією часу доби, сонячної активності і т. п.

З появою штучних супутників Землі, що оснащуються все більш складною апаратурою, стало можливим проводити астрономічні спостереження за межами атмосфери. В даний час астрономічні спостереження можуть бути здійснені у всьому спектрі електромагнітних коливань - від найбільш коротких гамма-променів до найбільш довгих радіохвиль, які обрізаються іоносферою. Навіть на тих радіочастотах, для яких атмосфера і іоносфера істотно прозорі, обсерваторія в космосі має низку переваг, оскільки поглинання, заломлення і вплив шумів буде менше. Інша перевага полягає в тому, що перешкоди від земних радіопередавачів можуть бути зменшені. Найбільше ослаблення як земних, так і сонячних перешкод може бути досягнуто, якщо радіотелескоп розташований на зворотному боці Місяця і працює протягом місячної ночі.

Радіоастрономічні спостереження на частотах нижче приблизно 50 МГц стикаються з проблемами, які не виникають на більш високих частотах. Недостатньо приладів, які б забезпечували високе кутове розрізнення; для розрізнення краще одного градуса потрібні антени довжиною кілька кілометрів. Нижче 13 МГц радіоастрономічній службі не розподілена жодна смуга. Оскільки міжнародний зв'язок, зокрема радіомовна служба, широко використовує низькі частоти для поширення хвиль за допомогою відбиття від іоносфери, вкрай складно знайти на Землі місця для радіоастрономії, ізольовані від сигналів, що заважають.

Кілька наземних спостережень на частотах нижче 10 МГц було проведено в Тасманії, яка є вигідним місцем з точки зору іоносферних обмежень і відсутності перешкод. Проведені там спостереження показали, що частота 1,5 МГц є практичною межею для наземних радіоастрономічних вимірювань.

2. Низькочастотні радіотелескопи

Астрофізичні дослідження у низькочастотному (декаметровому) діапазоні довжин хвиль представляють великий інтерес. На таких низьких частотах велика кількість фізичних і астрофізичних процесів і об'єктів проявляється унікальним чином. Серед них можна відзначити ефективну взаємодію речовини з радіовипромінюванням; формування синхротронного радіовипромінювання, найбільш інтенсивного на низьких частотах; істотні варіації спектральних індексів випромінювання в силу ряду причин; генерацію інтенсивного імпульсного і спорадичного радіовипромінювання при русі хвиль і пучків заряджених частинок в магнітоактивній плазмі; тонкі атомні ефекти і багато іншого. Можна стверджувати, що низькочастотна радіоастрономія здатна давати унікальну інформацію, недоступну в інших астрономічних діапазонах.

2.1. Супутникові низькочастотні радіотелескопи

Астрономічні спостереження з космосу - невід'ємна частина сучасної астрофізики. Зірки, туманності і галактики випромінюють хвилі у всьому електромагнітному спектрі, що несуть найважливішу інформацію про випромінюючі об'єкти. Однак до поверхні Землі, крім видимого світла, доходять тільки радіохвилі і короткохвильове (1 - 4 мкм) інфрачервоне випромінювання. Тому астрономи для дослідження цих ділянок спектру підіймають прилади над поглинаючими шарами атмосфери.

2.1.1. WIND

WIND - це Сонячно-Земна місія NASA в рамках ініціативи GGS (Global Geospace Science) США, а також частина програми ISTP (International Solar-

Terrestrial Physics). Метою є вивчення джерел, механізмів прискорення і процесів поширення енергійних частинок і сонячного вітру. WIND був запущений 1 листопада 1994 року апараті Delta II з мису Канаверал, штат Флорида. Наукові завдання:

- Надати повні дані про плазму, енергійні частинки і магнітні поля для магнітосферних і іоносферних досліджень
- Визначити вихід магнітосфери в міжпланетний простір
- Вивчити основні плазмові процеси, що відбуваються в навколосемному сонячному вітрі.

Дослідження WAVES на космічному апараті WIND забезпечує всебічне охоплення радіо- і плазмових хвильових явищ в діапазоні частот від долі герца до приблизно 14 МГц для електричного поля і 3 кГц для магнітного поля.

Завдання: вимір радіо- і плазмових хвильових явищ в дуже широкому діапазоні частот, які відбуваються в сонячному вітрі. Конкретні цілі вивчення:

- Низькочастотні електромагнітні хвилі і низькочастотні магнітні поля до 10 кГц
- Електронний тепловий шум від 4 кГц до 256 кГц
- Радіохвилі від 20 кГц до 14 МГц

Для цього використовувалися три ортогональні електричні диполі і три ортогональні магнітометра. Два диполя мають різну довжину. Більш довгий і коротший диполі у площині обертання мають довжину 50 м та 7,5 м для кожного дроту відповідно. Третій диполь, який буде розгорнуто вздовж осі обертання космічного корабля, простягається на 5,28 м від верхньої та нижньої поверхонь космічного корабля. Ці довжини обмежені верхньою частотою спостереження приймачів RAD1 (20-1040 кГц), і RAD2 (1,075-13,825 МГц). відповідно.

Радіоприймач RAD1 складається з двох супергетеродинних приймачів, що працюють в діапазоні 20-1040 кГц. Смуга пропускання приймачів становить 3 кГц, що визначається кристалічними фільтрами в підсилювачах ПЧ на частоті 10,7 МГц. Час збору даних для одного окремого виміру становить 0,154 с.

Подвійний радіоприймач RAD2 дуже схожий на приймач RAD1, за винятком того, що частотний діапазон набагато вище (таб. 2.1). Охоплювана смуга складає від 1,075 до 13,825 МГц. Смуга пропускання цих приймачів становить 20 кГц, що визначається кристалічними фільтрами на проміжній частоті 21,425 МГц. Приріст частотного кроку становить 50 кГц. Час збору даних дорівнює 20 мс.

Діапазон частот, МГц	Число каналів (Кількість частот)	Ширина смуги, кГц	Чутливість, $nB/\sqrt{Гц}$
1.075-13.825	256	20	7

Таб. 2.1. Параметри радіоприймача RAD2.

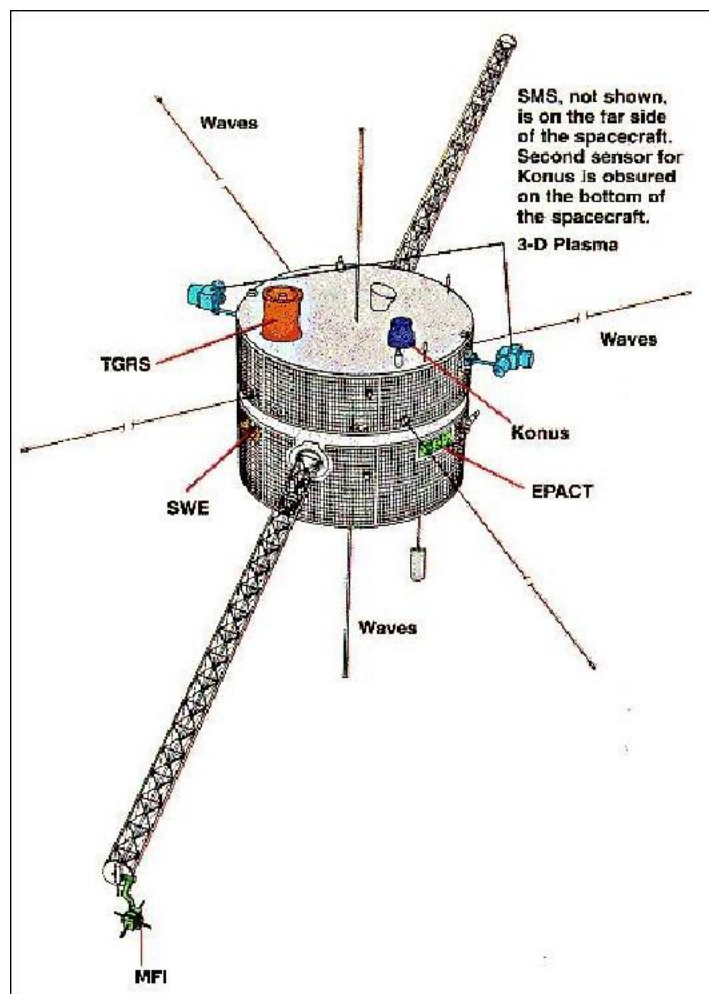


Рис. 2.1. Космічний апарат WIND із зазначенням місця розташування приладів.

2.1.2. STEREO

Місія STEREO є стратегічним елементом програми Сонячно-Земних зв'язків НАСА, що представляє собою міжнародну співпрацю із залученням учасників з Франції, Німеччини, Нідерландів, Бельгії, Швейцарії, США та Великобританії. Загальна мета полягає в тому, щоб поліпшити розуміння походження і наслідків корональних викидів мас (КВМ).

Місія складається з двох практично ідентичних космічних апаратів на геліоцентричній еліптичній орбіті в площині екліптики, на відстані приблизно 1 астрономічної одиниці від Сонця.

Подвійний космічний апарат STEREO (Solar TERrestrial RElations Observatory) (Обсерваторія Сонячно - Земних зв'язків) був запущений 25 жовтня 2006 року, о 20:52 за східним поясним часом на ракеті Delta II 7925-10L зі станції ВВС на мисі Канаверал у Флориді .

SWAVES - це пристрій стеження за радіосплесками. Метою дослідження радіохвиль і плазмових хвиль є отримання унікальних спостережень для всіх основних наукових цілей місії STEREO, генерації КВМ, їх еволюції та взаємодії з магнітосферою Землі.

SWAVES використовує три взаємно ортогональних висувних елемента в якості основних датчиків, кожен довжиною 6 метрів. Антени розгорнуті в бік від Сонця, тому вони залишаються поза увагою інструментів, звернених до Сонця. Конструкція антени оптимізує відстеження радіосплесків в діапазоні 30 кГц - 16 МГц і підтримує високе відношення сигнал / шум для очікуваного сонячного радіовипромінювання різних типів.

У приладі SWAVES є радіоприймачі для покриття наступних частотних діапазонів: 1) LFR Lo: 10-40 кГц; 2) LFR Hi: 40-160 кГц; 3) HFR: 0,125-16 МГц; 4) FFR1: фіксована частота 32 МГц.

Приймач	Частота	Чутливість
HFR2	2.025 - 16.025 МГц	6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
HFR1	175 кГц - 1.975 МГц	6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
LFRhi	40 – 160 кГц	6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
LFRlo	10 – 40 кГц	6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
FFR2	236.6 МГц	6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
FFR1	50 МГц	6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$

Таб. 2.2. Параметри радіоприймачів системи SWAVES.

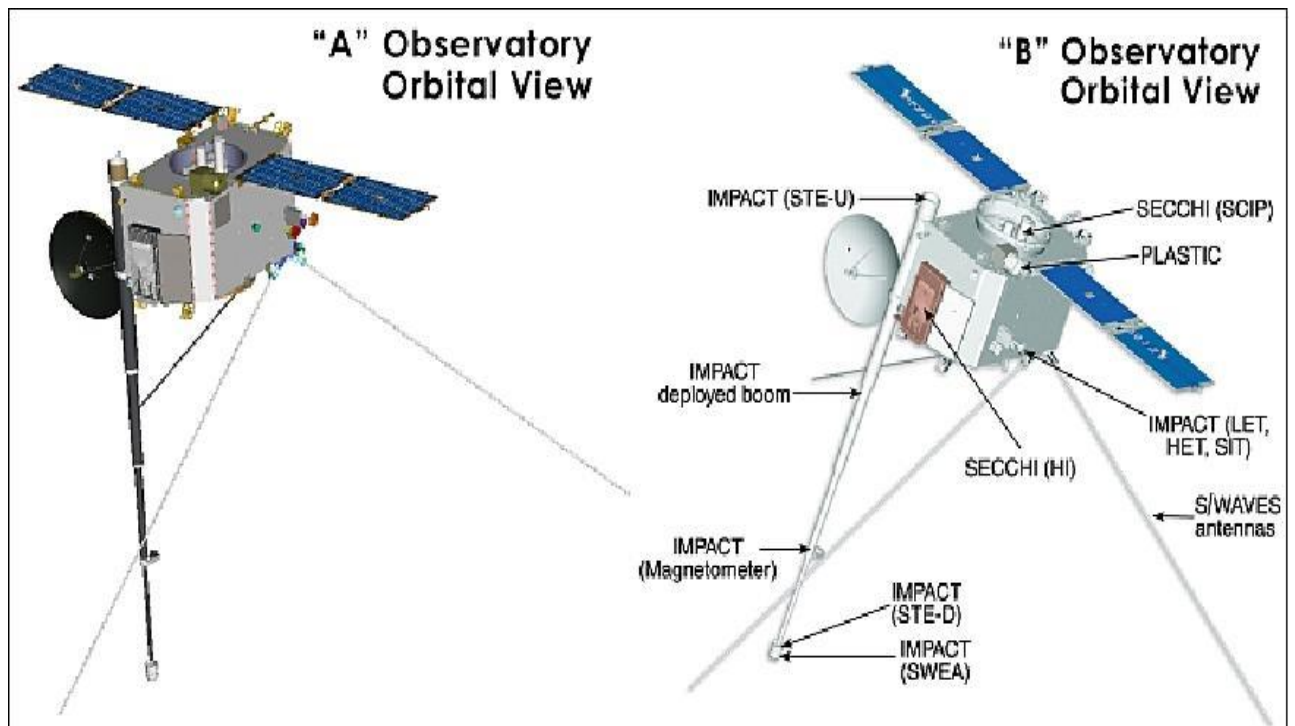


Рис. 2.2. Ілюстрація двох супутників STEREO.

2.1.3. Juno

Космічний корабель НАСА Juno несе наукове обладнання, що складається з дев'яти наборів інструментів для отримання даних про магнітне середовище Юпітера, його гравітаційне поле, наймовірно щільну атмосферу і хмарний покрив, внутрішні частини планети і загадкове полярне саяво.

