

Кафедра фізико-математичної освіти та інформатики

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Наукова спадщина Йосипа Шкловського

Виконав:

Смоленський Микола Миколайович

Спеціальність: 014 Середня освіта

Предметна спеціальність: 014.08 Середня освіта
(Фізика)

Освітня програма: «Середня освіта (Фізика та
інформатика)»

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Шелудько Вадим Іванович

Допущено до захисту

"__" _____ 20__ р.

Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)

Дата захисту: «__» _____ 20__ р.

Оцінка _____

Підписи членів ЕК:

Зміст

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД	5
1.1) Радіоастрономія як розділ науки	5
1.2) Методи радіоастрономії.....	8
1.3) Астрономічні джерела радіовипромінювання.....	16
РОЗДІЛ 2. НАУКОВА СПАДЩИНА ЙОСИПА ШКЛОВСЬКОГО	24
2.1) Огляд наукової спадщини Йосипа Шкловського.....	24
2.2) Вплив на розвиток радіоастрономії та суміжних галузей.....	53
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

ВСТУП

Наука відіграє надзвичайно важливу роль для людства. Дослідження та відкриття мають значний вплив на розвиток як науки окремо, так і на все людство – за рахунок розвитку нових технологій, вирішення глобальних проблем. Наука допомагає зрозуміти природу, розвиток Всесвіту, кліматичні зміни, хімічні реакції та багато іншого. Різноманітні наукові дисципліни мають вплив на певні аспекти науки і повсякденного життя, але їх вклад не треба недооцінювати. В числі таких можна згадати астрономію та радіоастрономію.

Астрономія вивчає небесні тіла за допомогою оптичних телескопів та інших приладів. Вона досліджує рух, властивості, склад і походження небесних об'єктів, а також розвиває теорії та моделі, щоб пояснити природу Всесвіту. Астрономи вивчають зорі, планети, галактики, чорні діри, темну матерію та інші астрономічні тіла та явища. Радіоастрономія є галуззю астрономії, яка вивчає електромагнітне випромінювання космічних об'єктів за допомогою радіотелескопів. Дослідження випромінювання дозволяє зрозуміти різні аспекти космосу, такі як галактичні структури, активні ядра галактик, пульсари, радіоастрономічні об'єкти, а також досліджувати космічне випромінювання та фонове випромінювання.

Серед видатних астрофізиків варто згадати Йосипа Шкловського – українського вченого, чиї дослідження та відкриття в радіоастрономії мають значний науковий вплив. Основні досягнення Шкловського пов'язані з вивченням космічних об'єктів, зокрема галактик, квазарів і пульсарів, а також з розвитком радіоастрономічних методів та інструментів. Поза науковими дослідженнями, Шкловський відіграв важливу роль в популяризації астрономії та науки серед широкої публіки. Він був автором численних публікацій, в тому числі книг, які привертати увагу до небесних явищ та важливості наукового дослідження космосу. Наукова спадщина вченого включає наукові статті, книги, відкриття, теоретичні роботи та вплив на

розвиток астрономії. Його праці й дослідження надали важливий внесок у розуміння Всесвіту та розвиток радіоастрономії як наукової галузі.

Тема роботи – наукова спадщина Йосипа Шкловського.

Мета роботи – висвітлити Йосипа Шкловського як видатного вченого-астрофізика, розглянути його наукові досягнення та відкриття, їх роль у розвитку науки.

Завдання роботи:

- вивчення життя та наукової діяльності Шкловського;
- розгляд його основних відкриттів та розроблених теорій;
- вивчення їх впливу на подальший розвиток радіоастрономії та фізики в цілому;
- виявлення потенційних напрямків подальших досліджень на основі наукової спадщини Шкловського.

Актуальність – дослідження наукової спадщини Йосипа Шкловського є актуальною темою. Його діяльність мала значний науковий вплив, а також зіграла роль в популяризації астрономії та науки в цілому серед широкої публіки. Також варто зазначити, що дослідження наукової спадщини видатних вчених може надихнути молодих дослідників та вчених на подальшу кар'єру в науці. А так як розвиток науки – розвиток суспільства в цілому, від зацікавленості молодого покоління в науковій діяльності залежить майбутнє.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1) Радіоастрономія як розділ науки

Радіоастрономія – це розділ астрономії, який вивчає небесні об'єкти за їх електромагнітним випромінюванням. Спостереження космосу оптичним способом не надає вичерпних відповідей щодо виникаючих в науці питань. У космосі також виявлено низку різноманітних джерел радіовипромінювання, серед яких – як і доступні для оптичного сприйняття зірки й галактики, так і абсолютно нові класи об'єктів (радіогалактики, квазари, пульсари тощо). Наприклад, відкриття космічного мікрохвильового фонового випромінювання (яке вважається доказом теорії Великого вибуху), було зроблено за допомогою радіоастрономії.

Радіоастрономія проводиться за допомогою великих радіоантен, так званих радіотелескопів, які використовуються або поодиноці, або з декількома пов'язаними між собою телескопами, що використовують методи радіоінтерферометрії та синтезу апертури. Використання інтерферометрії дозволяє радіоастрономії досягти високої кутової роздільної здатності, оскільки роздільна здатність інтерферометра визначається відстанню між його компонентами, а не розміром компонентів.

Ідеї закладені в радіоастрономію далеко не нові. Фізики припускали, що можливо фіксувати радіохвилі, що надходять з астрономічних джерел. У 1860-х роках рівняння Максвелла показали, що електромагнітне випромінювання пов'язане з електрикою і магнетизмом може існувати на будь-якій довжині хвилі. Було зроблено кілька спроб виявити радіовипромінювання Сонця (наприклад, експеримент німецьких астрофізиків Йоганнеса Вільсінга і Юліуса Шейнера в 1896 році, або апарат сантиметрових хвиль, створений Олівером Лоджем у 1897 році).

На жаль, ці експерименти не змогли виявити випромінювання через технічні обмеження наявних на той час приладів. Також, у 1902 році відбулося відкриття іоносфери. Цей шар атмосфери особливий тим, що відбиває радіовипромінювання назад у космос, створюючи складності зі спостереженням космічних радіохвиль [1].

Відкриття першого астрономічного джерела радіовипромінювання відбулося випадково на початку 1930-х років. Карл Янський, радіоінженер компанії «Bell Telephone Laboratories» (нині відома як Bell Labs – Лабораторії Белла), отримав завдання дослідити радіоперешкоди, які могли б заважати короткохвильовій передачі сигналу через Атлантичний океан.

Використовуючи велику спрямовану антену, Янський помітив, що його аналогова система запису продовжує фіксувати постійно повторюваний сигнал або "шипіння" невідомого походження. Невідомий сигнал досягав піку приблизно кожні 24 години, і Янський спочатку запідозрив, що джерелом перешкод було Сонце, яке перетинало поле зору його спрямованої антени [2]. Однак подальший аналіз показав, що сигнал досягав піку не кожні 24 години, а трохи частіше – кожні 23 години і 56 хвилин.

Янський обговорив загадкове явища зі знайомим астрофізиком Альбертом Скеллеттом, який вказав, що зафіксований відрізок часу є тривалістю зоряної доби – проміжку часу між двома послідовними кульмінаціями зорі. Янський порівняв свої дані з астрономічними картами і дійшов висновку, що отриманий сигнал досягав піку, коли його антена була спрямована на найщільнішу частину Чумацького Шляху в сузір'ї Стрільця [3].

У жовтні 1933 року відкриття Янського було опубліковано в статті під назвою "Електричні перешкоди позаземного походження" [4] і дало початок галузі радіоастрономії. У своїй статті Янський дійшов висновку, що оскільки зірки не генерують порівняно багато радіошуму, радіоперешкоди позаземного походження можуть створюватися міжзоряним газом, зокрема "тепловим збудженням заряджених частинок" [5].

Науковий вклад Янського дав натхнення іншим вченим на проведення власних досліджень. Наприклад, американський радіолюбитель Гроут Ребер після ознайомлення зі статтею Янського побудував параболічний радіотелескоп діаметром 9 метрів на своєму задньому дворі в 1937 році. Він почав з повторення досліду Янського, а згодом провів перше дослідження неба в радіодіапазоні [6].

На цьому все не закінчилося. 27 лютого 1942 року Джеймс Стенлі Хей, науковець та радіоінженер британської армії, вперше виявив радіохвилі, випромінювані Сонцем [7]. В той день науковець отримав повідомлення з різних куточків Британії про сильні шумові перешкоди, що заважали роботі зенітних радарів. Зрозумівши, що напрямок максимальних перешкод збігається з рухом Сонця, він звернувся до Королівської обсерваторії в Грінвічі і виявив, що дуже активна сонячна пляма перетинає сонячний диск. Він дійшов висновку, що область сонячної плями, яка, як вважалося, випромінює потоки енергійних іонів і електронів у магнітних полях, може бути джерелом хвильового випромінювання.

Результати роботи вченого не могли бути опубліковані до кінця війни. З 1945 по 1947 рік Хей використовував радари AORG у парку Річмонд для подальшого дослідження своїх радіоастрономічних відкриттів воєнного часу. Радарна установка в парку Річмонд фактично стала першою радіообсерваторією в Британії [8].

Навколо вченого зібралася група зацікавлених дослідників. У 1946 році Сонце знову стає активним, і група підтвердила попередні дані про те, що джерелом викидів є сонячні плями і сонячні спалахи. У 1945 і 1946 роках вони підтвердили радіолокаційні відлуння від метеорів і розробили методи фіксування випромінювання метеорного потоку, відкривши таким чином перший денний метеорний потік.

Тоді ж група склала карту інтенсивності космічного радіошуму в небі. У лютому 1946 року вони виявили потужне джерело в сузір'ї Лебедя. Хей проаналізував отримуваний сигнал і припустив, що його джерелом є

радіозірка. Пізніше було виявлено, що це була не радіозірка, а ціла радіогалактика Cygnus A [9].

Британський радіофізик Джон Реткліфф разом з іншими членами Дослідницького центру телекомунікацій створив радіофізичну групу у Кембриджському університеті, в якій спостерігали і вивчали радіохвильове випромінювання від Сонця. Ці ранні дослідження незабаром переросли у спостереження за іншими небесними джерелами радіовипромінювання, а методи інтерферометрії були вперше застосовані для ізоляції кутового джерела виявлених випромінювань.

Мартін Райл та Ентоні Хьюїш з Кавендішської астрофізичної групи розробили техніку синтезу апертури, що обертається навколо Землі. У 1950-х роках група радіоастрономії в Кембриджі заснувала Радіоастрономічну обсерваторію Малларда поблизу Кембриджа. Вони використовували Кембриджський інтерферометр для картографування радіонеба, створивши Другий (2C) і Третій (3C) Кембриджські каталоги радіоджерел [10]. Наукова галузь радіоастрономії поступово розвивалася і набула того вигляду, який можна побачити нині.

Отже, радіоастрономія вивчає небесні об'єкти за їх електромагнітним випромінюванням. Спостереження космосу оптичним способом не надає вичерпних відповідей щодо виникаючих в науці питань. Радіоастрономія проводиться за допомогою великих радіоантен (радіотелескопів), які використовуються для спостереження космічних джерел радіовипромінювання.

1.2) Методи радіоастрономії

Радіоастрономія застосовує різні методи для спостереження космічних об'єктів у радіоспектрі. Вибір інструменту залежить від потужності сигналу та бажаного рівня точності. Інструменти можуть бути просто спрямовані на космічне радіоджерело в цілях збору та подальшого аналізу його

випромінювання. А щоб отримати інформацію більш детально і точно, можна зробити декілька знімків, що накладаються один на одного, і об'єднати їх в одне зображення. Більша кількість зібраного матеріалу дасть кращу уяву про досліджуваний об'єкт.

Радіоспостереження з поверхні Землі обмежені довжинами хвиль, які можуть проходити крізь атмосферу. Через наявність іоносфери, певні частоти хвиль відбиваються назад у космос і не можуть бути зафіксовані спостерігачем на рівні землі.