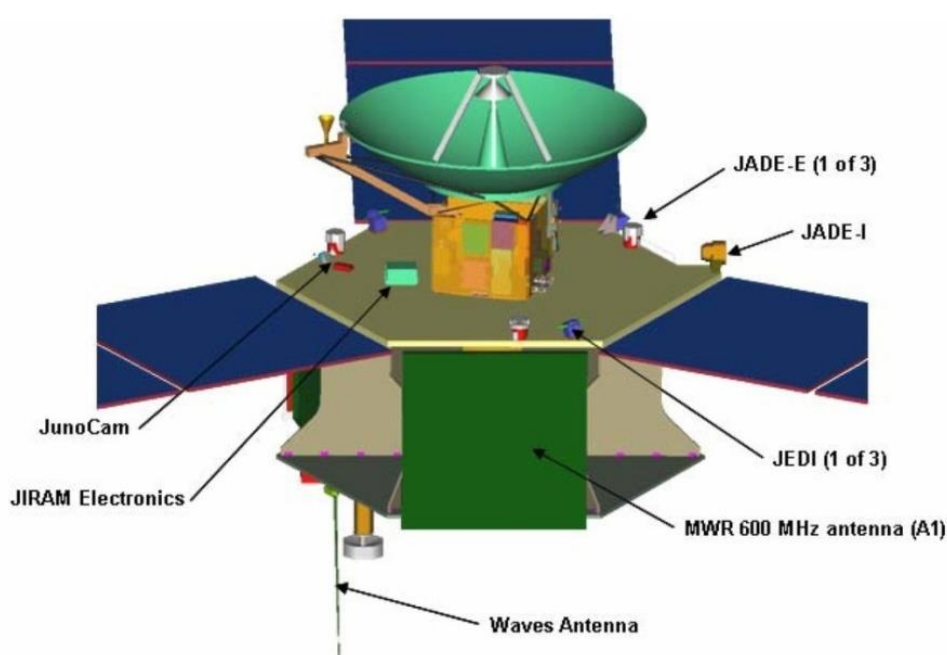


Рис. 2.3. Космічний апарат Juno із зазначенням місця розташування приладів.

Один з наукових інструментів Juno, що зветься Waves вимірює радіохвилі і плазмові хвилі в магнітосфері Юпітера, щоб допомогти зрозуміти взаємодію між магнітним полем Юпітера, магнітосферою і атмосферою. Він вимірює компоненти електричного і магнітного полів плазмових хвиль і радіохвиль, що вільно поширюються.

Інструмент складається з V-подібної антени, розміром 4 метри від кінчика до кінчика - дипольна антена для вимірювання електричних полів, і магнітної пошукової котушки для вимірювання магнітної складової. Дипольна антена і її

електроніка призначені для аналізу електричних полів в діапазоні частот від 50 Гц до 40 МГц. Антена складається з двох елементів довжиною 2,8 м кожен.

2.1.4. Parker Solar Probe (PSP)

Parker Solar Probe працює в екстремальних умовах, оскільки він збирає дані в короні Сонця, наближаючись до зірки ближче, ніж будь-який інший космічний корабель до цього. Його чотири набори інструментів характеризують динамічну область, близьку до Сонця, шляхом вимірювання частинок, електричних і магнітних полів, і кожен був спеціально розроблений, щоб витримувати суворе випромінювання і температури, з якими вони можуть зіткнутися.

Набір інструментів FIELDS вимірює хвилі і турбулентність у внутрішній геліосфері з високим часовим розрізненням, щоб зрозуміти поля, пов'язані з хвилями і магнітним перез'єднанням, процесом, за допомогою якого силові лінії магнітного поля різко змінюються.

FIELDS використовує чотири тонких довгих штирьових антени і три магнітометра, розміщених на загальній стрілі. Прилад FIELDS вимірює:

- Електричні і магнітні поля, альвеновські хвилі і турбулентність, свисти, електростатичні хвилі, відокремлені хвилі і багато іншого.
- Дуже точно щільність плазми (<1%) і температуру електронів (<5%)
- Швидкі (1 кГц) вимірювання потенціалу космічного апарату і флуктуацій щільності - хвилі стиснення, струмові шари.
- Радіовипромінювання від спалахів, мікроспалахів, ударних хвиль, викликаних КВМ.

На рисунку (2.4) показана загальна схема розташування датчиків FIELDS на космічному кораблі. Датчики електричного поля V1 - V4 встановлюються на підставі системи теплового захисту SPP (TPS) або теплозахисного екрану і розкриваються на сонячному світлі. На висоті перигелію (9,8 Сонячних радіусів) ці антени піддадуться температурі понад 1300° С. Електричні антени

V1 - V4 розгорнуті майже ортогонально, паралельними парами трохи позаду площини теплового екрану космічного корабля.

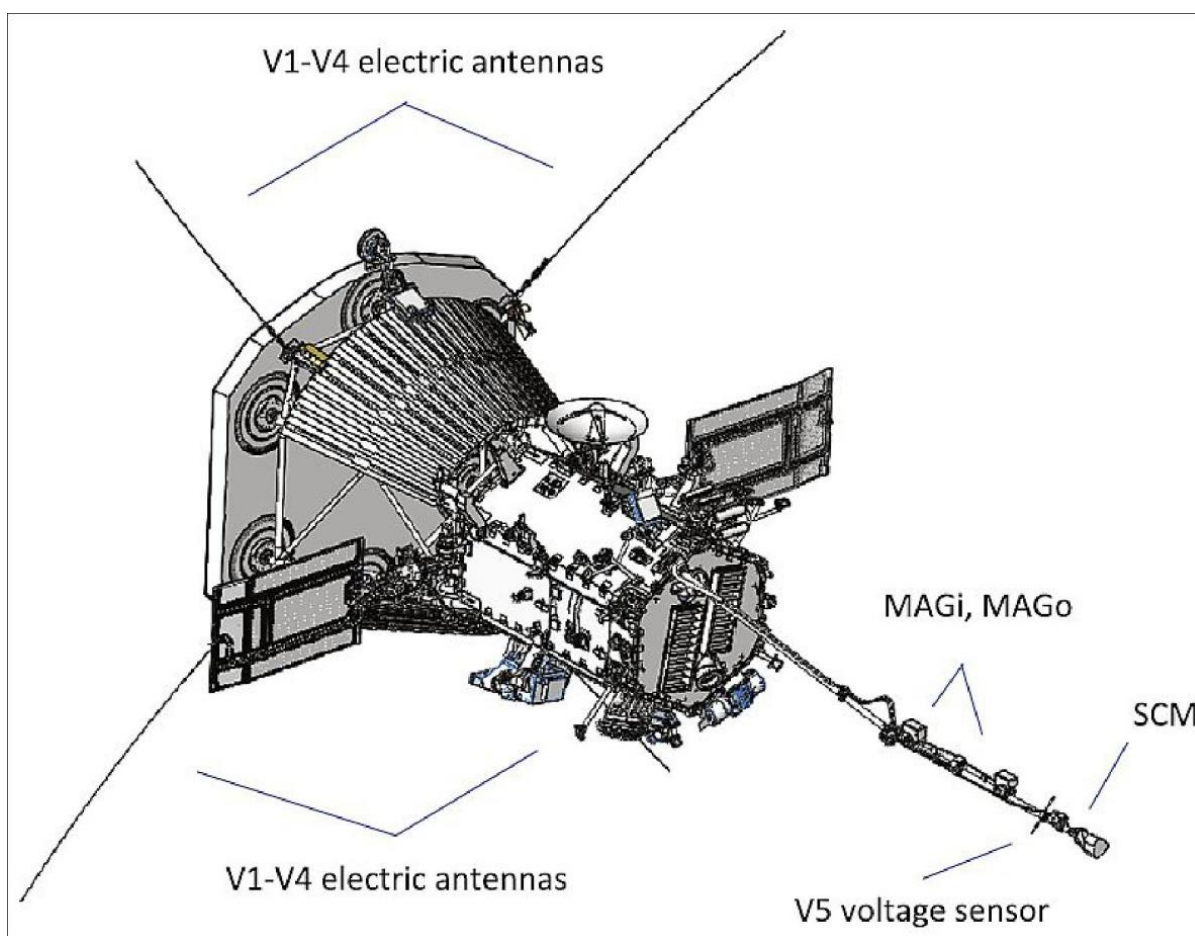


Рис. 2.4. Розташування датчиків апарату Parker Solar Probe.

2.2. Наземні низькочастотні радіотелескопи

2.2.1. УТР-2

На початку 70-х років в Радіоастрономічному інституті НАНУ під керівництвом С. Я. Брауде і А. В. Меня були розпочаті роботи зі створення радіоастрономічних антен декаметрових довжин хвиль. У результаті був створений радіотелескоп УТР-2, який є найбільшим і найдосконалішим на території України інструментом декаметрового діапазону. Радіотелескоп почав роботу в 1970 році, а з 1972 року розпочались регулярні наукові вимірювання.

УТР-2 (український Т-подібний радіотелескоп 2-ї модифікації) побудований по принципу фазованої антенної решітки, що призначена для спостережень у діапазоні 8 — 33 МГц. Він складається з 2040 окремих широкосмугових диполів Надененко і має конфігурацію літери «Т». Одне плече розташоване у напрямку Південь-Північ і має довжину 1860 м, а інше спрямоване на Захід і має довжину 900 м. В кожному плечі 6 рядів диполів, що групуються в секції та підсекції телескопу.

Кожен диполь має точку підвісу на висоті 3.5 м над рівнем землі. Довжина диполя складає 8 м, а діаметр циліндра — 1.8 м. Плечі усіх диполів розташовані уздовж напрямку місцевої паралелі. Таким чином, радіотелескоп може приймати електромагнітні хвилі тільки однієї лінійної поляризації.

Радіотелескоп працює за часовою системою фазування, що побудована за принципом перемикання ліній реальної часової затримки сигналу. Для економії кабелів використовується ялинко-подібний метод, за допомогою якого спочатку фазуються і сумуються сигнали від диполів у рядах, потім у групах рядів, що формують секції радіотелескопа, а на останньому етапі фазуються сигнали з кожної секції. Лінії затримки об'єднані у пристрої, що називаються фазообертачами.

Телескоп може спостерігати в різних конфігураціях, одним чи п'ятьма променями діаграми спрямованості. У разі п'ятипроменевого режиму роботи всі п'ять променів розташовані уздовж напрямку Південь-Північ, перетинаються на рівні половинної потужності (на центральній частоті) та не залежать від частоти.

Діаграма спрямованості може приймати дискретні положення та покриває майже всю небесну півкулю. Комп'ютер керування відправляє бінарний код на фазообертачі, які підключають необхідні комбінації ліній затримок. Таким чином відбувається наведення телескопа на космічне джерело.

Його відмінностями є:

- великі лінійні розміри і ефективна площа (150 000 м²);

- висока спрямованість (ширина діаграми спрямованості близько $0,5^\circ$);
- низький рівень бічних пелюсток;
- широкий діапазон частот (8-33 МГц);
- електронне управління променем в широкому секторі за обома координатами і багатопроменевість;
- великий динамічний діапазон;
- гнучка конфігурація, розвинена система контролю і надійність роботи;
- велика інформативність (отримує 70 % світової інформації з космосу в декаметровому діапазоні).

Поєднання високої ефективності радіотелескопа УТР-2 і нових реєструючих засобів дозволило провести великий обсяг досліджень за різними програмами, які дали нові астрофізичні результати. Вдалося по-новому поглянути на Сонце, Юпітер, Сатурн, міжпланетні мерехтіння, пульсари і джерела континууму. УТР-2 також є головною складовою системи радіоінтерферометрів «УРАН».

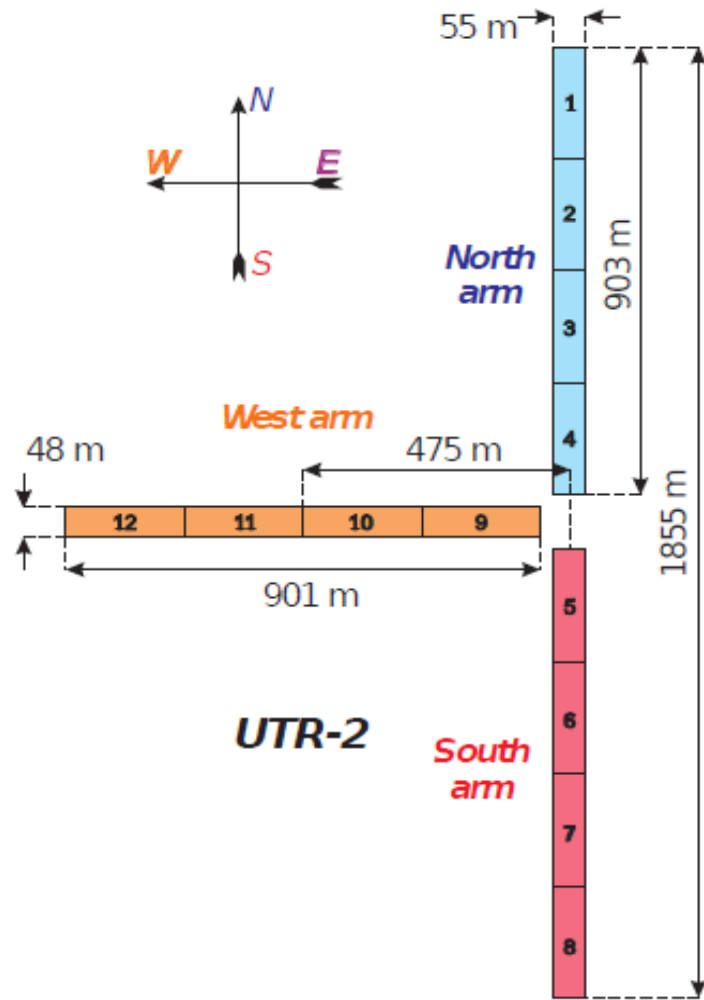


Рис. 2.5. Схема радіотелескопу УТР-2.



Рис. 2.6. Елемент антенної решітки УТР-2. Диполь Надененко.

2.2.2. ГУРТ

Роботи зі створення гігантського українського радіотелескопу (ГУРТ) були розпочаті у 2006 році в Радіоастрономічному інституті НАНУ під керівництвом академіка Коноваленко О.О.

Гігантський український радіотелескоп – це активна фазована антенна решітка (АФАР), що призначена для роботи у діапазоні частот 8-80 МГц. Секції ГУРТ являють собою квадратну 25-елементну АФАР, що складається з 5 рядів уздовж лінії Схід-Захід по 5 диполів в кожному ряду. Відстань між центрами антенних елементів вздовж і поперек рядів дорівнює 3.75 м. Всі елементи, що входять до складу решітки, розташовані на висоті 1.6 м над землею і орієнтовані під кутом 45° до напрямку Схід-Захід. Кожен елемент виконаний у вигляді двох ортогональних горизонтальних симетричних широкосмугових активних диполів. Кожна секція радіотелескопу ГУРТ є самостійною АФАР. Сигнали від субрешіток надходять на входи багатоканального приймача з аналогово-цифровим перетворювачем, де піддаються обробці, після чого записуються на носії інформації.

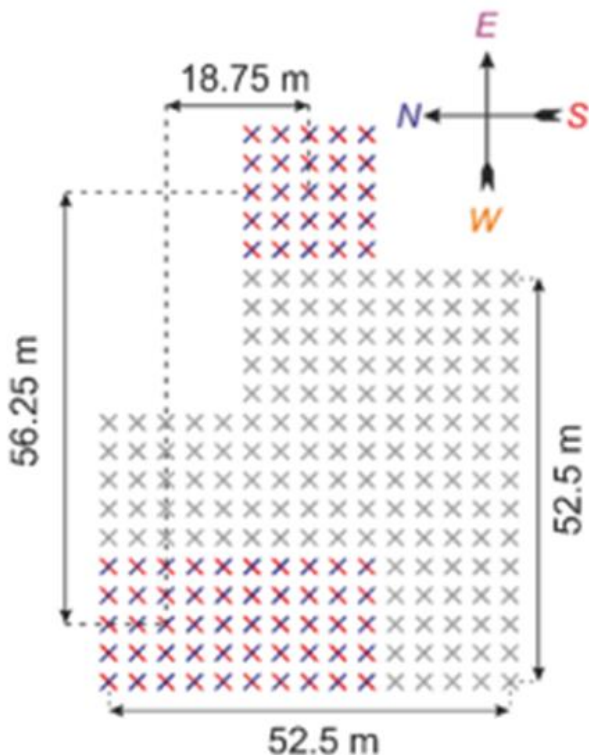


Рис. 2.7. Схема секцій радіотелескопу ГУРТ.

2.2.3. Радіотелескоп SELENA

З 2019 у РІНАНУ проводяться проектні роботи над створенням низькочастотного радіотелескопу, що базується на зворотному боці Місяця під кодовою назвою SELENA. Радіотелескоп SELENA буде складатися з 5 активних антен, які працюють в діапазоні 1-40 МГц.

Антенна має хрестоподібну конструкцію, що складається з двох ідентичних взаємно-ортогональних симетричних диполів складної форми (рис. 2.8). До клем диполів підключені ідентичні малошумні підсилювачі. Диполь складається з двох симетричних плечей, нахилених донизу під кутом $\alpha = 45^\circ$, створених з тонкостінних сталевих трубок діаметром 23 мм, АВ = 23 см, ВС = 240 см, Н = 170 см.

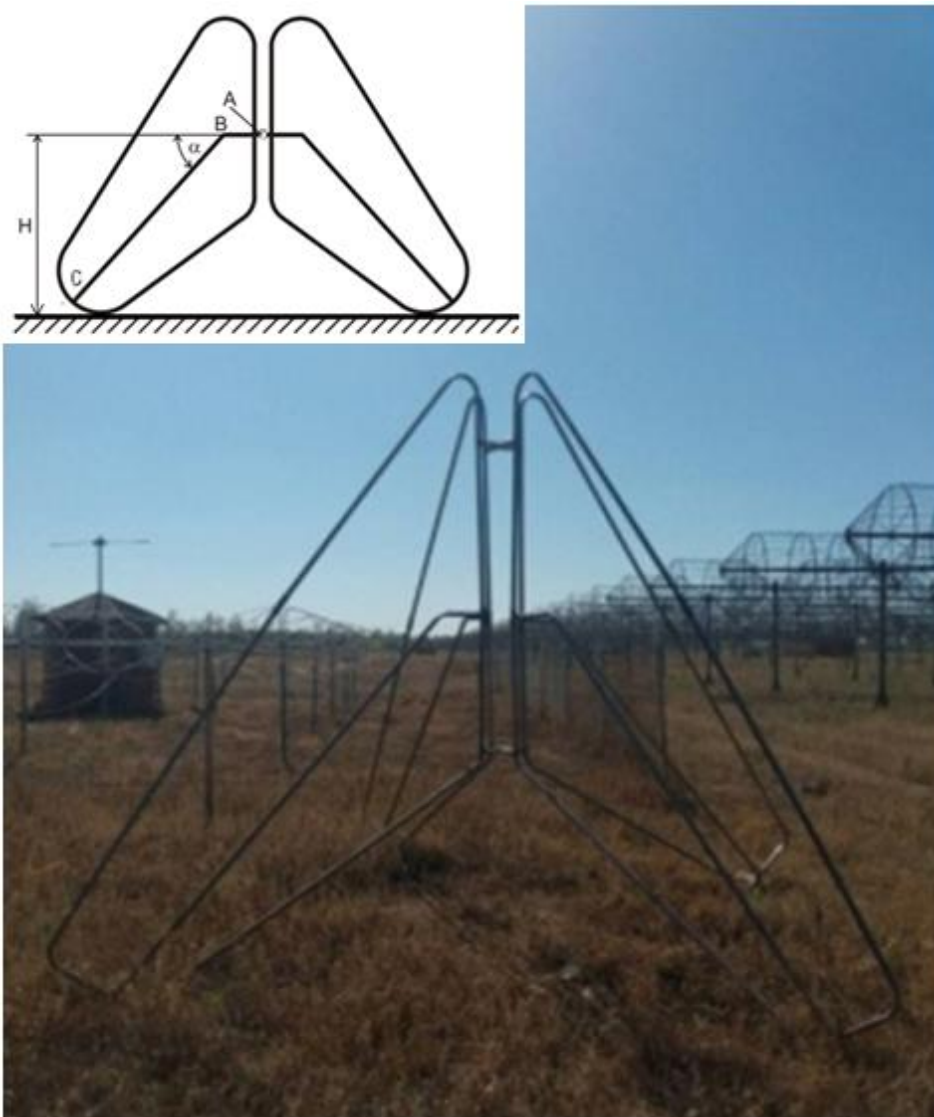


Рис. 2.8. Елемент радіотелескопу SELENA.

В даний час радіотелескоп проходить випробування на Землі. Для антени SELENA та супутникових антен у даній роботі були розраховані і нанесені на графік ефективні площі на різних частотах. На рисунку 2.9 приведена змодельована ефективна площа антени SELENA. Показані розрахункові ефективні площі антен використаних у космічних місіях суміжного частотного діапазону. З графіка видно, що SELENA є більш ефективним інструментом, ніж ті, які встановлені на космічних апаратах. Точні значення ефективних площ вказані у таблиці 2.3.

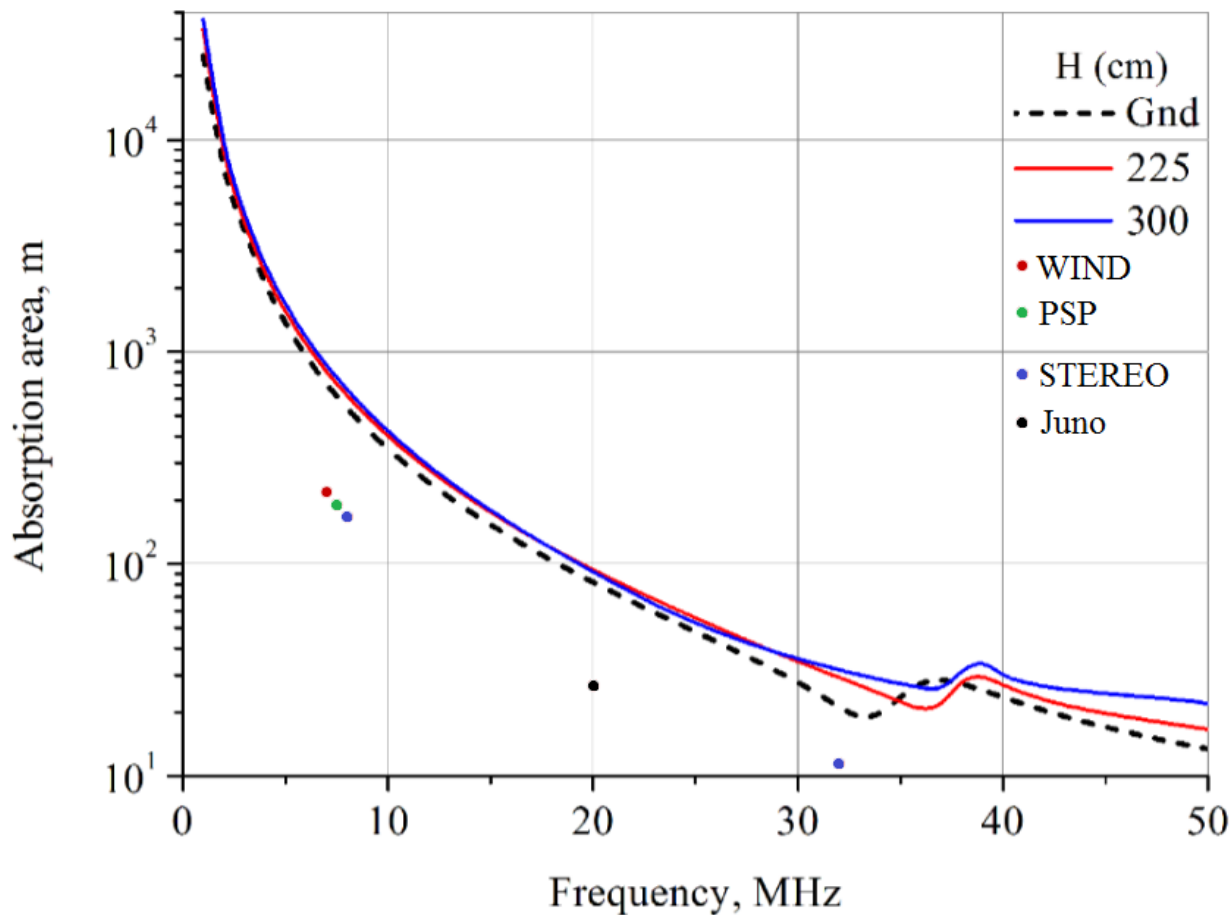


Рис. 2.9. Частотні залежності ефективної площі супутникових антен та антени SELENA без врахування ККД.

Частота, МГц	Ефективна площа антени, м ²				
	SELENA	WIND	STEREO	PSP	Juno
7	700	219.273			
7.5	610			190.986	
8	540		167.859		
15	150				
20	80				26.857
25	47				
30	27				
32	21		11.47		
35	23.5				
38	27				
40	23.5				
45	17				
50	13.4		6.875		

Таб. 2.3. Частотні залежності ефективної площі диполю та супутникових антен.

3. Вікова зміна щільності потоку залишку спалаху наднової Кассіопеї А

У 1960 році І. С. Шкловським було передбачене вікове зменшення щільності потоку радіовипромінювання молодого залишку спалаху наднової Кассіопея А на стадії його адіабатичного розширення. Вікове зменшення потоку Кассіопеї А немонотонно в часі і нерівномірно в різних частотних діапазонах. За спостереженнями на різних частотах було встановлено, що швидкість зменшення потоку залежить від частоти. Це явище називається еволюцією спектра радіовипромінювання Кассіопеї А.

Важливо помітити, що на низьких частотах (нижче 300 МГц), існує набагато менше опублікованих даних про еволюцію спектра Кассіопеї А, ніж на високих. У цьому діапазоні частот досить часто застосовуються відносні методи визначення щільності потоку радіовипромінювання, а в якості опорного радіоджерела в даному випадку використовується радіогалактика Лебідь А (3С405), щільність потоку якої незмінна і до того ж найбільш близька за величиною до щільності потоку досліджуваного джерела Кассіопея А.

3.1. Наднові зірки

Спалах наднової - один з найпотужніших катастрофічних природних процесів. Після того як зірка головної послідовності діаграми Герцшпрунга-Рассела витрачає весь запас водню в ядрі, термоядерні реакції починають протікати в шарі біля ядра, що призводить до сильного розширення зовнішніх шарів зірки і вона переходить на стадію червоного гіганта. В одному випадку, після скидання оболонки, в центрі залишається компактний об'єкт - білий карлик, але якщо маса залишку перевищує так звану межу Чандрасекара (1.44 маси Сонця), то відбувається катастрофічне явище - вибух наднової, який супроводжується викидом значної маси речовини зовнішньої оболонки зірки в

міжзоряний простір, а з решти, як правило, утворюється компактний об'єкт - нейтронна зірка, рідше - чорна діра. Разом вони утворюють залишок наднової.

Наднава є одним з кінцевих продуктів еволюції зірки і супроводжується виділенням колосальної кількості енергії, в результаті чого світимість зірки може різко збільшитися в десятки мільйонів разів, що іноді перевищує світимість материнської галактики, завдяки чому вони можуть реєструватися з відстаней близько тисячі мегапарсек. Зазвичай спалах (випромінювання) наднової триває кілька сотень днів і повна енергія, яку випромінює наднова, порівняна з випромінюванням Сонця за все його життя.



Рис. 3.1. Знімок телескопа «Хаббл» наднової SN 1994D в галактиці NGC 4526.

Наднові (supernova, SN) розділені на два типи в залежності від їх спектра. В спектрі наднових **I** типу відсутні лінії водню, а у **II** типу вони спостерігаються. Ці дві групи діляться на підкласи. До типу **I** відносять багаті кремнієм SN типу **Ia**, багаті гелієм SN типу **Ib**, а також ті, в спектрах яких немає ні гелію, ні кремнію - тип **Ic**. Наднові типу **II** поділяють на **II-P**, в кривих блиску яких спостерігаються протяжні (~100 діб) «плато», на **II-L**, криві блиску яких лінійно спадають з часом, і на **II-n**, в спектрах яких спостерігаються вузькі лінії. У наднових типу **Ib** спектр з часом змінюється і стає схожим на спектр **Ib**. Основними спостережними характеристиками наднових залишаються їх криві блиску та спектри.