Є й інші чинники. Наприклад, водяна пара заважає радіоастрономії на високих частотах. Це призвело до побудови радіообсерваторій, які проводять спостереження на дуже високих і сухих ділянках, щоб звести до мінімуму вміст водяної пари в зоні прямої видимості. Або радіочастотні перешкоди за рахунок широкого використання пристроїв зв'язку в сучасному світі – радіо, телебачення, радарів та інших електронних пристроїв. Через це багато радіообсерваторій будують у віддалених місцях, де можна мінімувати спотворення отриманого сигналу.

Для виявлення радіохвиль, що надходять від астрономічних радіоджерел використовують радіотелескоп – інструмент у вигляді спеціалізованої антени і радіоприймача (радіометра).

Радіотелескопи є основним інструментом спостереження в радіоастрономії і використовуються щоб дослідити радіочастотну частину електромагнітного спектра, що випромінюється астрономічними об'єктами (так само як оптичні телескопи є основним інструментом спостереження в традиційній оптичній астрономії, яка вивчає світлову частину спектра, що виходить від астрономічних об'єктів).

На відміну від оптичних телескопів, радіотелескопи можуть використовуватися за будь-якої погоди. Вони можуть працювати вдень і вночі (оскільки Сонце не випромінює багато світла в радіочастотному

діапазоні) і продовжують збирати дані під час непогоди – крізь хмари, дощ, хуртовини тощо [11].

Оскільки астрономічні джерела радіовипромінювання, такі як планети, зірки, туманності і галактики, знаходяться дуже далеко, радіохвилі, що надходять від них, надзвичайно слабкі, тому радіотелескопи потребують дуже великих антен, щоб зібрати достатньо радіоенергії для їх вивчення, і надзвичайно чутливого приймального обладнання.

Діапазон частот в електромагнітному спектрі, який складає радіоспектр, дуже великий. Як наслідок, типи антен, які використовуються в радіотелескопах, широко варіюються за конструкцією та розміром. На частоті хвиль 10-100 МГц вони, в більшості випадків, являють собою спрямовані антенні решітки або великі стаціонарні рефлектори з рухомими фокусними точками.

На коротших довжинах хвиль переважають параболічні антени. Кутова роздільна здатність «тарілки» визначається відношенням діаметра тарілки до довжини хвилі радіохвиль, що спостерігаються. Це визначає діаметр тарілки, який потрібен радіотелескопу для отримання необхідної роздільної здатності. Радіотелескопи, які працюють на частоті хвиль 0,1-1 ГГц, зазвичай мають діаметр 100 метрів і більше. Ті, що працюють на частотах понад 1 ГГц, мають розмір до 90 метрів у діаметрі.

Радіохвилі збираються металевим увігнутих дзеркалом, у фокусі якого розміщується радіометр. Вимоги до характеристик радіометра досить великі – потрібні висока чутливість (для реєстрації навіть найслабшого потоку радіовипромінювання) і висока роздільна здатність (для детального спостереження досліджуваних астрономічних об'єктів). Радіотелескопи можуть використовуватися окремо або об'єднуватися в єдину систему, що складається з великої кількості радіотелескопів [12].

Зростаюче використання радіочастот для зв'язку робить астрономічні спостереження дедалі складнішими. Наразі національні уряди виділяють

смуги спектру для використання будь-ким за умови дотримання певних технічних обмежень, насамперед, обмеження на загальну потужність передачі [13].

Радіотелескопи займаються спостереженням за такими об'єктами, як пульсари та віддалені радіогалактики на відстані приблизно до половини видимої сфери нашого Всесвіту. Використання радіочастот для зв'язку створює «забруднення» з точки зору астрономів, в кращому випадку створюючи шум і спотворюючи результати вимірювань, а в гіршому – повністю засліплюючи астрономічну спільноту для певних видів спостережень (в особливості об'єктів, від яких надходить дуже слабкий сигнал). Оскільки для зв'язку використовується все більше частот, радіоастрономічні спостереження стають дедалі складнішими.

Переговори щодо захисту частин радіоспектра, найбільш корисних для спостереження Всесвіту, регулярно ведуться міжнародною астрономічною спільнотою і координуються Науковим комітетом з розподілу частот для радіоастрономії та космічних наук [14].

Складність досягнення високої роздільної здатності за допомогою одиночних радіотелескопів привела до виникнення радіоінтерферометрії – об'єднання сигналів від кількох антен таким чином, щоб вони імітували більшу антену, з метою досягнення більшої роздільної здатності.

Перше використання радіоінтерферометра для астрономічних спостережень було здійснено Пейн-Скоттом, Поусі і Ліндсі МакКріді 26 січня 1946 року з використанням однієї конвертованої радіолокаційної антени (широкосмугової решітки) на частоті 200 МГц поблизу Сіднея, Австралія [15]. Ця група використовувала принцип інтерферометра на морській скелі, в якому антена спостерігала Сонце на сході з інтерференцією, що виникає від прямого випромінювання Сонця і відбитого випромінювання від моря.

Кембриджська група Райла і Вонберга вперше спостерігала Сонце на частоті 175 МГц в середині липня 1946 року за допомогою інтерферометра Майкельсона, що складався з двох радіоантен з відстанями від кількох десятків метрів до 240 метрів [16]. Вони показали, що радіовипромінювання мало розмір менше 10 дугових хвилин, а також виявили кругову поляризацію у спалахах типу I.

Сучасні радіоінтерферометри складаються з широко рознесених радіотелескопів, що спостерігають один і той самий об'єкт і з'єднані між собою за допомогою коаксіального кабелю, оптичного волокна або іншого типу лінії передачі. Це не тільки збільшує загальний зібраний сигнал, але й може бути використано в процесі, який називається "апертурний синтез" для значного підвищення роздільної здатності.

Апертурний синтез працює шляхом накладання сигнальних хвиль від різних телескопів (хвилі, які збігаються з однаковою фазою, додаються одна до одної; тоді як дві хвилі з протилежними фазами компенсують одна одну). Таким чином створюється комбінований телескоп, розмір якого дорівнює розміру найвіддаленіших одна від одної антен у масиві [17].

Для отримання високоякісного зображення необхідна велика кількість базових ліній між радіотелескопами. Базова лінія у радіоастрономії – це вектор, що з'єднує два радіотелескопи, і використовується в інтерферометрії для визначення смугової швидкості джерела в номінальному "фазовому центрі" спостереження. Близько розташовані пари антен добре вимірюють великомасштабні структури в джерелі, тоді як довгі базові лінії мають кращу роздільну здатність і розрізняють тонкі структури [18]. Наприклад, Дуже Великий Масив (VLA) має 27 телескопів, які дають 351 незалежну базову лінію одночасно [19].

Радіоінтерферометри також були використані для отримання детальних зображень анізотропії та поляризації космічного мікрохвильового фону. Таке застосування має певні переваги. Наприклад, безпосередній вимір спектру потужності (функція радіочастоти), на відміну від вимірювання

диференціальної або повної потужності. Використання інтерферометрів є досить стабільним, оскільки виявляються лише корельовані сигнали; в той час як вимірюванням повної та диференціальної потужності притаманні систематичні проблеми. Також є можливість безперервного покриття спектра потужності з кутовою спектральною роздільною здатністю [20]. Сукупність перелічених переваг сприяє використанню радіоінтерферометрів.

З розвитком технологій відбулося і підвищення характеристик техніки, що дозволило об'єднувати радіотелескопи на великих (міжконтинентальних) відстанях для проведення «радіоінтерферометрії з наддовгою базою» (VLBI). Великі відстані між телескопами дозволяють досягти дуже високої кутової роздільної здатності. Використовуючи цей метод, можна створити масив антен, який працює як одна велика радіоантена планетарних розмірів.

Міжконтинентальні відстані не дозволяють швидкий зв'язок. Замість цього, дані отримані з кожної антени зберігаються для подальшого аналізу (з інформацією про час запису, який фіксується за допомогою атомного годинника – звичайний годинник не дає достатньої точності). Пізніше ці дані співвідносяться з даними інших антен, записаними аналогічним чином, для отримання результуючого радіозображення.

Коли метод тільки почав застосовуватися, запис даних на постійний носій був єдиним способом об'єднати інформацію, отриману окремими радіотелескопами, для подальшого використання. Але прогрес не стоїть на місці: сучасний світ об'єднаний мережею Інтернет, яка дозволяє швидкий зв'язок майже в будь-якому місці земної кулі. А технологічні характеристики сучасних комп'ютерів дозволяють проводити всі необхідні розрахунки в реальному часі. Даний підхід (названий e-VLBI) щороку виконує все більшу кількість наукових проєктів.

Кожна антена буде знаходитися на різній відстані від джерела радіосигналу, і, як і у випадку радіоінтерферометра з короткою базовою лінією, затримки, спричинені додатковою відстанню до однієї антени, мають

бути штучно додані до сигналів, отриманих на кожную з інших антен. Необхідну затримку можна розрахувати. Якщо положення антен не відоме з достатньою точністю, необхідно виконувати точне регулювання затримок до тих пір, поки не будуть виявлені інтерференційні смуги. Якщо сигнал від певної антени приймається за опорний, неточності в затримці призведуть до помилок у фазах сигналів від наступних антен. В результаті цих помилок фаза комплексної видимості (просторовий частотний спектр розподілу яскравості спостережуваного об'єкта [21]) не може бути виміряна.

Фаза комплексної видимості залежить від симетрії розподілу яскравості джерела. Будь-який розподіл яскравості можна записати як суму симетричної та антисиметричної складових. Симетрична складова розподілу яскравості впливає лише на реальну частину комплексної видимості, тоді як антисиметрична складова впливає лише на уявну частину. Оскільки фаза кожного вимірювання комплексної видимості не може бути визначена за допомогою інтерферометра з дуже довгою базовою лінією, симетрія відповідного внеску в розподіл яскравості джерела невідома [22].

Для отримання інформації про фази видимості в інтерферометрії, коли присутні помилки затримки, спостерігають так звану «фазу змикання» – спостережувана величина в астрономічній інтерферометрії зображень, яка дозволяє використовувати інтерферометрію з дуже довгими базовими лініями. Вона лежить в основі підходу самокалібрування до інтерферометричних зображень.

Даний підхід запропонував англійський фізик Роджер Дженнісон [23] в 50-х роках минулого століття. Перші дослідження відбувалися на оптичних довжинах хвиль, але згодом були використані і для радіоінтерферометрії. Підхід вимагає використовувати щонайменше три антени для досягнення результату, і був використаний для перших VLBI вимірювань. Модифікована форма підходу ("самокалібрування") використовується і сьогодні [24].

Радіоінтерферометрія з наддовгою базою використовується для отримання зображень віддалених космічних радіоджерел, відстеження

космічних апаратів, а також для застосування в астрометрії. Однак, оскільки метод вимірює різницю в часі між приходом радіохвиль на окремі антени, він також може бути використаний для вивчення Землі – дослідження її обертання, задач геодезії (наприклад, вимірювання рухів тектонічних плит з точністю до міліметрів [25]). Використання радіоінтерферометрії з наддовгою базою таким чином вимагає великої кількості розрахунків та замірів різниці в часі від космічних об'єктів, які спостерігаються за допомогою мережі радіоантен протягом певного періоду часу.

Найвідоміші мережі VLBI, що працюють сьогодні – Антенний масив дуже великої бази (VLBA [26], знаходиться в Північній Америці) і Європейська РНДБ-мережа (EVN [27]).

Отже, радіоастрономія застосовує різні методи для спостереження космічних об'єктів у радіоспектрі. Це залежить від потужності сигналу та бажаного рівня точності. Основним інструментом вважається радіотелескоп – інструмент у вигляді спеціалізованої антени і радіоприймача (радіометра), який використовуються для дослідження радіочастотної частини електромагнітного спектра, що випромінюється астрономічними об'єктами. Складність досягнення високої роздільної здатності за допомогою окремих радіотелескопів привела до виникнення радіоінтерферометрії – об'єднання сигналів від кількох антен таким чином, щоб вони імітували більшу антену, з метою досягнення більшої роздільної здатності. З розвитком технологій відбулося і підвищення характеристик техніки, що дозволило об'єднувати радіотелескопи на великих (міжконтинентальних) відстанях для проведення «радіоінтерферометрії з наддовгою базою» (VLBI). Великі відстані між телескопами дозволяють досягти дуже високої кутової роздільної здатності. Використовуючи цей метод, можна створити масив антен, який працює як одна велика радіоантена планетарних розмірів. Радіоінтерферометрія з наддовгою базою використовується для отримання зображень віддалених космічних радіоджерел, відстеження космічних апаратів, а також знаходить

застосування в астрометрії – розділі астрономії, який вивчає геометричні та кінематичні властивості небесних тіл.

1.3) Астрономічні джерела радіовипромінювання

Радіоастрономія призвела до значного збільшення астрономічних знань, особливо з відкриттям нових класів астрономічних об'єктів, як-от пульсари, квазари і радіогалактики. Це пояснюється тим, що радіоастрономія дозволяє сприймати космічні об'єкти, недоступні для оптичної астрономії.

Космічне мікрохвильове фонове випромінювання також було виявлене в такий спосіб. Але радіотелескопи можна використовувати для вивчення відносно близьких до Землі об'єктів (наприклад, спостереження за Сонцем та радіолокаційне картографування планет [28]).

Астрономічне джерело радіовипромінювання – це об'єкт у космосі, який випромінює сильні радіохвилі. Такі об'єкти можна знайти як в межах Сонячної системи, так і по всій доступній для спостереження частині Всесвіту.

Як приклад можна навести сонячне радіовипромінювання – радіохвилі, які природним чином випромінює Сонце, переважно хромосферою і короною. Радіовипромінювання зірки виникає через перетворення енергії рухомих електронів в електромагнітне випромінювання. Зазвичай радіовипромінювання Сонця не перевищує фоновий рівень, але це змінюється при сонячній активності. В такі моменти можна оптично зафіксувати сонячні плями та корональні викиди маси, а також радіосплески.

Сонячні радіосплески класифікуються на основі того, як вони виглядають у динамічних спектральних спостереженнях за допомогою радіоспектрографів. Перші три типи були визначені на основі спостережень Полом Вайлдом і Ліндсі МакКріді в 1950 [29]. Через кілька років до них були додані типи IV і V, а згодом було ідентифіковано ще низку інших типів та підтипів.

Сплески I типу – це сплески випромінювання, які тривають близько однієї секунди і відбуваються у відносно вузькому частотному діапазоні з незначним або взагалі відсутнім дрейфом частоти. Сплески I-го типу зазвичай виникають у кластерах, які називаються шумовими бурями, і часто накладаються на посилене широкосмугове випромінювання в тому ж частотному діапазоні. Шумові бурі можуть тривати від кількох годин до кількох тижнів і зазвичай спостерігаються на відносно низьких частотах від 50 до 500 МГц.

Згідно сучасних теорій, механізм випромінювання сплесків I типу полягає у випромінюванні плазми через високі частки кругової поляризації, які часто спостерігаються. Однак немає єдиної думки щодо того, який процес прискорює електрони, необхідні для стимулювання плазмової емісії. Провідними ідеями є магнітне перез'єднання або ударні хвилі, спричинені висхідним розповсюдженням [30].

Сплески II типу демонструють відносно повільний дрейф від високих до низьких частот - близько 1 МГц за секунду, зазвичай протягом кількох хвилин. Вони часто мають дві чіткі смуги випромінювання, що відповідають фундаментальному і гармонійному випромінюванню плазми, які виходять з тієї самої області.

Сплески II типу пов'язані з корональними викидами маси. Вважається, що при цьому відбувається плазмова емісія, але сплески не демонструють значних кільцевих поляризацій, як можна було б очікувати за стандартною теорією плазмової емісії [31].

Сплески даного типу іноді демонструють тонкі структури (так звані «ялинкові сплески» [32]), які простягаються від основного сплеску до більш низьких частот.

Сплески III типу дрейфують від високих до низьких частот і широко пов'язані з механізмом плазмової емісії, подібно другому типу. Однак швидкість дрейфу набагато швидше, близько 100 МГц за секунду. Даний тип сплесків пов'язаний з електронними пучками, прискореними до малих часток швидкості світла (приблизно 10-30% від швидкості світла у вакуумі) завдяки магнітному перез'єднанню.

Сплески даного типу можуть відбуватися поодиночі, невеликими групами або ланцюжками. Їх часто поділяють на два типи: корональні та міжпланетні. Корональний – це випадок, коли електронний промінь рухається в короні в межах кількох сонячних радіусів від фотосфери. Зазвичай вони починаються з частот у сотні МГц і знижуються до десятків МГц протягом декількох секунд. Електронні пучки, які збуджують випромінювання, рухаються вздовж певних ліній магнітного поля, які можуть бути закритими або відкритими до міжпланетного простору.

Електронні пучки, що вилітають у міжпланетний простір, можуть збуджувати Ленгмюрівські хвилі в плазмі сонячного вітру, створюючи міжпланетні сплески, які можуть поширюватися до 20 кГц і нижче для пучків, що досягають 1 астрономічної одиниці і далі [33]. Дуже низькі частоти міжпланетних сплесків (близько 10 МГц) блокуються іоносферою Землі, через це їх можна спостерігати тільки з космосу.

Сплески IV типу – це сплески широкосмугового випромінювання, які включають кілька окремих підтипів, пов'язаних з різними явищами і різними механізмами випромінювання.

Перший тип – рухомий сплеск IV типу, для виявлення якого потрібні візуальні спостереження (інтерферометрія). Вони характеризуються зовнішнім рухомим джерелом, якому часто передують сплески II типу, пов'язаний з викидом корональної маси. Механізм випромінювання сплесків IV типу зазвичай пов'язують з гіросинхротронною емісією, плазмовою

емісією або їхньою комбінацією, що виникає внаслідок швидкого руху електронів, захоплених магнітними полями коронального викиду маси [34].

Стаціонарні сплески IV типу є більш поширеними і не пов'язані з корональними викидами маси. Це широкосмугові викиди, пов'язані з сонячними спалахами або сплесками I типу. Більші спалахи часто включають фазу штормового континууму.

Сплески V типу є найменш поширеними з 5 стандартних типів. Це безперервні викиди тривалістю від однієї до кількох хвилин, що слідують одразу за групою сплесків III типу.

Вважається, що сплески V-го типу спричинені гармонічним випромінюванням плазми, пов'язаним з тими самими електронними потоками, які відповідають за відповідні сплески III типу. Іноді вони демонструють значні позиційні зсуви порівняно зі сплесками III типу, що може бути пов'язано з тим, що електрони рухаються вздовж дещо інших структур магнітного поля [35].

Сплески даного типу зберігаються набагато довше, ніж сплески III типу, оскільки вони зумовлені повільнішою і менш колімованою популяцією електронів, що спричиняє ширшу смугу випромінювання, а також призводить до зміни знаку кругової поляризації на протилежний, через інший розподіл Ленгмюрівських хвиль [36].

Окрім класичних п'яти типів, існує низка інших типів сонячних радіосплесків. До них відносяться варіації стандартних типів, тонка структура всередині іншого типу і зовсім інші явища.

Через свою близькість до Землі, Сонце є найяскравішим джерелом астрономічного радіовипромінювання. Звичайно ж, інші зорі також генерують радіовипромінювання, при чому воно може бути набагато інтенсивніше ніж те, що спостерігається від Сонця.

Для "нормальних" зірок головної послідовності (в ядрах яких відбувається термоядерний синтез атомів гелію з атомів водню) механізми, які виробляють зоряне радіовипромінювання, такі ж самі, як і механізми, які виробляють сонячне радіовипромінювання. Однак випромінювання "радіозірок" може мати суттєво відмінні від сонячної властивості, а відносна важливість різних механізмів може змінюватися залежно від властивостей зорі, зокрема, від її розміру та швидкості обертання.

Яскравими прикладами зоряного радіовипромінювання є спокійне стійке випромінювання зоряних хромосфер і корон, радіовибухи від спалахів, радіовипромінювання від масивних зоряних вітрів і радіовипромінювання, пов'язане з близькими подвійними зорями [37].

Різні процеси радіовипромінювання існують також для певних зір до головної послідовності та зір після головної послідовності, таких як нейтронні зорі. Ці об'єкти мають дуже високу швидкість обертання, що призводить до дуже інтенсивних магнітних полів, які можуть прискорювати велику кількість частинок до високих релятивістських швидкостей.

Хоча зірки генерують радіовипромінювання, їх можна спостерігати і оптично. Деякі космічні об'єкти вдається спостерігати тільки завдяки випромінюванню ними радіохвиль. Наприклад, центр галактики Чумацький Шлях являє собою надмасивну чорну діру (близько 4 мільйонів сонячних мас) і отримав назву Стрілець А. Існує консенсус, що надмасивні чорні діри існують у центрах більшості галактик.

Чорна діра – це область простору-часу, де гравітація настільки сильна, що ніщо (включаючи світло) не має достатньо енергії, щоб вирватися з неї. Загальна теорія відносності передбачає, що досить компактна маса може деформувати простір-час, утворюючи чорну діру [38].

Багато в чому чорна діра поводить себе як ідеальне чорне тіло, оскільки не відбиває світло [39]. Крім того, квантова теорія поля у викривленому просторі-часі передбачає, що горизонти подій генерують випромінювання

Хокінга, з таким самим спектром, як і чорне тіло з температурою, обернено пропорційною його масі. Для зоряних чорних дір ця температура становить мільярдні частки Кельвіна, що робить їх практично неможливими для прямого спостереження.

Про наявність чорної діри можна зробити висновок з її взаємодії з іншою матерією та електромагнітним випромінюванням. Саме у такий спосіб радіоастрономи ідентифікували багато чорних дір, зокрема радіоджерело, відоме як Стрілець А в центрі Чумацького Шляху.

Ще один приклад об'єктів, які спостерігають за рахунок радіохвиль – пульсари. Наднові іноді залишають після себе щільні нейтронні зорі, що обертаються, які називаються пульсарами. Вони випускають струмені заряджених частинок, які генерують синхротронне випромінювання (випромінювання електромагнітних хвиль релятивістськими зарядженими частинками, що рухаються криволінійною траєкторією – тобто мають складову прискорення, перпендикулярну швидкості) в радіодіапазоні.

Пульсар (пульсуюче радіоджерело, англ. – **pulsating radio source**) – це сильно намагнічена нейтронна зоря, що обертається і випромінює пучки електромагнітного випромінювання зі своїх магнітних полюсів. Це випромінювання можна спостерігати лише тоді, коли пучок випромінювання спрямований у бік Землі. Варто зазначити, що виявлено пульсари які випромінюють у видимому світлі, рентгенівському та гамма-діапазонах [40].

Нейтронні зорі мають високу щільність і регулярні періоди обертання. Це призводить до дуже точного інтервалу між імпульсами, що становить від мілісекунд до секунд для окремого пульсара.

Точність періодів обертання пульсарів робить їх дуже корисними інструментами для астрономів. Наприклад, спостереження пульсара в подвійній нейтронній зоряній системі були використані для непрямого підтвердження існування гравітаційного випромінювання [41].

Також варто згадати квазари – ядра активних галактик. Термін "кварар" означає "кваризоряне джерело радіовипромінювання", оскільки перші квазари були ідентифіковані як джерела радіовипромінювання невідомого фізичного походження, і на фотографічних зображеннях у видимому діапазоні вони нагадували слабкі, схожі на зорі точки світла.

Зображення кварарів з високою роздільною здатністю отримані за допомогою космічного телескопа "Габбл" показали, що квазари виникають у центрах активних галактик – компактній області у центрі галактики, яка має набагато вищу за нормальну світність (в частині електромагнітного спектра), з характеристиками які вказують на те, що ця світність не виробляється зірками. Це випромінювання спостерігається в радіо-, оптичному, рентгенівському та гамма-діапазонах.

Кварари є найяскравішими постійними джерелами електромагнітного випромінювання у Всесвіті. Спостережувані властивості кварара залежать від багатьох факторів, як-от швидкість акреції газу, орієнтація акреційного диска відносно спостерігача, ступінь затемнення газом і пилом у головній галактиці.