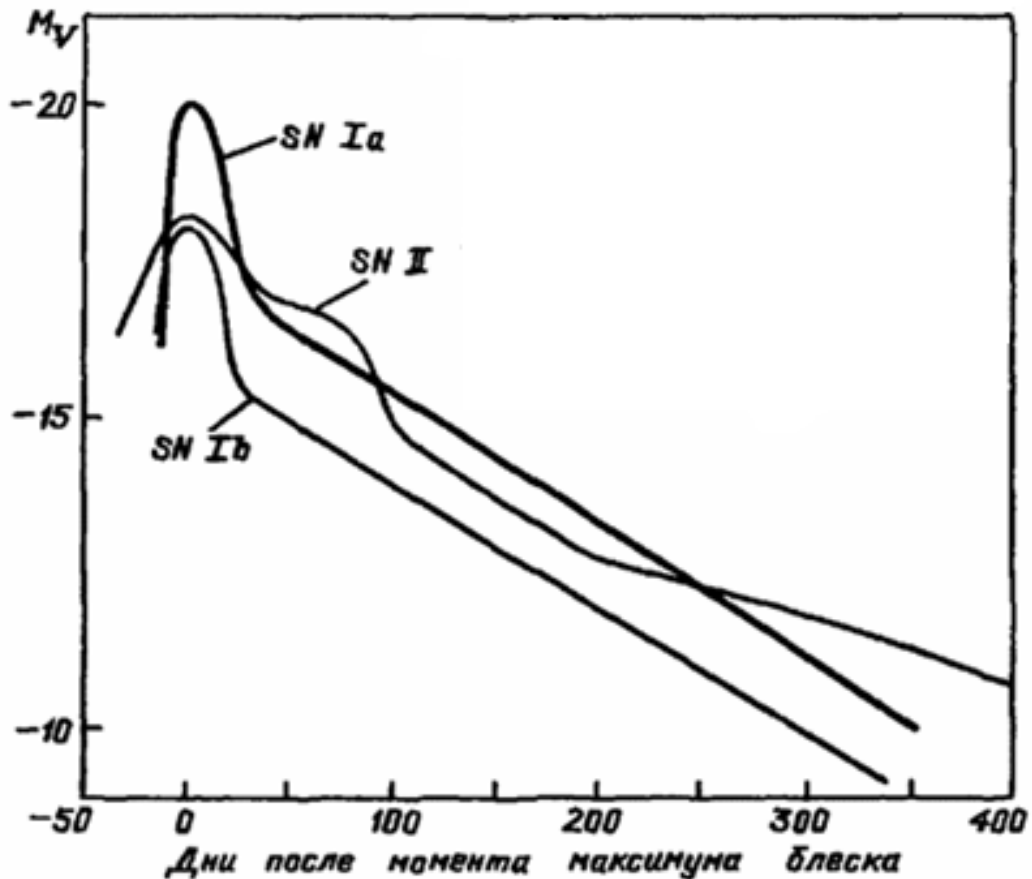


Рис. 3.2. Приклад кривих блиску наднових різних типів.

3.1.1. Наднові I типу

Наднава зірка типу Ia – це «термоядерна» наднова, в основі механізму вибуху якої лежить процес термоядерного синтезу в вуглецево-кисневому ядрі зірки. В спектрах наднових Ia немає ліній водню. Попередниками SN Ia є білі карлики з масою, близькою до межі Чандрасекара. Вважається, що такі зірки можуть утворюватися при перетіканні речовини від другої компоненти подвійної зоряної системи. Криві блиску носять універсальний характер, що свідчить про приблизно однакові властивості переднаднової цього типу.

Механізм спалаху SN Ia полягає в наступному: при збільшенні маси білого карлика поступово збільшується його щільність і температура. Коли досягається температура близько 10^8 К, виникають умови для термоядерного «горіння» вуглецево-кисневої суміші. Від центру до зовнішніх шарів починає

поширюватися фронт горіння, який супроводжується інтенсивними великомасштабними конвективними процесами, що призводять до ще більшого посилення термоядерних реакцій і виділення енергії, необхідної для скидання оболонки наднової.

Характерна риса наднових типу Ia - схожість кривих блиску і майже однакова світимість в їх максимумі. Оскільки причиною вибуху наднової типу Ia, як правило, є процес перетікання речовини з червоного гіганта на білий карлик, а гранична маса дорівнює межі Чандрасекара, то при вибухах наднових цього типу відбувається виділення приблизно однієї й тієї ж енергії. В середньому в одній галактиці наднові типу Ia спалахують раз в 500 років.

Спостереження SN Ia показали, що відхилення світимості в максимумі блиску від середнього значення пов'язане зі швидкістю спаду блиску після максимуму. Спостерігаючи за кривою блиску, можна визначити яку зоряну величину наднова мала в максимумі, а значить - визначити відстань. Тому SN Ia наразі використовуються як «стандартні свічки» для визначення відстаней до далеких галактик. Найдалша галактика, у якій зареєстрована SN Ia, має червоне зміщення $z = 1.7$, тобто віддалена від Землі на більш ніж один гігапарсек. Залежність видима зоряна величина-відстань для джерел зі стандартним енерговиділенням використовується для перевірки космологічних моделей. Так, зі спостережень далеких SN Ia в 1998 році був зроблений висновок, що Всесвіт розширюється з прискоренням.

Найбільш відомими надновими типу Ia в нашій Галактиці є SN 1572 і SN 1604. SN 1572 або наднова Тихо Браге спалахнула в сузір'ї Кассіопеї в листопаді 1572 року. У 1952 році на місці спалаху було знайдене джерело радіовипромінювання. У 1960 році залишок наднової був знайдений в оптичному діапазоні. SN 1604 або наднова Кеплера спалахнула в 1604 році в сузір'ї Змієносця, приблизно в 6000 парсеках від Сонячної системи.

3.1.2. Наднові II типу

В процесі термоядерного синтезу і утворення важких елементів зірка стискається, а температура в її центрі зростає. Якщо маса зірки достатньо велика, то процес термоядерного синтезу доходить до завершення з утворенням ядер заліза і нікелю, а стиснення триває. При цьому термоядерні реакції триватимуть тільки в деякому шарі зірки навколо центрального ядра - там, де ще залишилося невиворіване термоядерне паливо. Центральне ядро стискається все сильніше, і в певний момент через тиск в ньому протони починають поглинати електрони, перетворюючись на нейтрони. Це викликає швидко втрату енергії, яка уноситься нейтрино, які утворюються, так що ядро зірки стискається і охолоджується. Процес колапсу центрального ядра настільки швидкий, що навколо нього утворюється хвиля розрідження. Тоді слідом за ядром до центру зірки прямує і оболонка. Далі відбувається відскок речовини оболонки від ядра і утворюється ударна хвиля, що поширюється назовні. При цьому виділяється достатня енергія для скидання оболонки наднової з великою швидкістю.

Явище наднової II типу (і типу Ib/c) означає практично миттєве енерговиділення порядку $E_0 = 10^{51}$ ерг. Ця енергія переходить в кінетичну і теплову енергію оболонки, що розширюється. Збільшення блиску пов'язане з нагріванням зовнішніх шарів зірки ударною хвилею (УХ), яка нагріває і прискорює оболонку. До моменту досягнення УХ поверхні зірки (через кілька годин або днів після колапсу в залежності від радіуса оболонки) первісна енергія E_0 приблизно порівну поділена між внутрішньою енергією і кінетичною енергією оболонки. У момент виходу УХ на поверхню, виникає короточасний потужний спалах ультрафіолетового випромінювання, але основна частина енергії висвічується пізніше, у міру прискорення дифузії випромінювання в процесі розширення.

На початкових фазах оболонка розширюється вільно (зовнішнє середовище не справляє динамічного опору) за законом $R = v \cdot t$. Тривалість

кривих блиску наднових II типу визначається перш за все часом виходу (дифузією) випромінювання з оптично непрозорої оболонки, яка розширюється. Таким чином, по тривалості максимуму кривої блиску можна оцінити масу скинутої оболонки, яка в усіх випадках виявляється більше 8 мас Сонця. Це підтверджує, що наднові II типу пов'язані з еволюцією масивних зірок з протяжними водневими або гелієвими (в разі наднових типу Ib / c) оболонками.

Основним джерелом енергії свічення оболонки цього типу наднових є рекомбінація водню (виділяється енергія - 13.6 eV на один атом H) при розширенні оболонки. При масі оболонки в 8-10 M_{\odot} виділяється порядку 10^{47} ерг. Через рекомбінаційне випромінювання оболонки на кривих блиску наднових II типу часто спостерігається плоска ділянка (плато) (так звані наднові типу II_p). Найважливіше джерело енергії свічення оболонки наднової на стадіях після максимуму блиску - радіоактивний розпад $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$. Він найбільш важливий у наднових типу Ia. Після максимуму криві блиску SN II типу різко спадають і також виходять на режим експоненційного зменшення світимості за рахунок радіоактивних розпадів. При розпаді ^{56}Ni енергія виділяється у вигляді гамма-випромінювання в лініях з енергіями в діапазоні 0.163—1.56 MeV.

На наступних стадіях підключається розпад ^{56}Co (період напіврозпаду близько 100 днів) і інших радіоактивних ізотопів. Повний запас енергії в радіоактивному розпаді може бути порядку і навіть більше енергії рекомбінації. В результаті колапсу залізного ядра фізичні умови не дозволяють синтезувати занадто багато ^{56}Ni .

Через різні фізичні параметри переднаднової II типу (маса, радіус, хімічний склад і т. д.) криві блиску SN II типу відрізняються великою різноманітністю, а їх абсолютні зоряні величини в максимумі блиску варіюються в широких межах $M_{max,II} = -17^m \pm 1^m.5$.

Прийнято вважати, що утворенням наднової II типу закінчується еволюція всіх зірок, початкова маса яких перевищує 10 M_{\odot} . Прикладом

наднової типу II служить SN 1987A, що спалахнула в галактиці Велика Магелланова Хмара приблизно в 50 кпк від Сонця. У максимумі вона була видна неозброєним оком, при цьому пікова видима зоряна величина склала +3. Це найближчий спалах наднової з часів винаходу телескопа.

Виявлення радіовипромінювання від залишків спалахів наднових обох типів є найважливішим етапом в історії вивчення цих об'єктів. Дослідження радіовипромінювання є потужним методом аналізу фізичних умов в їх оболонках, що в свою чергу ставить ряд питань, які безпосередньо стосуються самої природи спалахів. Аналіз радіовипромінювання залишків спалахів наднових дозволяє глибше зрозуміти природу взаємодії їх оболонок, що розширюються і міжзоряного середовища.

3.2. Кассіопея А

Залишок спалаху наднової (ЗСН) в сузір'ї Кассіопеї був виявлений в 1947 році. У 1951 р. були уточнені координати цього джерела, що дозволило ототожнити його з пекулярною туманністю - залишком спалаху наднової II типу. Аналіз швидкостей волокон цієї туманності дозволяє зробити оцінки можливих дат спалаху наднової: 1658 ± 3 , 1671.3 ± 0.9 , 1662 ± 27 і 1672 ± 18 – без урахування гальмування волокон Кассіопеї А в міжзоряному середовищі, та 1681 ± 19 – з урахуванням гальмування, а вік стаціонарних конденсацій, який визначається швидкістю і відстанню від центру дорівнює 11000 ± 2000 років.

Будучи одним з найбільш потужних космічних радіоджерел, воно спостерігається у всіх діапазонах електромагнітних хвиль аж до жорстких гамма-променів. З огляду на відносну близькість і молодість Кассіопея А (Cas A, ЗС 461) широко використовується для дослідження фізичних процесів в залишках наднових, що спалахнули через колапс ядра. Крім того, даний ЗСН застосовується для калібрування радіотелескопів і в антенних вимірах при роботі з відносно невеликими антенами.

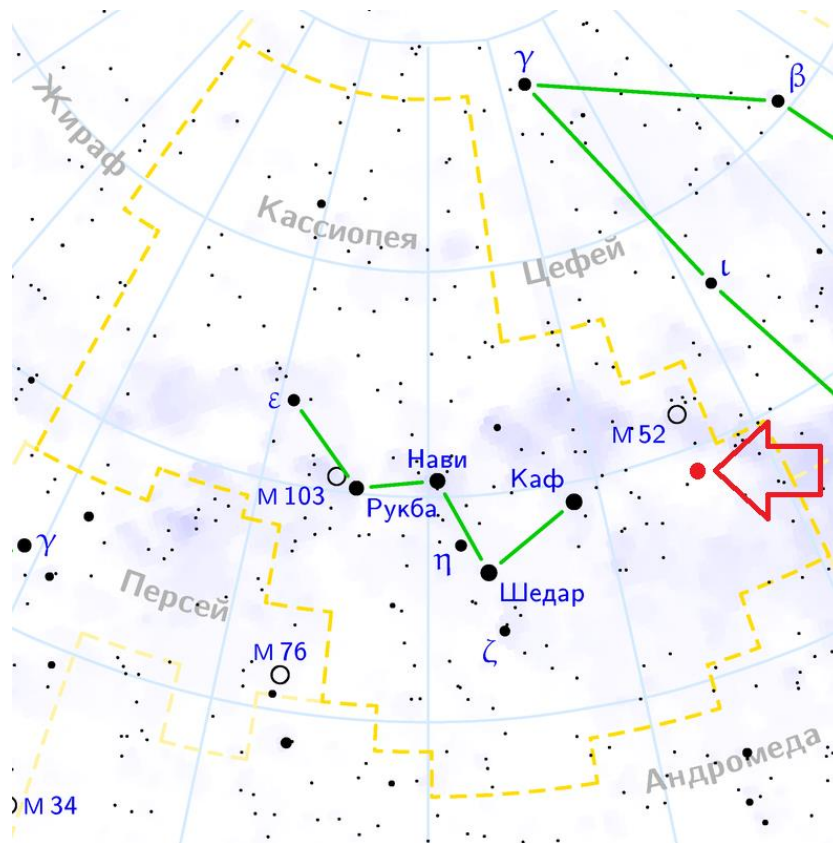


Рис. 3.3. Положення Кассіопеї А на небесній сфері.