Кварари настільки далекі, що здаються нерухомими для сучасних технологій, але їхні положення можна виміряти з великою точністю за допомогою інтерферометрії з дуже довгою базовою лінією.

Вони слугують зручними опорними точками при побудові небесної сфери. Міжнародна небесна система координат (International Celestial Reference System, скорочено – ICRS) базується на сотнях позагалактичних радіоджерел (переважно кварарів), розподілених по небу. Положення більшості з них відомі з точністю до 0,001 дугової секунди, що значно точніше, ніж найкращі оптичні вимірювання доступні для сучасної техніки [42].

Отже, радіоастрономія призвела до значного збільшення астрономічних знань, за рахунок відкриття нових класів астрономічних

об'єктів – пульсарів, квазарів, радіогалактик. Це пояснюється тим, що радіоастрономія дозволяє сприймати космічні об'єкти, недоступні для оптичної астрономії – деякі астрономічні джерела радіовипромінювання (космічний об'єкт, який випромінює сильні радіохвилі) як-от зірки можна спостерігати і оптично, але далеко не всі космічні об'єкти можна зафіксувати таким чином. Тому радіоастрономія грає важливу роль в дослідженні космосу.

РОЗДІЛ 2. НАУКОВА СПАДЩИНА ЙОСИПА ШКЛОВСЬКОГО

2.1) Огляд наукової спадщини Йосипа Шкловського

Йосип Шкловський, видатний астрофізик і радіоастроном, завжди був в серці космосу. Він віддавав своє життя вивченню найглибших таємниць всесвіту, роблячи вагомий внесок у сферу астрономії та космічних досліджень. Своєю науковою роботою та гіпотезами Шкловський не лише поклав початок новим напрямкам досліджень, але також відкрив нові горизонти для спостереження космічних явищ. Результатами роботи цього видатного вченого на світ з'явилися декілька книг та низка наукових статей.

"Розумне життя у Всесвіті" (англ. – Intelligent life in the universe) – книга, написана Йосипом Шкловським у співавторстві з Карлом Саганом, відомим американським астрономом, астрофізиком і популяризатором науки. Вперше книга була опублікована в 1966 році і досліджує тему позаземного життя та можливість існування розумних цивілізацій за межами Землі.

У книзі розглядаються різні аспекти пошуку позаземного розуму, умови, необхідні для існування життя на інших планетах, і потенціал для спілкування з розумними істотами з інших світів.

Книга починається з передмови (написаної Карлом Саганом) і приміток до математичних та фізичних одиниць, використаних у книзі. Крім цього, коротко описуються перспективи наявності розумного життя у Всесвіті, а також погляд на пошук позаземного життя з психологічної точки зору.

Основна частина книги складається з трьох розділів, кожен з яких розглядає певну тему – Всесвіт, життя у Всесвіті, розумне життя у Всесвіті.

Перший розділ містить наукові відомості, що стосуються Всесвіту – його розмір та структура, міжзоряне середовище, фундаментальні властивості зірок та зоряних систем. Також згадуються історичні погляди на походження Сонячної системи.

Другий розділ торкається теми позаземного життя – не тільки розумному, а житті загалом. Розглядається визначення біологічного життя, історичні погляди на його походження, необхідні фізичні умови для можливого виникнення. Зокрема, на прикладі таких планет Сонячної системи як Меркурій, Венера і Марс. Також розглядається можливість життя в інших сонячних системах.

Третій розділ присвячено темі розумного позаземного життя. Розглядається можливість існування галактичних цивілізацій, їх можливий розподіл в космічному просторі, способи контакту (оптично, за допомогою радіохвиль, за допомогою космічних апаратів) та можливі наслідки цього контакту.

Книга «Розумне життя у Всесвіті» відіграла значну роль у стимулюванні наукового інтересу та обізнаності громадськості щодо можливості існування життя за межами Землі. Поєднуючи наукову строгість з доступною формою викладу, вона дає відповідь на одне з найглибших питань, що стоять перед людством: Чи ми самотні у Всесвіті?

Стаття «Про природу джерела рентгенівського випромінювання Sco XR-1» (англ. – On the Nature of the Source of X-Ray Emission of Sco XR-1) була опублікована в Астрофізичному журналі [43] (американський науковий журнал, в якому публікуються статті з астрономії та астрофізики; видається з 1895 року) в 1967 році.

Стаття присвячена космічному об'єкту під назвою «Скорпіон X-1» – джерелу рентгенівського випромінювання, яке знаходиться в сузір'ї Скорпіона [44].

На той час вважалося, що механізм рентгенівського випромінювання X-1 можна пояснити гальмівним випромінюванням оптично тонкого шару дуже гарячої плазми. Шкловський вивчив рентгенівські та оптичні спостереження джерела і дійшов висновку, що випромінювання походить від нейтронної зірки, яка накопичує речовину від супутника [45].

Запропонована вченим «тришарова» модель джерела Х-1 досить грубо (зі слів Шкловського в статті) описала природу джерела, але зіграла роль в науковому співтоваристві.

Наукові здобутки вченого не обмежилися рідною країною. Закордонне наукове товариство було зацікавлене в дослідженнях Шкловського і займалося перекладом його праць. Один з таких прикладів – книга «Космічні радіохвилі» (англ. – Cosmic Radio Waves). Книга була перекладена на англійську мову та надрукована Видавництвом Гаварського університету в 1960 році [46].

Книга починається з передмови, де згадується значний внесок вченого в розвиток радіоастрономії. Наприклад, дослідження монохроматичного радіовипромінювання, природи та функцій галактичного ореолу.

Перший розділ розглядає приймачі та антени, які використовуються в радіоастрономії, і як проводиться вимірювання космічного шуму.

Другий розділ торкається теми космічних радіохвиль. В ньому йдеться про спостереження радіоспектру на різних частотах та аналіз результатів. Згадується просторовий розподіл компонентів радіовипромінювання та дискретні джерела радіовипромінювання (їх кутовий розмір та оптична ідентифікація).

Третій розділ розповідає про природу галактичних радіохвиль. Розглядаються міжзоряні магнітні поля, плоский компонент радіохвиль та нетеплова складова (наприклад, синхротронне та мазерне випромінювання), а також гіпотеза радіозірки.

Четвертий розділ присвячений монохроматичним радіохвилям (хвилям, в спектрі яких є лише одна складова за частотою). Розглядаються радіолінії нейтрального водню (також відомі як «лінія 21 см») – радіолінії, що дають інформацію про розподіл нейтрального водню та рух його хмар і використовуються для пошуків позаземних цивілізацій. В розділі також йдеться про радіоспектр галактики, її спіральну структуру та динаміку.

П'ятий розділ книги розглядає походження космічних променів. Згадується радіовипромінювання від викидів наднових (на прикладі Крабовидної туманності, яка є залишком наднової), прискорення частинок у радіотуманностях.

Шостий розділ присвячений позагалактичним радіохвилям. Розглядаються позагалактичні радіоджерела, природа радіогалактик та монохроматичне випромінювання.

Одним із найкорисніших аспектів книги перекладачі виділили те, що вона чітко зосереджує увагу на актуальних проблемах, які потребували детального вивчення. Також, наголошується на тому, що радіо- та оптична астрономія не мають бути окремими галузями. Усі астрофізики повинні використовувати обидві, у багатьох випадках застосовуючи їх разом для пошуку вирішення наукових питань.

Стаття «Пульсар NP 0532 та ін'єкція релятивістських частинок у Крабовидну туманність» (англ. – Pulsar NP 0532 and the Injection of Relativistic Particles into the Crab Nebula) була опублікована в 1970 році в Листах астрофізичного журналу (Astrophysical Journal Letters) – виданні Астрофізичного журналу, який присвячений публікації значущих астрономічних досліджень [47].

У статті розглядається синхротронне випромінювання пульсара NP 0532 та його зв'язок з інжекцією релятивістських частинок у Крабовидну туманність. Незабаром після відкриття інфрачервоного випромінювання від NP 0532 автор припустив, що спостережувані властивості спектрів пульсара можна пояснити механізмом синхротронного випромінювання. Вважається, що синхротронне випромінювання NP 0532 виникає у зовнішній магнітосфері поблизу області радіуса, де швидкість обертання «твердого тіла» близька до швидкості світла. Ця область відповідає за випускання синхротронного випромінювання. NP 0532 має жорсткіший спектр порівняно

з Крабоподібною туманністю. Дослідження пов'язує цю спектральну різницю з ін'єкцією релятивістських частинок у Крабовидну туманність.

Енергетичний спектр релятивістських електронів, відповідальних за високочастотне синхротронне випромінювання NP 0532, здається, подібний до тих, що вводяться в Крабовидну туманність. Ця подібність підтверджує гіпотезу про те, що природа цих релятивістських електронів ідентична в обох випадках. У статті припускається, що в енергетичному спектрі релятивістських електронів у зовнішній магнітосфері NP 0532 є розрив. Це узгоджується зі зміною спектрального індексу в синхротронному спектрі Крабовидної туманності. Спектр NP 0532 в спектральній області можна пояснити неоднорідною випромінювальною областю, де кутовий розмір джерела збільшується зі зменшенням частоти. Цей ефект описується певною формулою. Дослідження дає змогу зрозуміти всю проблему синхротронного випромінювання Крабоподібною туманністю, а запропонована інтерпретація спектру NP 0532 узгоджується зі спостереженнями Крабоподібною туманності.

Підводячи підсумок, у статті досліджується синхротронне випромінювання NP 0532, його спектральні характеристики та зв'язок із випромінюванням Крабовидної туманності. Дослідження припускає, що в обох випадках існує подібність у природі релятивістських електронів, і дає змогу зрозуміти енергетичний спектр і механізми випромінювання в цих астрофізичних явищах.

Стаття «Про природу Галактичного ореолу» (англ. – On the Nature of the Galactic Halo) була опублікована в журналі «Огляди сучасної фізики» (Reviews of Modern Physics) в 1958 році [48].

У статті розглядаються розподіл та характеристики нетеплових джерел радіовипромінювання в галактиці, а також їх зв'язок з галактичним гало. Джерела галактичного нетеплового радіовипромінювання розподілені в майже сферичній системі з концентрацією до площини та центру галактики.

Цей розподіл спостерігали та повідомляли в 1952 році. Поле між хмарами цих джерел має бути достатньо сильним, щоб утримувати космічні промені в межах галактики. Щільність кінетичної енергії газу між хмарами приблизно дорівнює щільності магнітної енергії, що означає, що газ повинен мати високу дисперсію швидкості. Розкид швидкості розрідженого газу в просторі між хмарами повинен бути великим і утворювати сферичну підсистему, а не плоску. Це підтверджується сферичним розподілом радіовипромінювання та наявністю широких ліній поглинання в спектрах ранніх надгігантів, що свідчить про швидкі рухи розрідженого газу.

Стаття також обговорює рівновагу між магнітним полем і тиском космічних променів у різних регіонах галактики, у тому числі поблизу галактичної площини та на 10 кпк біля неї. Це свідчить про варіації напруженості поля в цих регіонах. Спочатку вважалося, що наявність надзвукових рухів у галактичному гало призводить до швидкого розсіювання енергії. Проте стверджується, що поєднання магнітних полів і космічних променів збільшує швидкість звуку, послаблюючи ударні хвилі та зменшуючи розсіювання енергії. Для підтримки рухів в гало потрібне потужне джерело енергії. Різні відомі механізми, такі як нові, наднові, тиск випромінювання від гарячих зірок, вважаються недостатніми. Спостереження за ядром галактики показують, що магнітогідродинамічні хвилі можуть поширюватися назовні від ядра, роблячи значний внесок у нетеплове радіовипромінювання. Стаття припускає, що ядро є головним фактором у поясненні рухів в гало.

Шкловський закликає до прямих спостережень для підтвердження теоретичних моделей, наводячи приклади високошвидкісної дисперсії, низьких температур та низьких іонізаційних областей у газових системах.