Спектр ЗСН відрізняється від спектра джерел теплового радіовипромінювання (наприклад, дифузних і планетарних туманностей). Залишки спалахів є джерелами нетеплового радіовипромінювання. Саме ця властивість дозволяє виділити їх з групи газових туманностей, які в окремих випадках також мають волокнисту структуру.

Наявність нетеплового радіовипромінювання, обумовленого релятивістськими електронами, що рухаються в магнітних полях ("синхротронного" випромінювання), є характерною особливістю залишків спалахів наднових як I, так і II типів.

Найважливішою характеристикою радіовипромінювання будь-якого джерела є його спектр. В радіоастрономії спектральна щільність потоку зазвичай визначається наступним чином:

$$F_{\nu} = C\nu^{-\alpha}, \quad (3.1)$$

де α називається спектральним індексом. Зазвичай спектральний індекс має порядок одиниці.

У дуже широкому діапазоні частот одним значенням параметра α представити зміну F_ν вдається рідко. Наприклад, у багатьох метagalactic джерел спектральний індекс в дециметровому і сантиметровому діапазонах більше, ніж в метровому. Іноді у таких джерел спостерігається плавне збільшення α з ростом частоти. Тим більше цікаво, що у радіоспектрі залишків спалахів наднових, зокрема у Кассіопеї-А, спектральний індекс відрізняється дивовижною постійністю при зміні частоти в широких межах. На рис. 3.4 представлений спектр Кассіопеї-А, отриманий на основі всіх відомих спостережень на епоху 1960 р. Видно, що для всієї області частот $\nu > 15$ МГц спектр характеризується одним значенням $\alpha = 0,8$. Низькочастотний завал спектра обумовлений поглинанням в залишковій зоні НІ іонізованого водню навколо Cas A.

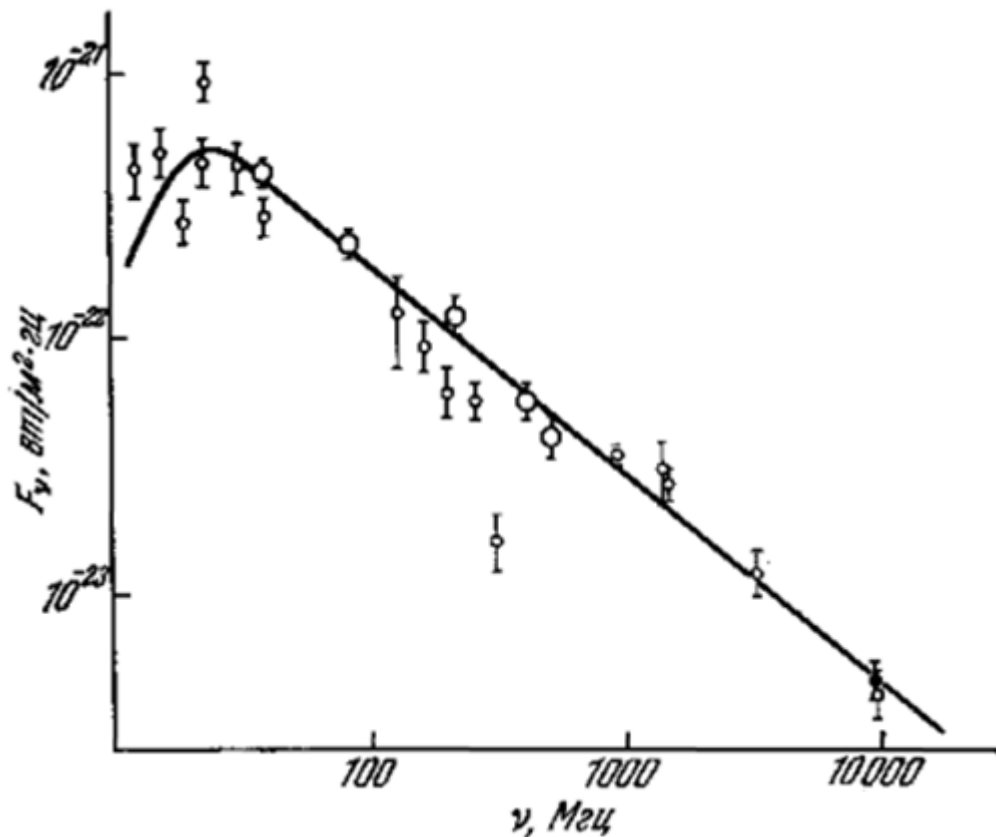


Рис. 3.4. Радіоспектр Кассіопеї-А.

Ще однією важливою характеристикою будь-якого джерела космічного радіовипромінювання є його кутові розміри. Кутові розміри Кассіопеї-А вперше були виміряні в 1952 році і становлять близько 4' на частоті 120 МГц.

Основною особливістю розподілу інтенсивності радіовипромінювання Кассіопеї-А є явно виражена оболонкова структура цього джерела.

Кембриджські спостереження показали, що ця оболонка має досить нерегулярну структуру. У ній помітно близько 10 конденсацій, причому три досить яскраві. Товщина радіовипромінюючої оболонки помітно перевищує товщину оболонки, в якій зосереджені оптичні філаменти і конденсації. Радіояскравість джерела Кассіопея-А вельми велика. В оболонці об'ємна світимість принаймні в 10^8 разів більше, ніж в навколишньому міжзоряному просторі. Особливо велика об'ємна світимість в «радіоконденсаціях» (рис. 3.5).

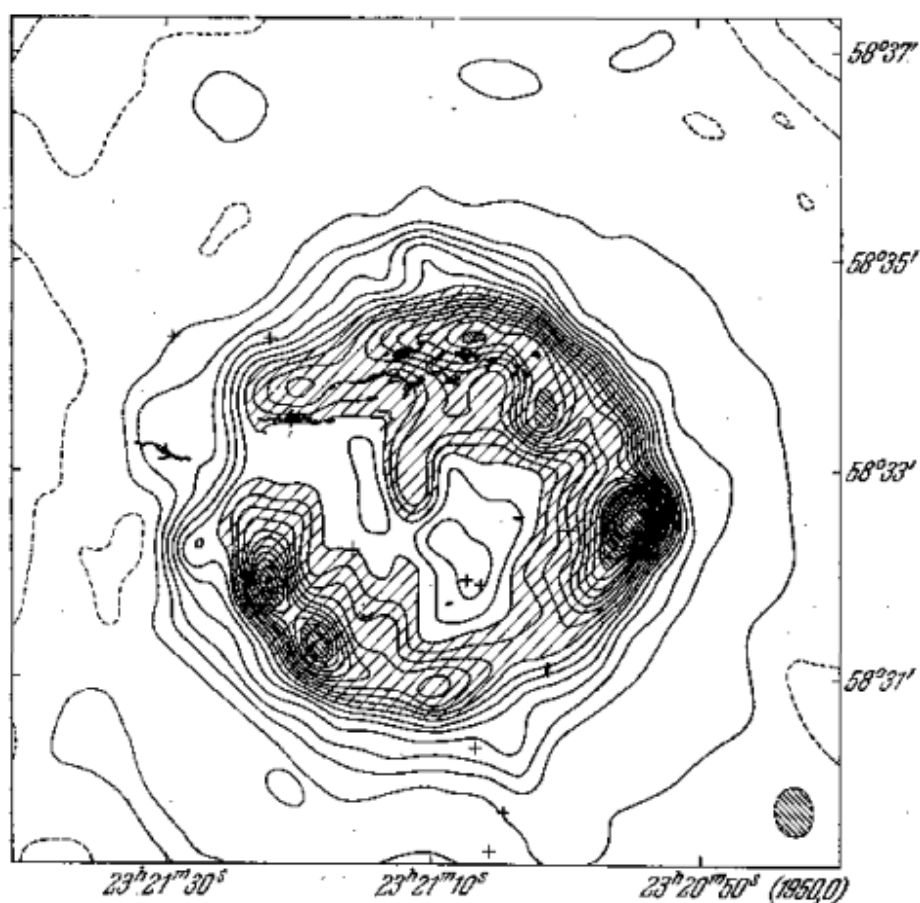


Рис. 3.5. Схема оболонкової структури Кассіопеї-А.

Залишки спалахів наднових представляють собою системи, що розширюються. Ми спостерігаємо різні стадії цього розширення. Туманність Кассіопея А порівняно молодий об'єкт і оболонка, викинута при спалаху майже не загальмувалася міжзоряним середовищем, а швидкість її розширення складає $\sim 7-8$ тисяч км/сек. У міру розширення ЗСН напруженість пов'язаного з

нею магнітного поля буде зменшуватися. У зв'язку з чим слід очікувати зменшення енергії релятивістських частинок, які знаходяться у туманності. Якщо вважати, що утворення релятивістських частинок припиняється на деякому порівняно ранньому етапі розширення туманності, то зі зменшенням напруженості магнітного поля і енергії релятивістських частинок в міру подальшого розширення слід очікувати зменшення потоку радіовипромінювання.

Зменшення потужності джерел в міру розширення пов'язаних з ними туманностей залежить від їх спектрального індексу. Особливо це має бути помітно для порівняно великих значень α . На межі Кассіопею А ще можна буде спостерігати коли її радіус стане ~ 13 пк. Враховуючи все ще величезну величину потоку радіовипромінювання Кассіопеї А, можна очікувати що спостереження, навіть відокремлені один від одного невеликими проміжками часу, дозволять виявити не тільки вікове зменшення потоку, але і зміну спектра. Якщо розширення відбувається весь час з постійною швидкістю, то при $\alpha = 0.8$ відносне зменшення потоку Кассіопеї А за рік складе:

$$\frac{\Delta F_{\nu}}{F_{\nu}} = \frac{\beta}{360} = 1,44 \%, \quad (3.2)$$

$$\beta = 2\gamma, \quad \alpha = \frac{\gamma - 1}{2}.$$

Основні передумови теорії з яких випливає цей висновок:

1. Механізм радіовипромінювання – синхротронний.
2. Джерело радіовипромінювання розширюється зі швидкістю, яка визначається оптичними спостереженнями туманності.
3. Напруженість магнітного поля спадає за степеневим законом.
4. Кількість релятивістських електронів в процесі розширення не збільшується.

Таким чином, очікуваний ефект зменшення щільності потоку Кассіопеї А є природним наслідком уявлень про природу радіовипромінювання ЗСН.

Через помилки радіоастрономічних спостережень доцільно досліджувати відношення потоків Кассіопеї А та джерела з постійним потоком. Для цих цілей підходить радіогалактика Лебідь А, у якої величина потоку порівняна з потоком від Кассіопеї А, а міжгалактична природа данного джерела практично виключає варіації потоку.

Перші спостереження були проведені в 1961 р на довжині хвилі 3.7 м. В результаті середня щорічна швидкість зменшення потоку склала $1.06 \pm 0.14\%$. Щорічна зміна потоку отримана з більш пізніх спостережень дає величину близько $1.14 \pm 0.26\%$.

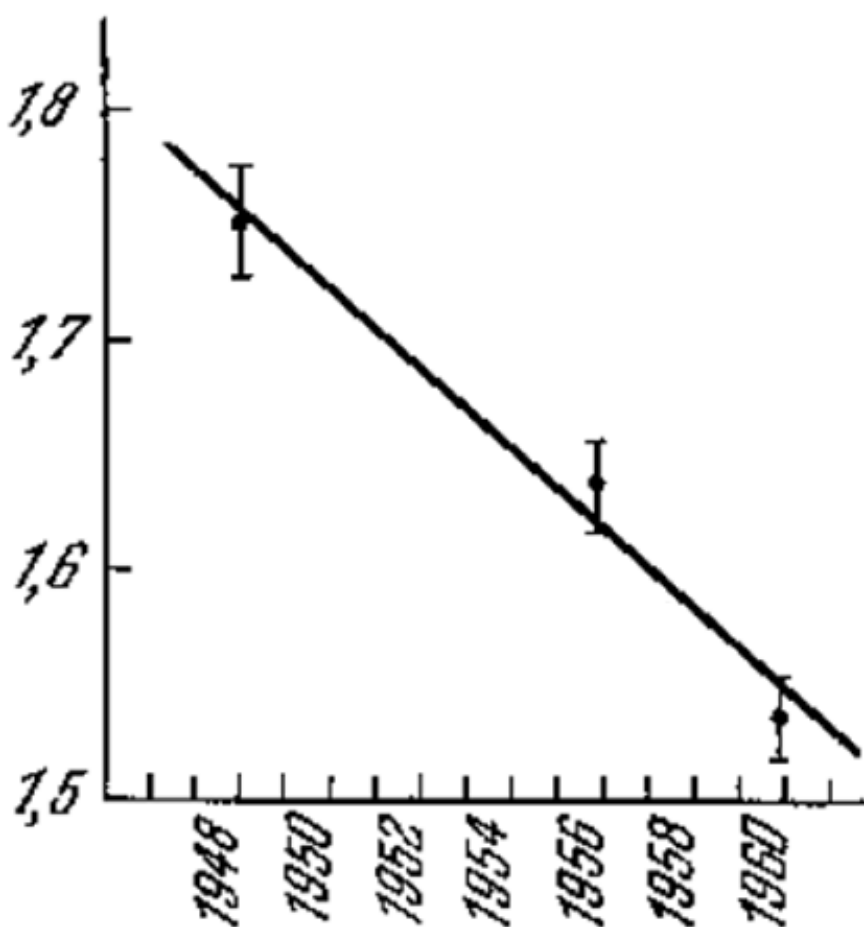


Рис. 3.6. Вікове зменшення потоку радіовипромінювання Кассіопеї А на довжині хвилі 3,7 м.

3.2.1. Стадії взаємодії оболонки з навколишнім середовищем

Скинута при спалаху наднової оболонка розширюється з надзвуковою швидкістю в міжзоряне середовище, тому в системі відліку, пов'язаною з оболонкою, в навколишнє середовище і всередину відходять дві ударні хвилі. Зовнішня УХ поширюється назовні по незбуреному міжзоряному середовищу, а зворотна - йде по залишку наднової і розігріває газ залишку до дуже високих температур. Розрізняють декілька стадій взаємодії оболонки з навколишнім середовищем.

Стадія 1. Вільний розліт.

На цій стадії оболонка рухається за інерцією, як якщо б зовнішнього середовища не було взагалі, $R(t) \sim t$. Випромінювання оболонки не впливає на її динаміку. Стадія закінчується при «згрібанні» маси навколишньої речовини, приблизно рівній масі оболонки $M_0 = (4\pi/3)\rho R^3$. Для $\rho = 2 \cdot 10^{-24}$ г/см³ і $M_0 = M$ цей момент настає при $R \approx 2$ пк, приблизно через 100 років після початку розширення. Тривалість стадії від десятків до декількох сотень років, в залежності від щільності навколишнього газового середовища. Єдиний відомий близький залишок SN, який спостерігається на стадії вільного розльоту, - SN 1987A в Великій Магеллановій Хмарі.

Стадія 2. Адіабатичне розширення.

Радіаційні втрати енергії з оболонки як і раніше не впливають на її динаміку (звідси назва - адіабатична стадія), так як температура газу за фронтом ударної хвилі дуже висока. Кінетична енергія оболонки витрачається на нагрів газу за фронтом сильної УХ і на прискорення міжзоряного газу, що згрібається. В кінці стадії вільного розльоту розвивається зворотна УХ, що розповсюджується всередину оболонки (в системі координат, пов'язаній з фронтом УХ), але триваюча рухатися назовні в лабораторній системі. Більшість відомих залишків SN спостерігаються саме на адіабатичній стадії.

Радіовипромінювання має синхротронну природу (світіння релятивістських електронів, прискорених за фронтом УХ, в магнітному полі газу, стиснутому ударною хвилею).

Стадія 3. Стадія снігоочисника.

Настає після охолодження газу оболонки, коли температура падає нижче $\approx 6 \cdot 10^5$ К і плазма починає інтенсивно висвічувати запасені теплову енергію. Оболонка стає тонкою і відносно холодною, оскільки радіальна швидкість газу, через який пройшла УХ, менше швидкості руху фронту по середовищу, і газ, що підтискається гарячим середовищем зсередини, довго залишається поблизу фронту УХ. Однак на відміну від першої стадії, розширення оболонки до цього часу вже сильно сповільнюється. Розріджений гарячий газ всередині оболонки практично не остигає за час її існування (через низьку щільність і високу температуру) і додатково підтримує розширення оболонок на пізніх стадіях.

В дійсності, значна неоднорідність щільності міжзоряного середовища, магнітні поля, різні нестійкості та інші астрофізичні фактори значно ускладнюють наведену вище схематичну картину еволюції залишків наднових. У деяких типах залишків основна енергія в оболонку продовжує надходити в процесі її розширення у вигляді релятивістських частинок, народжених нейтронної зіркою з сильним магнітним полем, яка швидко обертається - пульсаром, що утворюється в результаті колапсу. Добре відомий приклад молодого залишку наднової з пульсаром - Крабоподібна туманність, залишок спалаху SN 1054 року в сузір'ї Тільця.

3.3. Радіогалактика Лебідь А

Лебідь А (*Cygnus A*, 3С 405) (рис. 3.7) - найпотужніше позагалактичне джерело радіовипромінювання (10^{38} Вт) в своєму сузір'ї (на що вказує буква А у назві) і одне з найсильніших на всьому небосхилі. Було виявлене Гроутом Ребером у 1939 році. Віддалена від нас на відстань 600 мільйонів світлових років і має червоне зміщення $z = 0.057$. Значна різниця потужності

радіовипромінювання Лебідя А і найближчої до нас зовнішньої системи, галактики Андромеда (10^{32} Вт), призвела згодом до поділу галактик на два типи - нормальні галактики, подібні туманності Андромеди, і радіогалактики.

Оптичними методами виявлене випромінювання сильноіонізованої плазми в області ядра галактики. Кутова відстань між яскравими областями компонентів подвійної структури близько 2" (приблизно 80 кпк).

У ядрі галактики виявлене компактне радіоджерело з плоским спектром (Спектр вважається плоским, коли спектральний індекс $\alpha > -0.5$. Спектральний індекс - це нахил дотичної до кривої континуального радіоспектра джерела на заданій частоті. У разі лінійної апроксимації це просто нахил прямої або коефіцієнт при змінному параметрі.). Повна радіосвітність домінуючої в радіовипромінюванні подвійної структури - порядку $3 \cdot 10^{44}$ ерг/с і її можна порівняти з радіосвітністю подвійних структур багатьох квазарів.

У метровому і декаметровому діапазонах довжин хвиль щільність потоку Лебідя А, виражена в Янських ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$), описується наступним співвідношенням:

$$F_{\text{Леб}} = 3.835 \cdot 10^5 \cdot f^{-0.718} \exp[-0.342(21.713/f)^{2.1}], \quad (3.3)$$

де f - частота на якій ведеться спостереження (МГц).

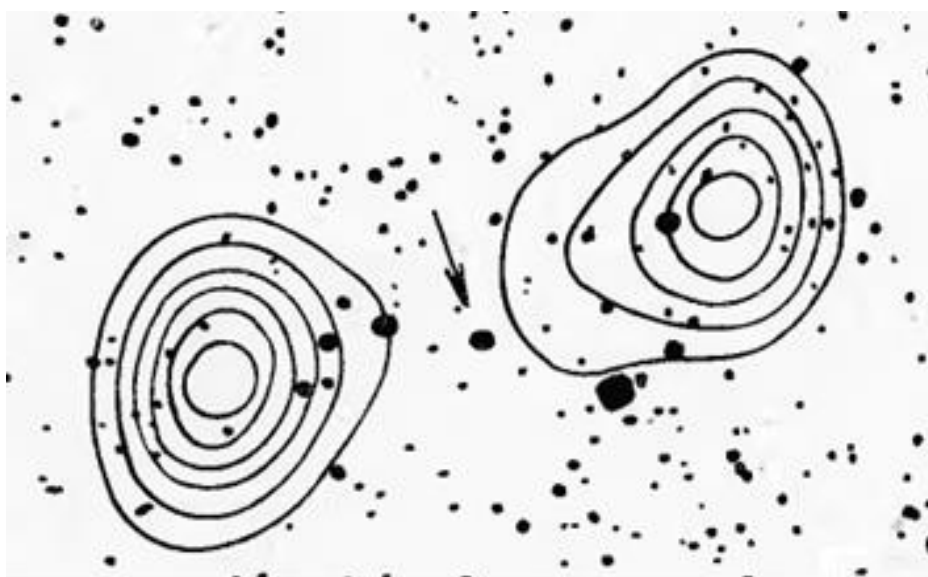


Рис. 3.7. Галактика Лебідь А (вказана стрілкою) на частоті 1400 МГц. Інтервал між ізофотами – $52\,000^\circ \text{ К}$.

4. Схема та результати вимірювання зменшення щільності потоку Кассіопеї А на 2019 рік

Спостереження радіоджерел Кассіопея А і Лебідь А в діапазоні частот $15 \div 70$ МГц проводилися за допомогою двох секцій (субрешіток) радіотелескопу ГУРТ в кореляційному режимі. Фазові центри використуваних секцій розташовані на відстані ≈ 60 м один від одного. Таким чином, утворюється кореляційний інтерферометр з малою базою, що дозволяє подавити внесок галактичного фону, яскравісна температура якого в заданому діапазоні має досить високе значення ($500 \cdot 10^3 \div 10^3$ К).

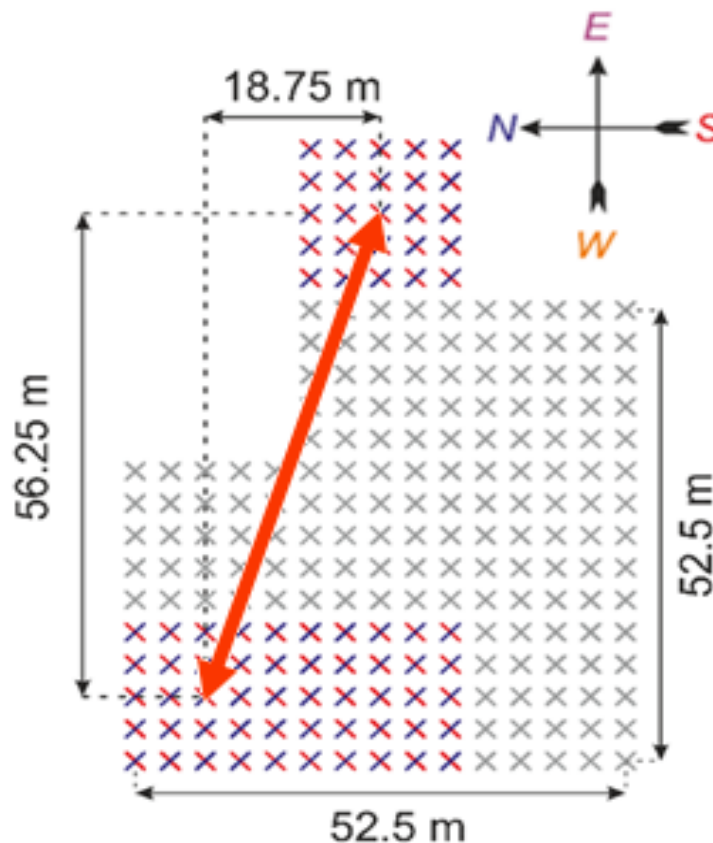


Рис. 4.1. Схема використуваних секцій радіотелескопу ГУРТ

Ефективна площа секції радіотелескопу (5×5 елементів) в напрямку на зеніт (з відхиленням до $\sim 10^\circ$), коли відстань між елементами $\leq \lambda/2$:

$$A_{\text{еф}} = \left(d(n-1) + \frac{\lambda}{2}\right)^2 = b^2, \quad (4.1)$$

де d – відстань між елементами, n – кількість елементів в ряду, λ – довжина хвилі. На частоті 40 МГц маємо

$$A_{\text{эф}} \approx 350 \text{ м}^2. \quad (4.2)$$

Діаграма спрямованості (ДС) субрешітки по потужності визначається як

$$P = (E(u, v))^2 = \left(\frac{\sin\left(\left(\frac{\pi b}{\lambda}\right)(u - u_i)\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda}\right)(u - u_i)} \times \frac{\sin\left(\left(\frac{\pi b}{\lambda}\right)(v - v_i)\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda}\right)(v - v_i)} \right)^2, \quad (4.3)$$

де u та v – направляючі косинуси ($u = \cos\Delta \sin A$, $v = \cos\Delta \cos A$, Δ - кут місця, A - азимут), u_i та v_i - направляючі косинуси, що відповідають напрямку променя на досліджуваний об'єкт.

З формули (4.3) випливає, що на частоті 40 МГц ширина ДС субрешітки по потужності дорівнює

$$\theta \approx 20.4^\circ. \quad (4.4)$$

Експериментальне значення ширини ДС знаходиться з інтерферометричного відгуку радіоджерел Лебідь А і Кассіопея А (рис. 4.2).

Часи проходження ДС на рівні половинної потужності:

$$\Delta t_{\text{Леб}} = (122 \pm 1) \text{ хв.}, \quad \Delta t_{\text{Кас}} = (150 \pm 1) \text{ хв.} \quad (4.5)$$

Ширина ДС в кутових одиницях знаходиться за формулою:

$$\theta \approx (360/(24 \cdot 60)) \Delta t \cos\delta, \quad (4.6)$$

де Δt вимірюється в хвилинах, $\delta_{\text{Леб}} \approx 40^\circ$, $\delta_{\text{Кас}} \approx 58^\circ$. Отже

$$\theta_{\text{Леб}} \approx 23.6^\circ \pm 4^\circ, \quad \theta_{\text{Кас}} \approx 19.8^\circ \pm 4^\circ. \quad (4.7)$$

Отримані значення добре збігаються з розрахунковими.

Відносна чутливість вимірювань щільності потоку радіоджерела визначається як

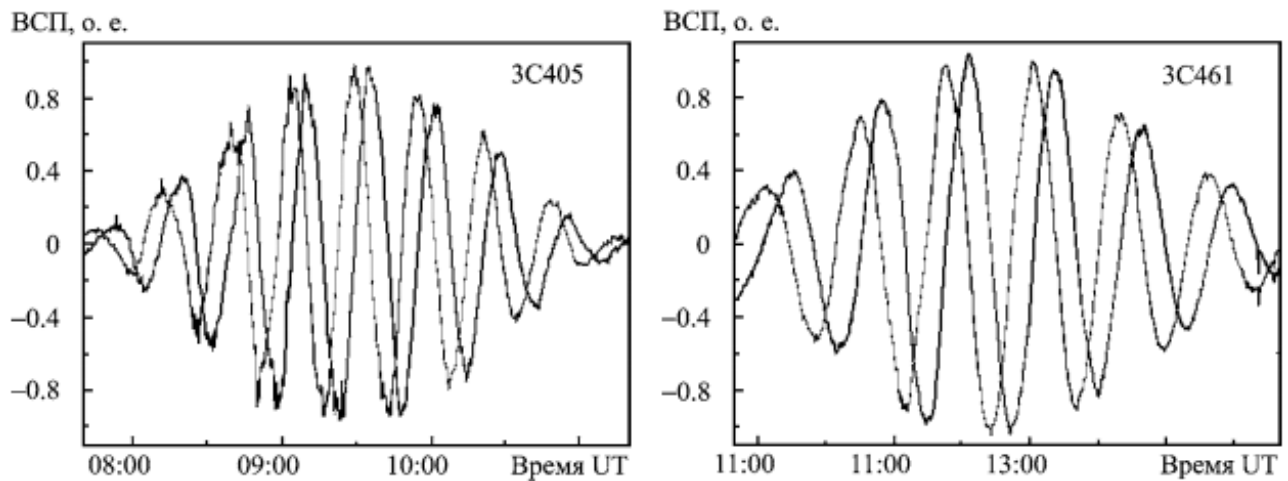


Рис. 4.2. Часові зміни дійсної та уявної складових взаємної спектральної щільності в напрямку на джерела 3C405 (ліва панель) і 3C461 (права панель) на частоті 40 МГц.

$$\frac{\Delta F_{min}}{F_0} = \frac{2kT}{F_0 A_{\text{эф}} \sqrt{\Delta f \cdot \Delta \tau}}, \quad (4.8)$$

де F_0 – щільність потоку радіоджерела, k - постійна Больцмана, $\Delta f = 4$ кГц і $\Delta \tau = 25$ с - частотне і часове розрізнення, T - яскравісна температура фону. На частоті 40 МГц щільність потоку Кассіопеї А становить ~ 27000 Ян, а температура фону в цьому напрямку неба дорівнює близько 15000 К. Звідси випливає, що

$$\frac{\Delta F_{min}}{F_0} \approx 1.4 \cdot 10^{-2}. \quad (4.9)$$

Для інтерферометра ця величина буде менше в $\sqrt{2}$ разів, тобто $\approx 10^{-2}$.