Стаття «До проблеми про природу газової корони галактики» (англ. – On the problem of the nature of the gas corona of the galaxy) була опублікована у французькому науковому журналі «Annales d'Astrophysique» у 1959 році [49].

Тема статті – розгляд існування розрідженої та розширеної газової корони в нашій галактиці, яку називають гало, і дослідження різних аспектів її природи, походження та механізмів підтримки.

На додаток до відносно щільного міжзоряного газу, зосередженого в галактичній площині, існує також розріджена і майже сферична газова корона, відома як гало. Ця гіпотеза базується на аналізі утримання космічних променів і радіоастрономічних даних. Гало описується як майже сферичний об'єм, який містить магнітні поля та релятивістські частинки, які відповідають за нетеплове галактичне радіовипромінювання. На відміну від зосередженого міжзоряного газу в галактичній площині, гало займає більш об'ємний і сферичний простір. Хоча прямих спостережень за обертанням гало немає, у статті обговорюються припущення щодо його обертання. Припускається, що гало має відносно повільну швидкість обертання. Шкловський розглядає кілька потенційних сил, відповідальних за збереження ореолу. Вчений припускає, що можуть бути задіяні такі сили, як магнітні поля, космічні промені, тиск газу та хаотичні рухи.

Маса гало оцінюється як порівнянна із сумарною масою газу та молодих зірок у плоскій підсистемі. Цей баланс маси необхідний для підтримки загального моменту імпульсу галактики. Утворення гало пояснюється тиском магнітних полів, космічними променями та макроскопічними рухами. Обговорюються дві основні моделі: динамічна модель, де поле збільшується хаотичними рухами газу, і статична модель, де напруженість поля підтримується градієнтами тиску. Магнітні поля відіграють вирішальну роль у підтримці ореолу. У статті досліджуються сценарії, за яких магнітні поля можуть протидіяти силам тиску, і важливість регулярності поля. Вчений припускає, що для підтримки рухів в гало потрібна значна кількість енергії, і ця енергія може бути забезпечена різними джерелами, включаючи наднові, магнітні зірки та космічні промені. Він підкреслює можливість систематичного розширення гало з часом через зменшення щільності газу зі збільшенням розмірів. Таке розширення може

бути наслідком тиску космічного випромінювання та взаємодії між магнітними полями та газом.

Підсумовуючи, стаття заглиблюється в існування та характеристики галактичного гало, його обертання, механізми підтримки та потенційні джерела енергії, що керують його динамікою. Вона дає уявлення про складну взаємодію сил і джерел енергії в гало, проливаючи світло на цей захоплюючий аспект структури нашої галактики.

Стаття «Про природу планетарних туманностей» (англ. – On the nature of planetary nebulae) була опублікована під час симпозіуму Міжнародної астрономічної спілки (International Astronomical Union) у 1957 році, присвяченому нестабільним зіркам [50].

У статті розглядається фізичний стан планетарних туманностей, питання їх походження та еволюції. Хоча фізичні властивості планетарних туманностей добре вивчені, їх походження залишається великою загадкою. У статті висвітлюється розширення та розсіювання планетарних туманностей як ключовий аспект їхньої поведінки. Також запропоновано метод визначення відстаней до планетарних туманностей, заснований на фізичних міркуваннях. Цей метод може надати уявлення про абсолютні величини ядер планетарних туманностей, які мають надзвичайно високі температури та щільність, подібні до білих карликів.

Дослідження показує, що деякі планетарні туманності можуть бути «перегрітими» білими карликами, що проливає світло на природу цих об'єктів. У ньому також зазначено, що створення планетарних туманностей із зірок не є повторюваним процесом, і мільярди планетарних туманностей утворювалися та розпадалися протягом історії Всесвіту.

Обговорюються оптичні властивості планетарних туманностей, а вміст водню в них становить інтерес для теорії білих карликів. У статті також досліджується природа зірок, які породжують планетарні туманності,

припускаючи, що вони можуть походити від червоних гігантів високої світності.

Стаття закінчується підкресленням необхідності подальших спостережень, включаючи нове визначення тригонометричного паралакса конкретних планетарних туманностей, щоб поглибити розуміння цих небесних об'єктів.

Стаття «Наслідки асиметрії джетів у квазарах і активних ядрах галактик» (англ. – A consequence of the asymmetry of jets in quasars and active nuclei of galaxies) була опублікована під час симпозіуму Міжнародної астрономічної спілки (International Astronomical Union) у 1981 році, присвяченому позагалактичним радіоджерелам [51].

У статті досліджується явище однобічних струменів («джетів»), що виходять з ядер активних галактик, які зазвичай асоціюються з радіогалактиками та квазарами. Ці однобічні струмені характеризуються викидом компактних плазмових хмар (плазмоїдів) з релятивістськими швидкостями. Вчений розглядає, як ефект Доплера може зробити одну сторону струменя помітно яскравішою через її рух у бік спостерігача, тоді як інша сторона залишається менш видимою через її рух від спостерігача.

У статті представлені докази того, що односторонні джети дійсно існують поблизу активних галактичних ядер. Для цього наводиться кілька прикладів – Cygnus A, Centaurus A і Fornax A, де спостерігалися односторонні струмені. Вчений припускає, що викид плазмоїдів в одному напрямку може тривати протягом тривалого періоду (можливо, мільйонів років). Проміжні максимуми радіояскравості інтерпретуються як різні епохи односторонньої реактивної активності. Шкловський вводить ідею про те, що одностороння реактивна активність може призвести до набуття імпульсу надмасивними чорними дірами в протилежному напрямку викиду плазмоїда, і висловлює припущення, що завдяки цьому набутому імпульсу чорні діри можуть «втекти» зі своїх батьківських галактик. Це явище ставить під сумнів

ідею про те, що чорні діри повинні залишатися в ядрах галактик. Концепція виходу чорних дір із галактик пропонує вирішення проблеми «мертвих квазарів», коли багато галактичних ядер мають містити згаслі квазари, які неможливо виявити.

У статті також припускається, що різницю в еволюційних ефектах, які спостерігаються в різних типах квазарів і радіогалактик, можна пояснити різним часом життя джерел. Квазари з плоскими спектрами можуть бути короткочасними, тоді як квазари з крутими спектрами мають довший час життя.

Підводячи підсумок, асиметрія односторонніх джетів має значні наслідки для еволюції ядер активних галактик, поведінки надмасивних чорних дір і розуміння тривалості життя квазарів і радіогалактик. Як можливе пояснення цих явищ представлена ідея «втєчі» чорних дір із галактик.

Стаття «Чи є Кассіопея А чорною дірою?» (англ. – Is Cassiopeia A a black hole?) була опублікована в британському науковому журналі «Природа» в 1979 році [52].

Кассіопея А (Cas A) – це залишок наднової (тобто туманність, що залишилася після вибуху наднової). Такого висновку дійшли вчені, але деякі данні протирічать цьому. Абсолютна зоряна величина Cas A не відповідає очікуваному значенню. Низька яскравість може бути ознакою того, що продуктом вибуху наднової є чорна діра.

У цій статті обговорюється дивовижна відсутність записаних спостережень наднової, яка сталася в нашій Галактиці близько 1668 року, що призвело до утворення залишку Кассіопеї А. Незважаючи на очікувану яскравість наднової, вона залишилася непоміченою європейськими астрономами, що свідчить про те, що її оптична світність могла бути значно нижчою, ніж очікувалося. У статті припускається, що така низька яскравість може бути ознакою того, що вибух призвів до утворення чорної діри.

Відсутність потужних оптичних випромінювань під час наднової 1668 року свідчить про те, що вона не призвела до утворення нейтронної зірки. Рентгенівський аналіз Cas A свідчить про викид значної кількості газу під час вибуху. Ці спостереження вказують на те, що зірка, відповідальна за створення Cas A, була дуже масивним об'єктом. У статті підкреслюється, що унікальність Cas A полягає в рідкості дуже масивних зірок. Припускають, що зірка або повністю розсіялася після вибуху, або більша частина її маси сформувала чорну діру. Хоча в статті визнається, що неможливо зробити остаточний висновок, вона передбачає, що у випадку Cas A гравітаційний колапс, ймовірно, призвів до утворення чорної діри [53].

Стаття «Вік пульсара PSR 0833-45» (англ. – Age of Pulsar PSR 0833–45) була опублікована в журналі «Природа» У 1970 році.

Стаття присвячена визначенню віку Пульсара Вітрил (також відомого як PSR 0833–45). Встановлено, що пульсар пов'язаний з залишком наднової Вітрил. У статті описуються властивості залишку та те, як ці властивості використовуються для обчислення віку залишку наднової [54].

Ґрунтуючись на оцінках віку Петлі Лебедя (залишку наднової в сузір'ї Лебедя), у статті зроблено висновок про вік Пульсара Вітрил.

Стаття «Природа випромінювання пульсару NP 0532» (англ – Nature of Emission from Pulsar NP 0532) була опублікована в науковому журналі «Природа» в 1970 році.

Стаття присвячена пульсару NP 0532, який знаходиться в Крабовидній туманності. Особливістю даного пульсара є те, що він є джерелом як рентгенівського, так і оптичного випромінювання [55]. Вивчення пульсарів дає цінну наукову інформацію, зокрема про поведінку матерії під величезним тиском, природу сильних магнітних полів і випромінювання високої енергії від астрофізичних об'єктів.

Стаття «Про природу випромінювання Крабовидної туманності» (англ. – On the Nature of the Emission of the Crab Nebula) була опублікована під час симпозіуму Міжнародної астрономічної спілки у 1958 році, присвяченому динаміці космічного газу [56].

У статті розглядається випромінювання Крабоподібної туманності та досліджуються можливі пояснення спостережуваних варіацій у її джерелах випромінювання. Крабоподібна туманність є добре відомим астрономічним об'єктом, який випромінює радіохвилі, і варіації джерел випромінювання всередині неї становлять особливий інтерес. Вчений зазначає, що потужність джерел випромінювання в різних областях туманності істотно відрізняється. Ці варіації особливо помітні в конкретних деталях туманності, відомих як «пучки». Оорт і Вальraven висунули гіпотезу про те, що ці пучки є конденсацією релятивістських електронів, викинутих із центральної зірки. Ця ідея припускає, що ці релятивістські електрони випромінюють випромінювання, яке сприяє загальному випромінюванню туманності.

Однак Шкловський висуває декілька викликів цій гіпотезі. Він зазначає, що напрямок силових ліній магнітного поля в області туманності, де розташовані пучки, перпендикулярний до швидкості струменя. Це викликає питання про те, як релятивістські електрони можуть поширюватися вздовж ліній магнітного поля, створюючи спостережувану структуру пучка. Крім того, пучки відносно невеликі і з'являються швидко протягом місяця або навіть швидше. Це означає, що релятивістські електрони, які рухаються вздовж силових ліній, можуть не мати достатньо часу, щоб поширитися вздовж структури пучка.

Існує також проблема енергетичного балансу. Якщо напруженість магнітного поля не змінюється суттєво всередині пучка, то енергія релятивістських електронів усередині пучка повинна бути набагато вищою за щільність магнітної енергії. Це вимагало б значного збільшення напруженості магнітного поля всередині пучка, що, здається, важко

пояснити. Вчений пропонує інше пояснення варіацій у випромінюванні Крабовидної туманності. Він припускає, що коливання інтенсивності можуть бути пов'язані з локальними флуктуаціями магнітного поля.

Підводячи підсумок, у статті досліджується проблема пояснення варіацій випромінювання в Крабовидній туманності, приділяючи особливу увагу пучкам. У той час як викид релятивістських електронів був запропонований як пояснення, вчений пропонує альтернативну гіпотезу, яка пояснює зміни інтенсивності коливаннями сили та структури магнітного поля. Ця альтернативна гіпотеза узгоджується з явищами, що спостерігаються, і може дати розуміння складної динаміки Крабовидної туманності.

Стаття «Оптичне випромінювання Крабовидної туманності в безперервному спектрі» (англ. – Optical emission from the Crab nebula in the continuous spectrum) була опублікована під час симпозіуму Міжнародної астрономічної спілки у 1957 році, присвяченому радіоастрономії [57].