Таким чином, незважаючи на порівняно невелику ефективну площу субрешітки ГУРТ, ряд потужних космічних радіоджерел можна спостерігати з досить високою чутливістю, що говорить про надійність і високу якість одержуваних даних.

Відношення щільностей потоків випромінювання джерел Кассіопея А і Лебідь А пов'язано з відношенням вимірюваних потужностей сигналів в напрямку на дані джерела таким чином:

$$r = K \cdot P_{\text{Кас}} / P_{\text{Леб}}, \quad (4.10)$$

де K - поправковий коефіцієнт, що залежить від кутових розмірів джерел, поглинання радіовипромінювання в іоносфері через відмінності кутів місця джерел, відмінності яскравісної температури галактичного фону поблизу Кассіопеї А і Лебідя А, мерехтінь джерел на неоднорідностях іоносфери і залежності коефіцієнта посилення антени від різних напрямків прийому.

Використання інтерферометра з малою базою дозволяє не враховувати відмінність кутових розмірів джерел, якщо вони істотно менше діаграми спрямованості інтерферометра, а також відмінності в яскравісній температурі галактичного фону поблизу спостережуваних джерел.

Географічне розташування радіотелескопу ГУРТ дозволяє проводити спостереження джерел Кассіопея А і Лебідь А при майже однаковому зенітному куті $\approx 9^\circ$ в момент їх верхніх кульмінацій (рис. 4.3). В цьому випадку параметри фазованої антенної решітки в напрямках на задані джерела можна вважати ідентичними.

Єдиний фактор, який не дозволяє прирівняти поправковий коефіцієнт K до одиниці, - це іоносферні мерехтіння. Для зменшення впливу іоносфери на відношення потоків джерел спостереження проводилися в стабільних умовах і в подальшій обробці використовувалися тільки сеанси, отримані в умовах порівняно незбуреної іоносфери. Крім того, результати усереднювалися по ряду сеансів.

Для визначення відношення потоків джерел в смузі частот 15 - 70 МГц була обрана дискретна сітка частот 15, 20, 25, 30, 35, 38, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 МГц. З сигналів була отримана вибірка значень потоків джерел на кожній частоті в межах обраної сітки.

В ході даної роботи було проаналізовано по 13 файлів кожної з поляризацій, які у вигляді графіків містять реальні та уявні частини амплітуди інтерферометричних відгуків радіоджерел Кассіопеї А та Лебідя А на частотах 12-75 МГц в дні коли проводилися спостереження.

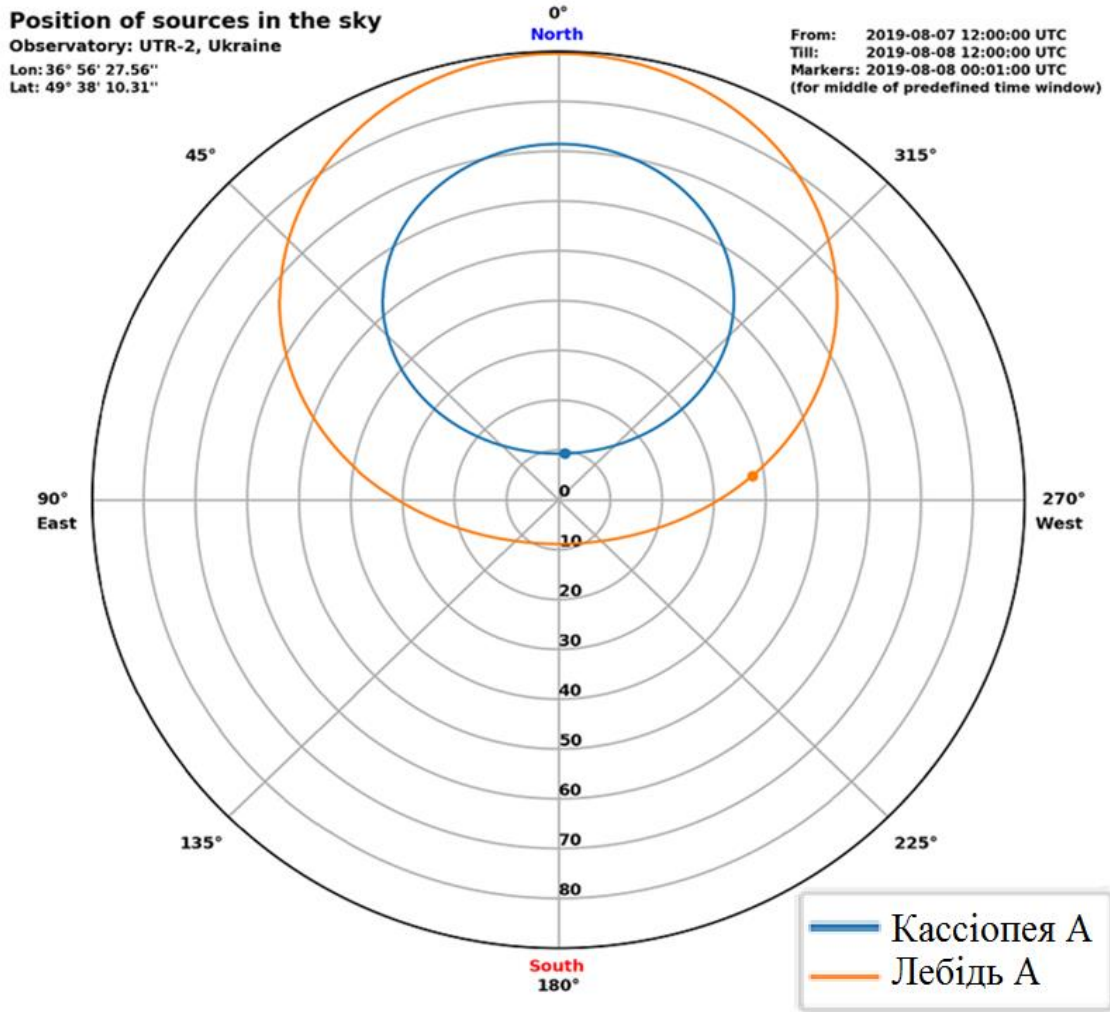


Рис. 4.3. Положення радіоджерел Кассіопея А і Лебідь А на небесній сфері

З усього набору даних шляхом візуалізації були відібрані дати без пікової зміни потоку, як на рис. 4.4. Передбачається, що пікова зміна потоку пов'язана з фокусуванням радіовипромінювання джерела в іоносфері.

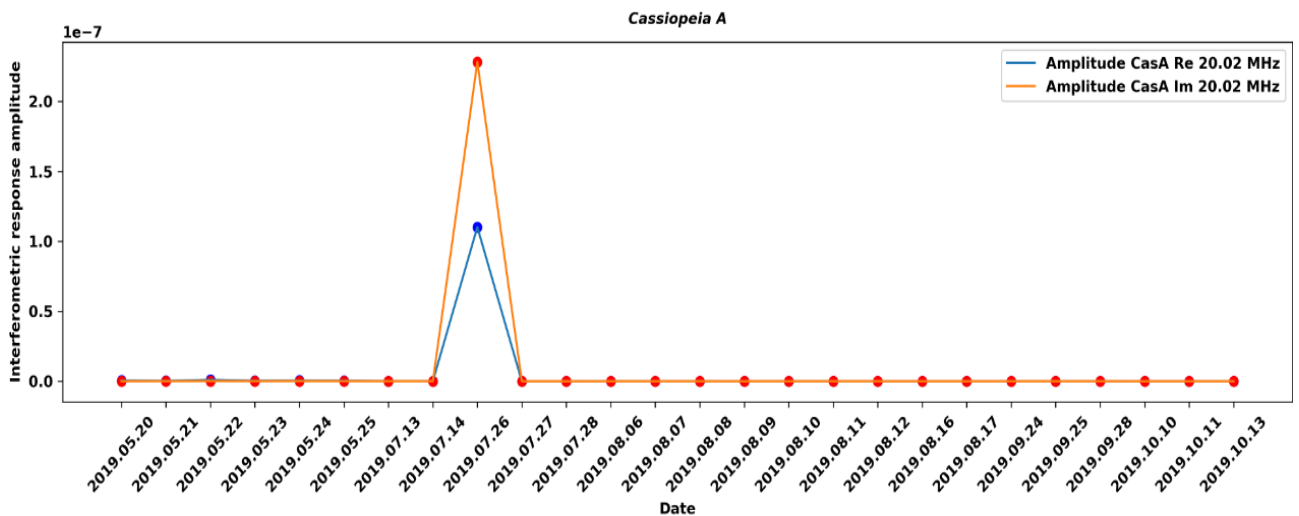


Рис. 4.4. Приклад пікової зміни амплітуди

В результаті вибірка складала 10 для поляризації А і 12 для поляризації Б придатних для обробки днів. Для цих дат вже були визначені відношення потоків Кассіопеї А до Лебідя А і представлені у вигляді графіків (рис. 4.5).

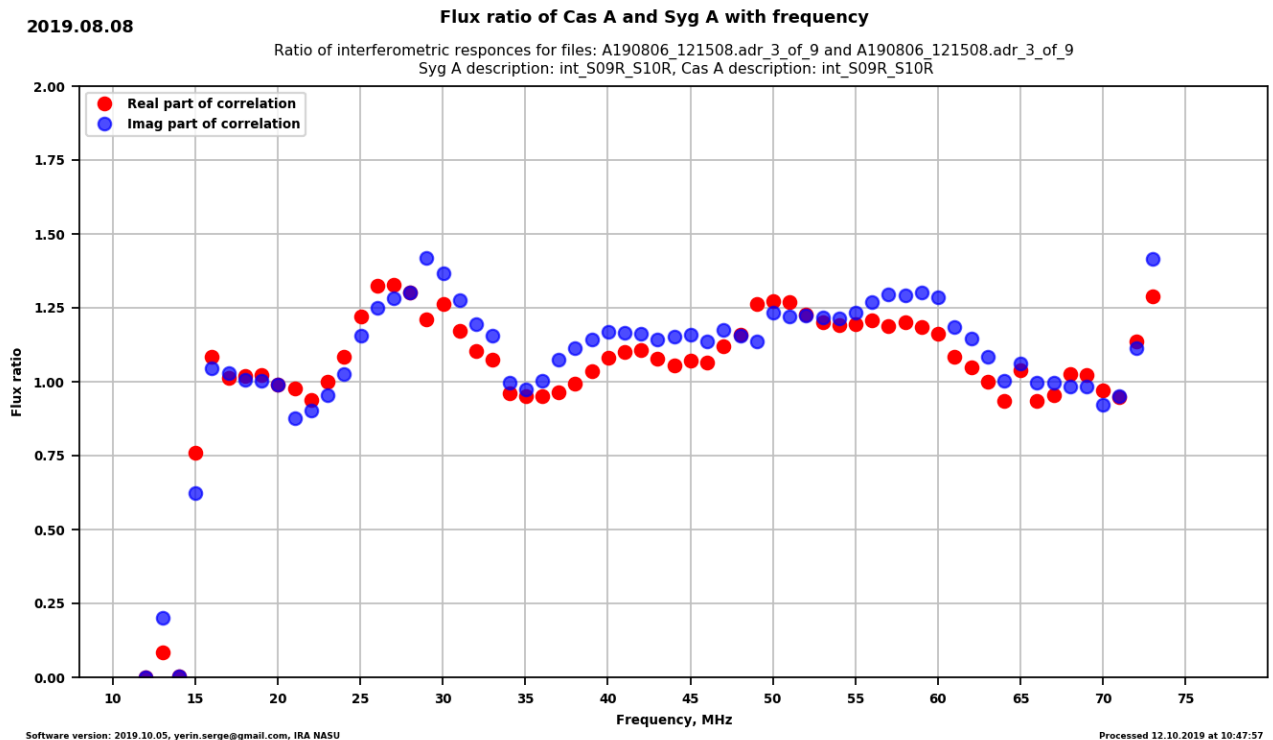


Рис. 4.5. Залежність відношення потоків Кассіопеї А до Лебідя А від частоти

З використанням розрахункових значень щільності потоку Лебідя А, обчислених за формулою (3.3), і експериментальних значень відношень потоків джерел Кассіопеї А і Лебідя А була визначена щільність потоку Кассіопеї А на обраній сітці частот. Для отримання найбільш достовірних результатів, значення відношень потоків джерел на кожній частоті в межах обраної сітки усереднювалися по частоті (рис. 4.6) і по дням (рис. 4.7).

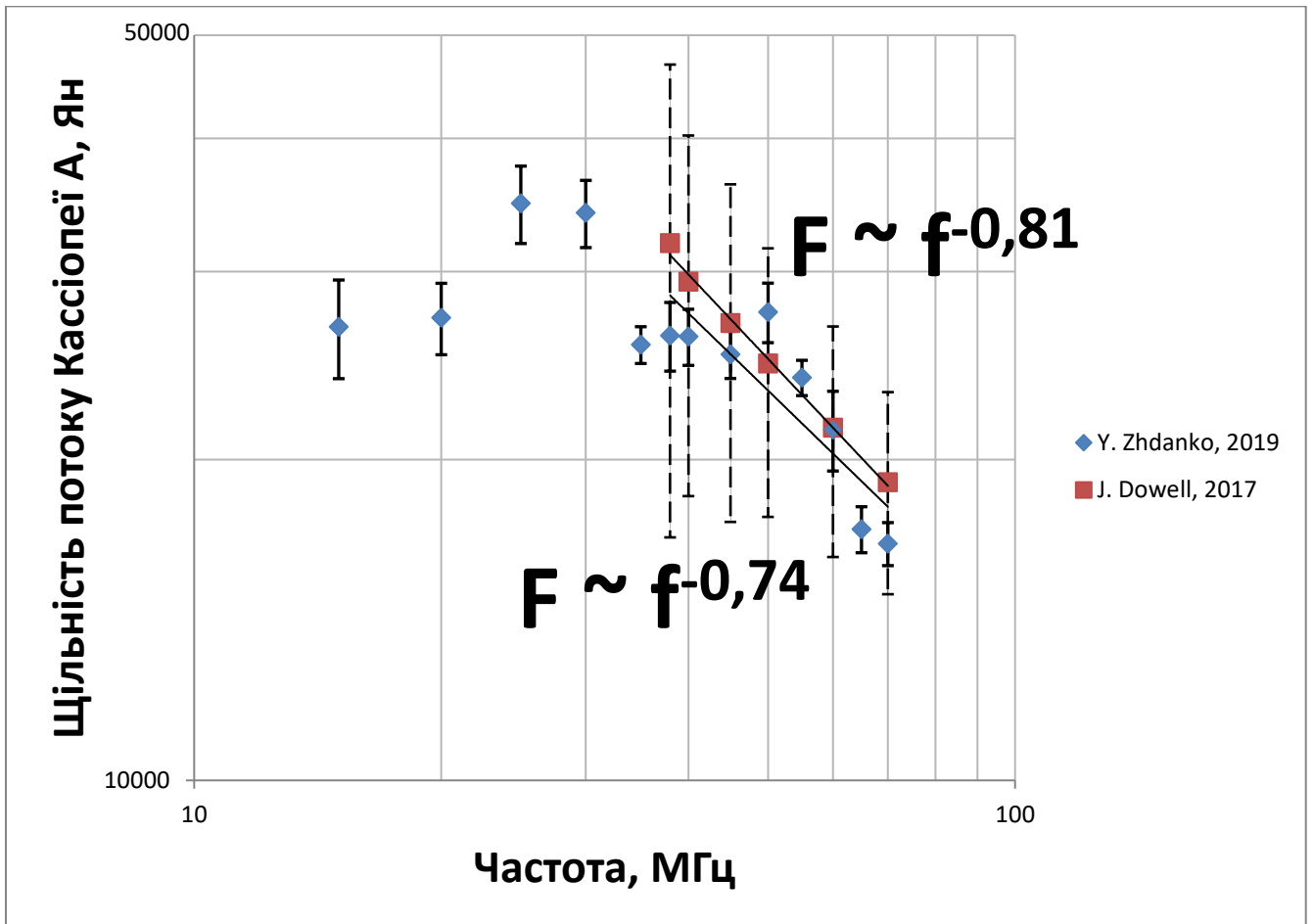


Рис. 4.6. Спектр Кассіопеї А в діапазоні 15-70 МГц (вказаний спектральний індекс для смуг частот 38-70 МГц).

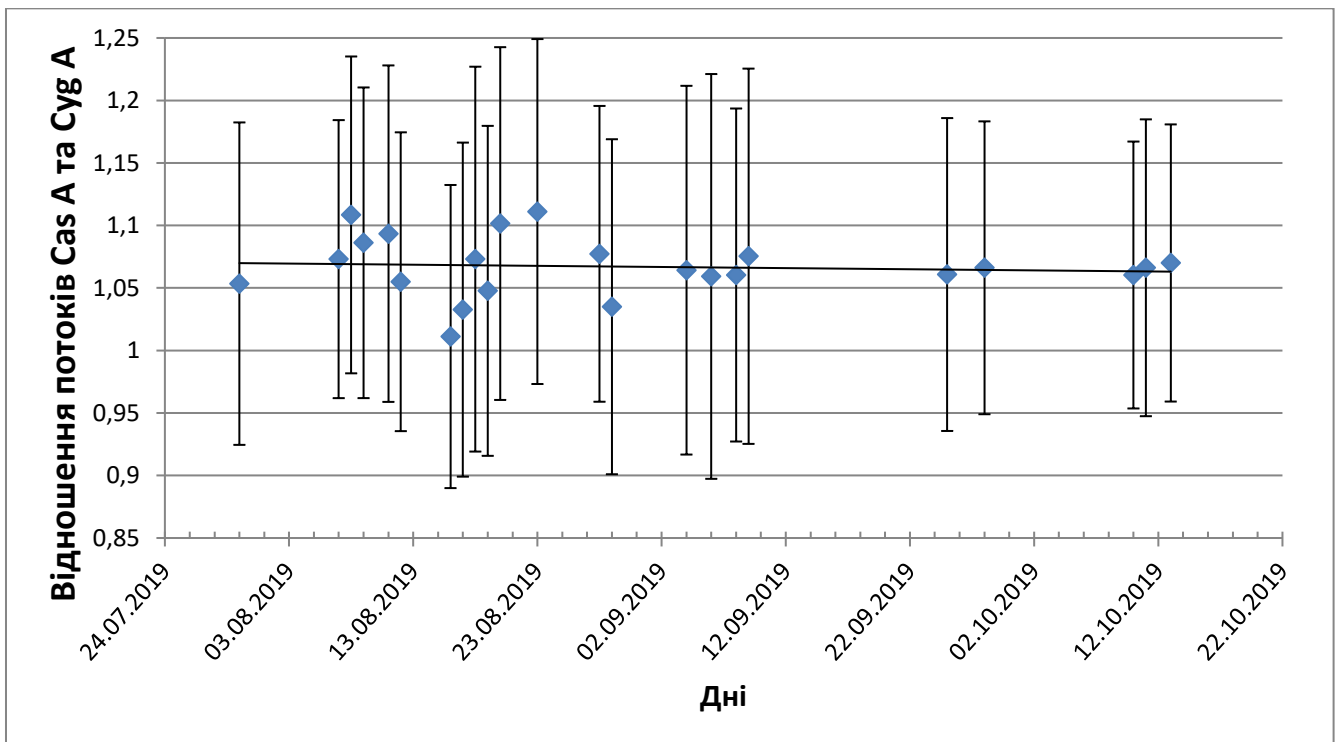


Рис. 4.7. Зміна щільності потоку Кассіопеї А протягом періоду спостережень

Результати вимірювань на частоті 38 МГц були нанесені на графік (рис. 4.8), котрий містить відношення даних джерел за минулі роки. Видно, що отримані дані добре узгоджуються з передбаченим зниженням щільності потоку Кассіопеї-А.

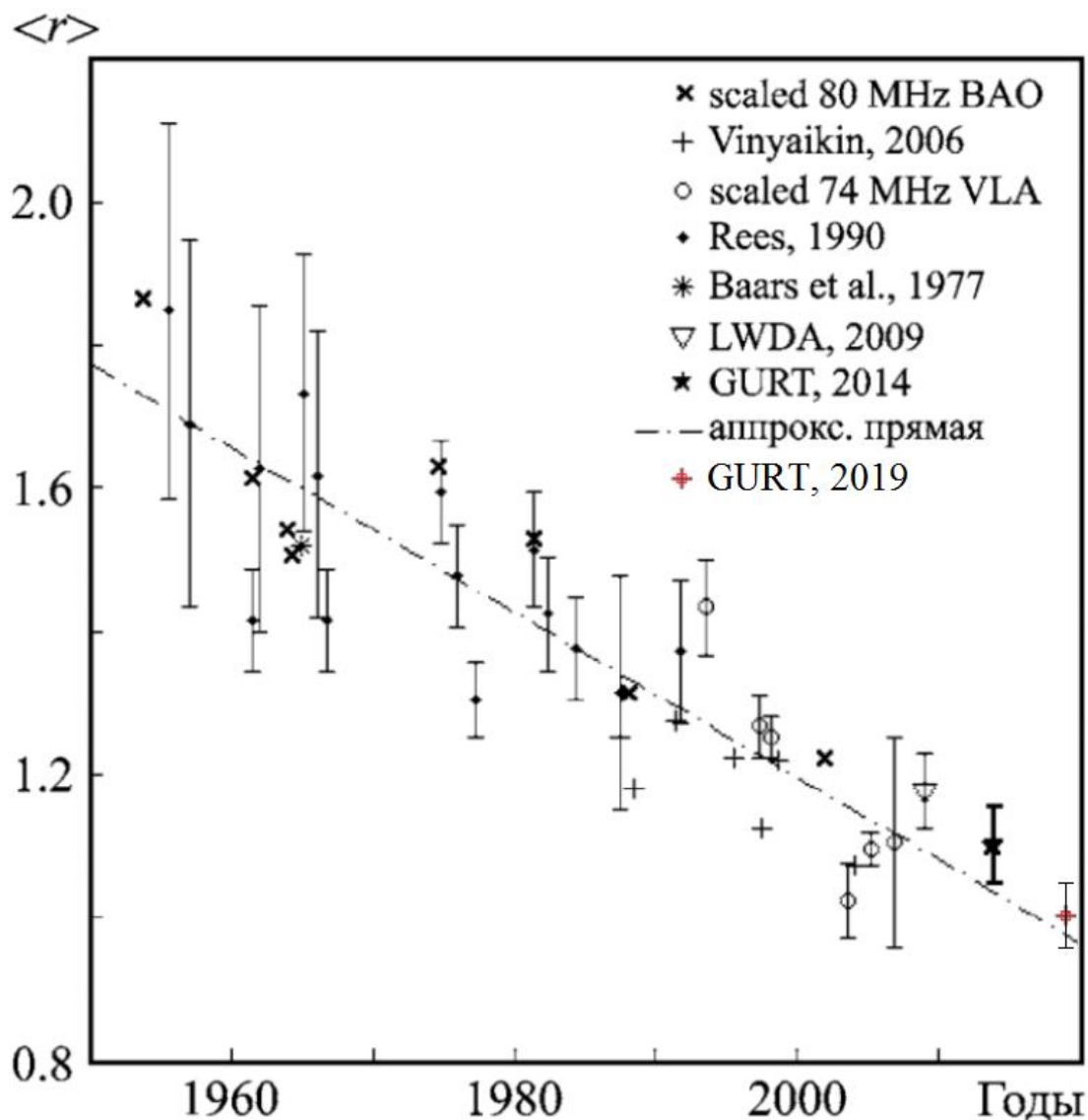


Рис. 4.8. Результати вимірювань відношення щільності потоків $\langle r \rangle$ джерел Кассіопея А і Лебідь А на частоті 38 МГц

Апробація описаної вище методики проводилася на радіотелескопі ГУРТ. У майбутньому планується застосувати цю ж методику для нової антени SELENA, яка буде працювати на зворотному боці Місяця у діапазоні від 1 до 40 МГц.

За формулою (3.2) розраховані річні зменшення щільності потоку для всіх можливих дат спалаху наднової для спектральних індексів $\alpha = 0.7; 0.8$.

Спектральний індекс	Рік спалаху наднової				
	1658 ± 3	1671.3 ± 0.9	1662 ± 27	1672 ± 18	1681 ± 19
$\alpha = 0.7$	1.33±0.01%	1.38±0.0036%	1.35±0.1%	1.39±0.072%	1.42±0.08%
$\alpha = 0.8$	1.44±0.012%	1.5±0.0039%	1.47±0.11%	1.5±0.078%	1.54±0.087%

Таб. 4.1. Зменшення щільності потоку за рік для можливих дат спалаху

За наступною формулою була обчислена швидкість зменшення щільності потоку за період 1965-2019 рр.:

$$F_{2019} = F_{1965} \left(1 - \frac{p}{100}\right)^n, \quad (4.11)$$

де F_{2019} , F_{1965} - щільність потоку радіовипромінювання на епоху 2019 р. та 1965 р. відповідно, p - річне зменшення щільності потоку у відсотках, n - період спостережень у роках.

Частота, МГц	F_{1965} , Ян	F_{2019} , Ян	Зменшення F_ν за рік, %
14.7	66000	28220	1.56±0.45
16.7	61000	28660	1.39±0.48
20	66000	27170	1.63±0.43
22	52400	30270	1.01±0.28
25	59000	35240	0.95±0.42
26.3	47000	33620	0.62±0.25
38	37200	26140	0.65±0.21

Таб. 4.2. Залежність швидкості зменшення щільності потоку радіовипромінювання Кассіопеї А від частоти

5. Висновки

1. В ході даної роботи був отриманий спектр радіовипромінювання ЗСН Кассіопея А на епоху 2019 р. Було встановлено, що щільність потоку зменшується швидше на більш низьких частотах, ніж на більш високих. Річне зменшення щільності потоку за період з 1965-2019 рр. у смузі частот 15-38 МГц у середньому складає $1.12 \pm 0.47\%$. На частоті 38 МГц це зменшення дорівнює $0.65 \pm 0.21\%$.

2. Був визначений спектральний індекс в інтервалі частот 38-70 МГц, який згідно з теорією залишків спалахів наднових повинен зменшуватися з часом, що і можна побачити на рис. 4.6.

3. За усередненими даними відношень щільностей потоків джерел Лебідь А та Кассіопея А у всьому частотному діапазоні, спостерігається зменшення щільності потоку Кассіопеї протягом 2.5 місяців.

4. Наведена таблиця розрахункових значень швидкості зменшення потоку радіовипромінювання Кассіопеї А для можливих дат спалаху при різних спектральних індексах, а також її залежність від частоти.

5. Представлена оцінка ефективних площ антен SELENA і космічних місій. З неї слідує, що ефективна площа антени SELENA вище ефективних площ супутників космічних місій у всьому розглянутому діапазоні частот. Таким чином, застосування навіть однієї антени SELENA за межами атмосфери Землі збільшить чутливість радіоастрономічних спостережень в порівнянні з нині існуючими на космічних апаратах.

6. Список літератури

1. https://wind.nasa.gov/inst_info.php
2. <https://stereo.gsfc.nasa.gov/orbit.shtml>
3. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/stereo>
4. https://swaves.gsfc.nasa.gov/swaves_instr.html
5. <https://spaceflight101.com/juno/instrument-overview/>
6. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/psp>