Попередні інтерпретації випромінювання Крабовидної туманності в основному базувалися на безперервному оптичному спектрі, припускаючи, що туманність випромінює теплове випромінювання через надзвичайно гарячу аморфну масу. Відповідно до цієї точки зору, маса оболонки оцінюється приблизно в 10-20 мас Сонця, а кінетична температура вважається надзвичайно високою. Це означає, що аморфна маса туманності відповідає за безперервне випромінювання. Відкриття радіовипромінювання Крабовидної туманності показало нові факти, які поставили під сумнів існуючі тлумачення. Різні вчені незалежно один від одного продемонстрували, що радіовипромінювання даної туманності не можна вважати продовженням її безперервного оптичного випромінювання, незалежно від припущень щодо кінетичної температури та щільності туманності.

Стаття представляє фундаментальний зсув у розумінні природи випромінювання Крабовидної туманності. Шкловський стверджує, що радіовипромінювання туманності не є тепловим за своєю природою, тобто воно не є результатом теплового випромінювання гарячої аморфної маси. Ця суттєва зміна в перспективі означає, що як оптичне, так і радіовипромінювання Крабовидної туманності створюються за допомогою того самого нетеплового механізму.

Вчений припустив, що нетепловий механізм, відповідальний як за радіо-, так і за оптичне випромінювання, — це випромінювання релятивістських електронів у магнітних полях. Ця ідея збігається з попередніми дискусіями про генерацію космічних променів під час спалахів наднових і нових. Теоретична модель вказує на наявність магнітних полів у Крабовидній туманності, орієнтованих дещо випадковим чином. Модель передбачає, що випромінювання релятивістських електронів у магнітних полях має бути повністю поляризованим. Цю поляризацію пізніше спостерігали, підтверджуючи теоретичне передбачення. Поляризація демонструє відносно регулярний малюнок, що свідчить про наявність слабого регулярного магнітного поля на додаток до випадкових магнітних полів.

Підводячи підсумок, стаття ставить під сумнів попередні тлумачення випромінювання Крабовидної туманності та припускає, що як оптичне, так і радіовипромінювання є результатом нетеплового механізму за участю релятивістських електронів у магнітних полях. Ця нова перспектива відкриває двері до кращого розуміння складних процесів і характеристик Крабовидної туманності.

Стаття «Втрата маси SS 433 та її вплив на рентгенівське та радіовипромінювання цього джерела» (англ. – The mass loss of SS 433 and its effect on the X-ray and radio emission of this source) була опублікована в Астрономічному журналі в 1981 році [58].

Стаття розглядає подвійну сонячну систему SS 433, яка є предметом великого інтересу астрономів. Незважаючи на різноманітні спостереження та дослідницькі зусилля, справжня природа SS 433 залишається незрозумілою. Шкловський пропонує ключ до розуміння природи SS 433, аналізуючи її «стаціонарні» лінії Бальмера та ближнє інфрачервоне випромінювання, припускаючи, що плазмова хмара, відповідальна за випромінювання стаціонарних ліній Бальмера, також є джерелом ближнього інфрачервоного випромінювання.

У статті припускається, що ближнє інфрачервоне випромінювання в основному створюється плазмою, що випромінює лінії водню. При цьому, загальна оболонка навколо SS 433 повинна блокувати інфрачервоне випромінювання від гігантської зірки. Плазма, викинута з SS 433, рухається з напіврелятивістськими швидкостями, і її взаємодія з міжзоряним середовищем викликає питання про джерело кінетичної енергії для викинутого матеріалу. Постійний викид плазми з SS 433 має глибокий вплив на структуру залишку наднової W50. Змінне рентгенівське випромінювання SS 433 пояснюється викидами хмар плазми.

Поглинання плазмою в SS 433 вносить свій внесок у спостережуваний радіоспектр. Вчений припускає, що радіоінтерферометрія з дуже довгими базовими лініями може допомогти перевірити обговорювані теорії, зокрема щодо різних характеристик радіовипромінювання SS 433.

Підсумовуючи, у статті викладено всебічний аналіз SS 433, зосереджуючись на характеристиках випромінювання, динаміці плазми та взаємодії з міжзоряним середовищем. Вчений підкреслює важливість радіо- та рентгенівських спостережень для розуміння складної природи цієї подвійної системи.

Стаття «Пульсари та наднові II типу» (англ. – Pulsars and type II supernovae) була опублікована в «Астрофізичних листах» в 1971 році [59].

У статті обговорюється зв'язок між пульсарами та спалахами наднових, а саме типи наднових зірок, що породжують пульсари.

Наднові класифікуються на два типи, тип I і тип II. Наднові типу I є результатом старих зірок із масою, подібною до Сонця, тоді як наднові типу II виникають у результаті вибуху молодих і масивних зірок. Пульсари були виявлені в залишках вибухів наднових як типу I (наприклад, Крабовидна туманність), так і типу II (наприклад, Vela X). Однак більшість пульсарів пов'язані з надновими зірками II типу.

Спостерігається, що молоді пульсари утворюють плоску систему зі специфічними характеристиками просторового розподілу. Цей розподіл більше відповідає надновим типу II, і частота утворення пульсарів у нашій галактиці становить приблизно один пульсар кожні 20-30 років, подібно до частоти спалахів наднових II типу. Виникає важлива проблема щодо утворення нейтронних зірок у результаті вибуху масивних зірок, враховуючи, що спостережувана частота утворення пульсарів свідчить про те, що це має бути рідкісне явище. Це ставить під сумнів загальноприйняте уявлення про те, що ядро руйнується та викидається під час вибуху наднової.

У статті розглядається швидке обертання масивних зірок і втрата ними обертальної стійкості через збереження моменту імпульсу при катастрофічному стисненні. Очікується, що батьківські зірки наднових II типу будуть червоними надгігантами, а характеристики їх ядра впливають на вибух. Пульсари утворюються з внутрішньої частини зірки, що стискається, під час спалаху наднової. На цей процес впливає швидке обертання, а високі космічні швидкості пульсарів пояснюють асиметричним викидом речовини під час вибуху. Шкловський припускає, що вибухи наднових II типу, які призводять до появи пульсарів, потребують високого ступеня симетрії з дуже низькою асиметрією, можливо, через нестабільність обертання. Вимога високої симетрії при вибухах наднової II типу передбачає, що лише невелика частина маси викидається з високими швидкостями, тоді як інша речовина має порівняно низькі космічні швидкості.

Підводячи підсумок, у статті розглядається зв'язок між утворенням пульсарів і вибухами наднових II типу та підкреслюється необхідність високої симетрії в таких вибухах. Це також підкреслює важливість вивчення властивостей пульсарів для розуміння природи наднових.

Стаття «Природа планетарних туманностей та їх ядер» (англ. – *The nature of planetary nebulae and their nuclei*) була опублікована в *Астрономічному журналі* в 1956 році.

Стаття обговорює планетарні туманності, які є астрономічними об'єктами, утвореними на пізніх стадіях еволюції певних типів зірок. Дана робота Шкловського мала великий вплив на наукове товариство і була процитована 159 разів [60].

Стаття «Про швидкі корпускули верхньої атмосфери» (англ. – *On Fast Corpuscles of the Upper Atmosphere*) була опублікована на 10-му Міжнародному конгресі з космонавтики у Лондоні, який проходив у 1959 році [61].

У статті повідомляється про відкриття електронів з низькою енергією у верхніх шарах атмосфери в результаті експерименту, проведеного під час запуску третього радянського супутника в травні 1958 року. Ці спостережувані електрони мають середню енергію близько 10 кеВ і виявляють анізотропію щодо магнітних силових ліній.

Експеримент передбачав використання флуоресцентних екранів і алюмінієвої фольги як індикаторів для вимірювання електронів. Чутливість використовуваного приладу була вищою для електронів з енергією близько 40 кеВ, ніж для електронів з 10 кеВ, що означає, що більшість зареєстрованих електронів, ймовірно, мали нижчу енергію, ніж «еквівалентна» зареєстрована енергія. Зазначається, що в експерименті переважно захоплювалися електрони з енергією в десятки кеВ, тоді як рентгенівське випромінювання від цих електронів у верхніх шарах атмосфери і корпусі супутника не

реєструвалося через конструкцію індикаторів. У статті також вказується, що рентгенівське випромінювання, яке створюється у верхніх шарах атмосфери, особливо в зоні полярних сьйв, може впливати на прилади на висотних ракетах і супутниках, що призводить до проблем з інтерпретацією даних.

Стаття «Про природу джерела рентгенівського випромінювання Тихо» (англ. – On the Nature of the Tycho X-ray Source) була опублікована в журналі «Природа» у 1972 році [62].

Тихо (також відома як SN 1572 або «наднова Тихо Браге») – це наднова в сузір'ї Касіопеї, яка була виявлена в 1572 році. Названа на честь Тихо Браге – датського астронома епохи Відродження, який зробив значний вклад у вивчення цієї наднової. Пошуки залишків наднової не давали результату до 1952 року, коли вдалося виявити джерело радіовипромінювання на місці наднової.

У статті обговорюється джерело рентгенівського випромінювання, пов'язане із залишком наднової Тихо, і зазначається, що його випромінювання не можна пояснити ні продовженням спектра синхротронного радіо, ні тепловим випромінюванням гарячої плазми. Натомість джерелом вважається молодий пульсар, потенційно закритий несприятливою орієнтацією осі його обертання, який генерує синхротронне випромінювання в оптичному та рентгенівському діапазонах. Це синхротронне випромінювання, ймовірно, є «квазіізотропним», тобто воно випромінює між імпульсами та може відігравати значну роль у фізиці Крабовидної туманності.

Щоб перевірити цю гіпотезу, у статті пропонується кілька спостережуваних тестів, включаючи вимірювання кутових розмірів джерела рентгенівського випромінювання Тихо, виявлення періодичної модуляції в потоці рентгенівського випромінювання, пошук оптичного пульсара в радіоджерелі та знаходження «точкового» джерела рентгенівського випромінювання в залишку наднової Кеплера.

Стаття «Емпірична модель джетів M87» (англ. – An empirical model of the M 87 jet) була опублікована в Астрономічному журналі в 1984 році [63].

Стаття присвячена галактиці Messier 87 – надгігантській еліптичній галактиці в сузір'ї Діви. З центру цієї галактики виринають релятивістські струмені (джети) – потоки іонізованої речовини.

У статті розглядаються спостереження та теоретичні інтерпретації джета в галактиці M87. Струмінь випромінює на різних частотах, включаючи радіо, оптичний і рентгенівський діапазони, і його структура і поведінка представляють особливий інтерес. Основна увага зосереджена на розумінні механізму випромінювання в струмені та генерації релятивістських електронів у ньому.

Стаття починається з історичного огляду досліджень джета. Науковці спостерігали лінійну поляризацію струменя, і радіовипромінювання від струменя добре встановлено. Недавні спостереження, зокрема в радіо- та оптичному діапазонах, дали зображення струменя з високою роздільною здатністю. У статті зазначається, що внутрішня структура джета була досліджена, з вимірюваннями окремих вузлів, і найяскравіший вузол представляє особливий інтерес.

В той же час, вчений визнає значну проблему в поясненні довговічності релятивістських електронів у струмені. Очікується, що втрати енергії через синхротронне випромінювання значно скоротять час життя частинок порівняно з довжиною струменя. У дослідженні коротко обговорюється ідея прискорення частинок на ударних фронтах у вузлах. Це підкреслює, що така інтерпретація може не повністю пояснити спостережувані випромінювання, особливо в оптичному діапазоні.

Потенційною причиною припинення випромінювання релятивістських електронів вважається ослаблення магнітного поля. Це ослаблення повинно призвести до зменшення спостережуваної яскравості вузлів. Переглянуто попередні моделі, що включають релятивістські плазмові хмари. Вчений

припустив, що такі моделі можуть не підійти для інтерпретації струменя M87.

Стаття закінчується висновком, що струмінь M87, ймовірно, односторонній і може містити хмари плазми, що викидаються з ядра з нерелятивістськими швидкостями.

Стаття «Про викид газу з активних ядер галактик» (англ. – On the Ejection of Gas from Active Nuclei of Galaxies) була опублікована в «Астрофізичних листах» в 1972 році [64].

У статті розглядається розподіл та динаміка хмар міжзоряного газу у центральних областях радіогалактик. Розподіл хмар міжзоряного газу в центральних областях радіогалактик не є випадковим. Значний вплив на рух міжзоряного газу спричиняють сильні зовнішні магнітні поля. Таке магнітне поле може виникнути внаслідок взаємодії між хмарами релятивістських частинок, викинутих із ядра галактики, та навколишньою намагніченою міжзоряною речовиною. Крім цього, відбувається безперервне поповнення галактичних ядер газом, який, ймовірно, походить від утворення планетарних туманностей.

Стаття «Про природу випромінювання галактики NGC 4486» (англ. – On the nature of the emission from the galaxy NGC 4486) була опублікована під час симпозіуму Міжнародної астрономічної спілки у 1958 році, присвяченому електромагнітним явищам в космічній фізиці [65].

У статті досліджуються унікальні властивості радіогалактики NGC 4486, зокрема її струменя безперервного спектру. Центральна частина NGC 4486 має характерний струмінь (джет) із безперервним спектром, без будь-яких ліній випромінювання чи поглинання. Безперервне оптичне випромінювання струменя пояснюється нетепловими механізмами, подібними до Крабовидної туманності. Це випромінювання створюється релятивістськими електронами, які взаємодіють з магнітними полями.

Релятивістські електрони, що утворюються в центральній частині NGC 4486, розсіюються у навколишній простір, заповнюючи значну частину галактики протягом мільйонів років. Ці електрони випромінюють радіохвилі, що пояснює сильне радіовипромінювання NGC 4486 [66].

Стаття «Наднові в зоряних системах» (англ. – Supernovae in multiple systems) була опублікована в Астрономічному журналі в 1980 році [67].

У статті розглядається виникнення спалахів наднових у подвійних зоряних системах. Масивні подвійні зоряні системи, в яких одна із зірок має велику масу, зазвичай призводять до вибухів наднових. Більш масивна зірка зазвичай перетворюється на нейтронну зірку або чорну діру. Разом з тим, подвійні системи з зірками меншої маси мають меншу ймовірність призвести до вибухів наднових. У статті стверджується, що наднові зірки рідко трапляються в таких системах. Рідкість наднових у подвійних системах з малою масою пояснюється значною втратою маси еволюціонуючої зірки, надлишок даної маси отримує друга зірка системи. Цей масообмін у більшості випадків запобігає вибуху наднової.

У статті також йдеться про відносно молоді подвійні системи SS 433, одним із компонентів якої є нейтронна зірка. Ця система демонструє особливі характеристики та викиди плазми, які пояснюються «ефектом пропелера», викликаним швидким обертанням нейтронної зірки. За прогнозами, у міру еволюції SS 433 зрештою перетвориться на джерело рентгенівського випромінювання. Крім цього, стаття розглядає виникнення наднових зірок в еліптичних галактиках, припускаючи, що вони в основному мають виникати в подвійних зоряних системах.

Підводячи підсумок, стаття досліджує взаємозв'язок між подвійними зоряними системами, масою зірок і виникненням спалахів наднових, проливаючи світло на фактори, які впливають на ймовірність цих подій у зоряних системах [68].

Стаття «Закон збереження імпульсу та деякі проблеми метagalactic астрономії» (англ. – The Law of Momentum Conservation and Some Problems of Metagalactic Astronomy) була опублікована під час симпозиуму Міжнародної астрономічної спілки у 1972 році, присвяченому зовнішнім галактикам та квазізоряним об'єктам [69].

У статті обговорюється гіпотеза, пов'язана з викидом великої кількості речовини з активних галактичних ядер, і намагається дати пояснення певним спостережуваним явищам у Всесвіті. Також пропонується концепція магнітоїдів, яка може пояснити різні спостережувані явища у Всесвіті, зокрема енергію скупчення галактик, високошвидкісні галактики та утворення струменів у ядрах галактик.

Скупчення галактик часто мають позитивну повну енергію, що призводить до дискусій про наявність невидимої матерії. Деякі скупчення розширюються, що свідчить про те, що процес утворення галактик триває. Припускають, що галактики утворюються з надщільної матерії, викинутої з активних галактичних ядер, що може пояснити спостережувану позитивну енергію. Також обговорюється утворення джетів у ядрах галактик, зокрема в NGC 4486. Джет у даній галактиці вважається сукупністю малих магнітоїдів (масивних обертових магнітних тіл, викинутих із галактичних ядер), кожен із власною орієнтацією магнітного поля.

Стаття завершується підкресленням потенціалу застосування закону збереження імпульсу для вирішення проблем метagalactic астрономії [70].

Стаття «Деякі проблеми метagalactic радіовипромінювання» (англ. – Some problems of meta-galactic radio-emission) була опублікована під час симпозиуму Міжнародної астрономічної спілки у 1957 році, присвяченому радіоастрономії.

Стаття присвячена аналізу спостережуваного космічного радіовипромінювання та його різних компонентів, насамперед поділу на

галактичні та метагалактичні джерела. Обговорюються різні моделі розподілу джерел космічного радіовипромінювання.

Оптичні спостереження обмежені в оцінці загальної яскравості Метагалактики (всієї системи галактик; Всесвіту) через різні перешкоди. У статті підкреслено важливість радіоастрономічних методів для визначення космологічних характеристик. Також розглядається радіовипромінювання від скупчень галактик і «супергалактики». Шкловський розглядає, чи це радіовипромінювання генерується всіма радіогалактиками в межах скупчення, чи воно походить із міжгалактичного простору в межах скупчення.

Стаття завершується розглядом питання просторової щільності та ідентичності дискретних радіоджерел. Залежно від типу радіогалактик, на які вони схожі, просторова щільність змінюється, але стаття припускає, що на яскравість Метагалактики може впливати інтегральне випромінювання від скупчень галактик [71].

Стаття «Монохроматичне радіовипромінювання Галактики та можливість його спостереження» (англ. – Monochromatic Radio Emission from the Galaxy and the Possibility of its Observation) була опублікована в книзі «Класика радіоастрономії», яку написав американський фізик Вудраф Саліван у 1982 році [72].

У цій статті йдеться про те, як міжзоряні атоми водню випромінюють специфічні радіохвилі, коли вони змінюють свої базові рівні енергії.

Досліджено можливість експериментального виявлення цього випромінювання. Показано, що за допомогою сучасної радіотехніки високої чутливості це випромінювання можна виявити. Проте було показано, що неможливо очікувати монохроматичне радіовипромінювання від інших міжзоряних атомів.

Дослідження розподілу інтенсивності монохроматичного радіовипромінювання по небу дає надзвичайно важливі дані про фізичний стан міжзоряного газу.

Стаття «Огляд публікацій – Космічні радіохвилі» (англ. – Review of Publications - Cosmic Radio Waves) була опублікована в Журналі Королівського астрономічного товариства Канади в 1961 році [73].

У цій статті обговорюється значний внесок радіоастрономії, зокрема роботи Йосипа Шкловського, в галузі астрофізики. Автор підкреслює чутливість радіотелескопів, підкреслюючи, що вони можуть виявляти надзвичайно слабкі сигнали. Книгу Шкловського «Космічні радіохвилі» хвалять за те, що вона зосереджена на космічних радіохвилях від галактики та за її межами. Це свідчить про розвиток радіоастрономії з 1950-х років, коли попередні книги висвітлювали цю тему обмежено.

Крім цього, обговорюється відмінність між результатами спостережень та інтерпретаціями. Стаття охоплює фонове випромінювання та дискретні радіоджерела, надаючи дані про їх положення, спектри та кутову протяжність. Розглянуто одну з фундаментальних проблем радіоастрономії — генерацію радіохвиль у міжзоряному просторі. У статті розглядаються різні теорії, такі як теплове випромінювання та плазмові коливання, і висвітлюється синхротронне випромінювання як ймовірний механізм, що включає прискорення релятивістських електронів у магнітному полі. Також йдеться про спостереження спектральних ліній, відмінних від 21-сантиметрового випромінювання водню, включаючи посилення на експеримент із лініями дейтерію в Канаді. Обговорюються дослідження Шкловського щодо частоти спалахів наднових і потенційного впливу на Землю, наприклад масового вимирання рептилій і появи життя.

Наприкінці статті зазначається, що, незважаючи на те, що книга Шкловського не є популярною, робота Шкловського є описовою та доступною як для астрономів-аматорів, так і для професійних астрономів;

також вказується на необхідність більш тісних зв'язків між космологією та мікрофізикою в сучасних дослідженнях.

Стаття «Еволюційний ефект у квазарах як наслідок процесу утворення галактик» (англ. – Evolutionary effect in quasars as a consequence of galaxy formation process) була опублікована під час симпозіуму Міжнародної астрономічної спілки у 1983 році, присвяченому ранній еволюції Всесвіту та його сучасній структурі [74].

У цій статті обговорюється еволюційний ефект у квазізоряних об'єктах (QSO) та його наслідки для історії Всесвіту. Встановлено, що просторова щільність QSO була набагато вищою в попередні епохи Всесвіту в порівнянні з сучасністю. Існувала «епоха формування квазарів», що відповідає віковому інтервалу Всесвіту від 1,3 до 1,9 мільярда років. Ця епоха збігається з утворенням галактичних ядер, що вказує на сильний зв'язок між квазізоряними об'єктами та галактичними ядрами. Еволюційний ефект у квазізоряних об'єктах пояснюється утворенням галактик, де протогалактики еволюціонують у ядра з «нормальним» хімічним складом. Розраховані часові рамки цих процесів. Автор визнає попередній характер цих оцінок і наголошує на необхідності більш комплексних космологічних моделей.

У статті також розглядається феномен «локальних» квазізоряних об'єктів і пропонується дві можливості їх існування. Місцеві квазізоряні об'єкти можуть бути пов'язані або з нещодавно сформованими галактичними ядрами, або з «омолодженням» давно існуючих ядер, можливо, через такі процеси, як галактичний «канібалізм». Віддається перевага концепції безперервного процесу утворення галактичного ядра.

Останні спостереження, в тому числі випадок галактики NGC 5128 і дослідження віку диска Чумацького Шляху, підтверджують ідею про те, що ядра галактик утворювалися в різний час. Передбачається, що швидкість утворення галактичного ядра може змінюватися всередині скупчень, причому кластери з вищою початковою щільністю утворюють ядра швидше.

У статті також обговорюється хімічний склад газу, з якого утворилися протогалактики, і його значення для часу утворення протогалактик і скупчень. Нарешті, спостережувана поява локальних квазізоряних об'єктів у бідних скупченнях з меншою щільністю пояснюється різною швидкістю утворення ядер у скупченнях з різною початковою щільністю [75].

Стаття «Оцінка іонізації та маси оболонок наднових I типу на основі гіпотези радіоактивного розпаду» (англ. – Estimate of the ionization and mass of the envelopes of type I supernovae on the basis of the radioactive-decay hypothesis) була опублікована в Астрономічному журналі в 1981 році [76].

Стаття розглядає наднові зірки I типу та намагається з'ясувати, звідки береться їхня енергія. Деякі вчені припустили, що це може бути пов'язано з розпадом радіоактивних елементів, таких як каліфорній або берилій. Але з цією ідеєю є проблеми, зокрема пов'язані з відсутністю великої кількості цих елементів у міжзоряному газі.

Інша ідея полягає в тому, що енергія походить від ланцюгової реакції розпаду елементів. У статті докладно описано цей процес. Ще одна гіпотеза стосується пульсарів, але з цією теорією також є проблеми.

У статті вказується, що те, як світло від наднових змінюється з часом, підтверджує ідею радіоактивного розпаду, але для впевненості потрібні додаткові спостереження. Вчені також пропонують поспостерігати за тим, яке світло випромінюють ці зірки після вибуху, щоб дізнатися більше. Крім цього, розглядається як наднові впливають на оточення, зокрема на умови іонізації, які включають заряджені частинки. Це свідчить про те, що гелій, особливий елемент, може зіграти вирішальну роль у цих вибухах.

Стаття також припускає, що утворення заліза може статися лише в наднових зірках типу I. Однак для підтвердження цих ідей потрібні додаткові спостереження [77].

Стаття «Астрофізика високих енергій» (англ. – High Energy Astrophysics) була опублікована в «Працях Міжнародного астрономічного союзу» в 1979 році.

У статті розглядаються спостереження та дослідження, пов'язані з рентгенівським випромінюванням небесних джерел та різні аспекти цих явищ. Вона охоплює результати супутникових місій і теоретичні дослідження. Наведені спостереження, зроблені різними супутниками, які фіксували рентгенівське випромінювання в різних діапазонах енергії. Деякі спостереження показали низький рівень рентгенівського випромінювання, а інші підтвердили існування змінних джерел рентгенівського випромінювання, включно з тими, що були виявлені раніше.

Стаття торкається різних астрофізичних тем, таких як еволюція нерівноважних шарів у оболонках нейтронних зірок, магнітно-ротаційні вибухи наднових і поширення електромагнітного випромінювання в гравітаційному полі чорних дір. Деякі з цих досліджень мали на меті пояснити хаотичні зміни світла та особливості рентгенівського випромінювання в небесних джерелах. Наводяться супутникові місії, які спостерігали спалахи гамма-випромінювання. Ці спостереження відкрили нові верхні межі частоти спалахів гамма-випромінювання та припустили їхнє ймовірне галактичне походження. Крім цього, наведено дослідження, які розглянули рентгенівське випромінювання від Сонця під час сонячних спалахів та коливання рівня рентгенівського випромінювання в активних областях. Виявлено кореляції між періодами коливань і площею сонячних плям. Дослідники отримали дані про потоки, спектральний склад і поляризацію жорсткого сонячного випромінювання, зокрема в областях резонансних ліній.

Підводячи підсумок, стаття містить вичерпний огляд спостережень, теоретичних досліджень та висновків, пов'язаних з рентгенівським випромінюванням від різних небесних джерел, включаючи зірки, чорні діри

та Сонце. Вона охоплює широкий спектр астрофізичних явищ і методів дослідження в галузі рентгенівської астрономії [78].

Стаття «Про природу тонкої структури активних областей на Сонці» (англ. – On the Nature of Fine Structure of Active Regions on the Sun) була опублікована в «Працях Міжнародного астрономічного союзу» в 1960 році [79].

У статті розглядається теоретичне дослідження явища, відомого як «вуса», яке характеризується рухом атомів водню, що випромінюють світло з високими швидкостями (500-1000 км/с). Автор припускає, що вуса утворюються в активних областях, у вигляді невеликих порцій або «вузликів» речовини, що швидко рухається. Ці вузли взаємодіють з навколишньою фотосферною плазмою через непружні зіткнення та явища ударного фронту. Збудження атомів водню у вусах відбувається через передачу енергії від збуджених атомів водню всередині вузлів, що швидко рухаються, до атомів у фотосферній плазмі. Автор припускає, що нестабільність плазми в магнітних полях є ймовірним джерелом феномена вусів. Це підкреслює подібність між вусами та плазмонами, припускаючи, що магнітна енергія в активних областях може бути основним джерелом енергії для вусів.

Підводячи підсумок, стаття досліджує теоретичні основи «вусів» і припускає, що ці високошвидкісні викиди водню пов'язані із взаємодією швидко рухомих вузлів матерії з фотосферною плазмою. Магнітна енергія активних областей і нестабільність плазми в магнітних полях пропонуються як потенційні джерела енергії для явища. Крім того, у статті згадується можливість прискорення частинок у хромосфері, хоча це менш імовірно у фотосфері через втрати на іонізацію.

Стаття «Можливе спостереження монохроматичного радіовипромінювання міжзоряних молекул» (англ. – Possible Observation of

Monochromatic Radioemission from Interstellar Molecules) була представлена на Міжнародній астрофізичній конференції в 1954 році [80].

У даній статті обговорюється важливість розуміння молекулярного складу міжзоряного середовища та те, як радіоастрономія може надати цінну інформацію про міжзоряні молекули.

Науковий текст починається з підкреслення важливості вирішення проблеми конденсації міжзоряного газу в тверді частинки в космогонії (галузь науки, в якій вивчається походження і розвиток небесних тіл та їхніх систем). Щоб вирішити цю проблему, важливо мати повне розуміння молекулярних компонентів у міжзоряному середовищі. Відомо, що традиційні методи оптичної астрономії не дають достатньо даних про міжзоряні молекули. Радіоастрономія представлена як перспективний підхід до подолання цих обмежень.

Вчений згадує про можливість виявлення специфічних ліній у радіоспектрі Чумацького Шляху, на додаток до добре відомої лінії водню на 21 см. Очікується, що ці лінії викликані різними міжзоряними молекулами, особливо тими, що мають дозволені переходи між певними оберतालними станами. Відкриття цих ліній має особливе значення, особливо в темних туманностях, де очікується висока концентрація міжзоряних молекул. Це також натякає на потенціал виявлення інших радіоліній, у тому числі викликаних ізотопами молекул.

Огляд наукової спадщини Йосипа Шкловського свідчить про надзвичайно важливий внесок цього вченого у сферу радіоастрономії та астрофізики. Шкловський був піонером в галузі дослідження космічних радіоджерел, і його роботи визнані дотепер як класичні внески в цю область.

У своїх дослідженнях Шкловський звертав особливу увагу на дослідження космічних об'єктів, відкривши нові способи спостереження і аналізу радіохвильових випромінювань зір та інших астрономічних об'єктів.

Його роботи були і залишаються важливими джерелами наукового знання для сучасних дослідників астрофізики.

Важливим аспектом внеску Шкловського є його активна публікаційна діяльність, яка великою мірою сприяла поширенню його ідей та відкриттів серед наукової спільноти. Він був відомий своєю цілеспрямованістю та страстю до науки, що залишило великий слід у розвитку астрофізики.

У підсумку, наукова спадщина Йосипа Шкловського свідчить про великий внесок цього вченого в розвиток радіоастрономії та астрофізики. Він залишив незабутні сліди у цих галузях науки, вплинувши на подальший прогрес та наукові дослідження в цих сферах.

2.2) Вплив на розвиток радіоастрономії та суміжних галузей

Йосип Шкловський відомий своїм видатним внеском у розвиток радіоастрономії та суміжних галузей, таких як астрофізика та дослідження міжзоряного простору. Як він вплинув на розвиток цих галузей та як його наукові ідеї та досягнення сформували сучасну картину світу у цих галузях?

Почнемо з того, що вчений зіграв роль у створенні радіоастрономії, яку ми знаємо зараз. Йосип Шкловський – один з перших в історії наукових досліджень, хто використовував радіохвилі для вивчення космосу. Все почалося з відкриття радіоemisії в небі та пошуку радіохвильових сигналів, що надходили з космічного простору. Це відкрило перед вченими новий шлях досліджень всесвіту, радіоастрономія стала важливою галуззю науки.

Шкловський також вніс вагомий внесок у вивчення міжзоряного середовища. Він розглянув вплив міжзоряного середовища на радіохвилі та розробив моделі для опису цих процесів. Його дослідження розширили наукове розуміння міжзоряного простору та його впливу на радіоастрономію.

Крім того, вчений також відомий своєю роботою з пошуку іншого життя в космосі, як-от розробка методів для виявлення радіохвильових

сигналів від інших цивілізацій Всесвіту. Ця ідея стала основою для подальших досліджень пошуку позаземного життя та формування сучасної концепції SETI (Пошук позаземного інтелекту).

Пошук існування позаземного життя завжди був однією з найзахоплюючих галузей наукових досліджень. Людство завжди було зацікавлене можливістю існування інших цивілізацій у Всесвіті. Деякі з перших письмових згадок про позаземне життя датуються давньогрецькими філософами, але до 20-го століття, пошук базувався на спостереженнях та теоретичних розрахунках. Зараз існує спеціалізований науковий проект, спрямований на пошук інтелектуальних сигналів із космосу (SETI), який використовує радіотелескопи та сучасні технології для активного пошуку слідів позаземного життя.

Перші згадки проєкту SETI з'явилися наприкінці 1950-х років, коли вчені вперше почали розглядати можливість виявлення штучних сигналів із космосу [81]. Проєкт став широко відомим завдяки роботі Френка Дрейка, відомого астронома і дослідника позаземного життя. Вчений розробив «Рівняння Дрейка», яке оцінює кількість розумних цивілізацій у галактиці та шанси на контакт з ними.

SETI використовує радіотелескопи для пошуку сигналів з космосу. Один з основних методів – це пошук радіосигналів, які мають характерні особливості, що не можуть бути пояснені природними явищами. Це можуть бути регулярні, повторювані сигнали або сигнали зі специфічними частотами, які важко пояснити без участі інтелекту.

Декілька проєктів SETI активно ведуть пошук сигналів з космосу. Один із найбільш відомих проєктів – це SETI@home, який дозволяє добровольцям з усього світу приєднатися до пошуку, використовуючи їхні особисті комп'ютери для аналізу даних (наразі призупинений [82]). Ще один проєкт, Breakthrough Listen, спонсорований мільярдером Юрієм Мільнером, отримав велику кількість фінансування для пошуку інтелектуальних сигналів [83].

SETI залишається однією з найбільш захоплюючих і загадкових галузей наукових досліджень. Пошук інтелектуальних сигналів із космосу може розкрити перед нами таємницю існування інших цивілізацій у Всесвіті. Проект SETI обіцяє багато захоплюючих відкриттів та можливість відкриття позаземного життя, що вплине на наше розуміння місця людини у Всесвіті.

Отже, наукова спадщина Йосипа Шкловського є важливим внеском у сучасну астрофізику та радіоастрономію. Вчений відіграв велику роль у розвитку ідеї пошуку позаземного життя і вивченні молекулярного складу міжзоряного середовища.

Праці Шкловського покликані надихнути нове покоління астрофізиків та дослідників позаземного життя. Його внесок у вивчення Всесвіту лишається актуальним і важливим для наукового світу. Робота вченого заслуговує на увагу завдяки його пророчим ідеям і підходам до вивчення космосу. Він активно просував ідеї SETI, що сприяло створенню численних проєктів для пошуку позаземного життя.

У світлі його наукових досягнень і спостережень Йосип Шкловський залишається пам'ятною постаттю в історії науки та розвитку астрофізики.

ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена науковій спадщині Йосипа Шкловського. Метою роботи є висвітлення вченого як відомого астрофізика, розгляд його наукових досягнень та відкриттів, а також їх ролі у розвитку науки.

Астрономія вивчає небесні тіла за допомогою оптичних телескопів та інших приладів. Вона досліджує рух, властивості, склад і походження небесних об'єктів, а також розвиває теорії та моделі, щоб пояснити природу Всесвіту. Астрономи вивчають зорі, планети, галактики, чорні діри, темну матерію та інші астрономічні тіла та явища.

Робота починається з теоретичного огляду розділу науки, якому присвячені здобутки вченого – радіоастрономії. Радіоастрономія вивчає небесні об'єкти за їх електромагнітним випромінюванням. Спостереження космосу оптичним способом не надає вичерпних відповідей щодо виникаючих в науці питань, але дослідження електромагнітного випромінювання космічних об'єктів може це компенсувати.

Радіоастрономія застосовує різні методи для спостереження космічних об'єктів у радіоспектрі. Це залежить від потужності сигналу та бажаного рівня точності. Основним інструментом вважається радіотелескоп – інструмент у вигляді спеціалізованої антени і радіоприймача (радіометра), який використовуються для дослідження радіочастотної частини електромагнітного спектра, що випромінюється астрономічними об'єктами. Складність досягнення високої роздільної здатності за допомогою окремих радіотелескопів привела до виникнення радіоінтерферометрії – об'єднання сигналів від кількох антен таким чином, щоб вони імітували більшу антену, з метою досягнення більшої роздільної здатності. З розвитком технологій відбулося і підвищення характеристик техніки, що дозволило об'єднувати радіотелескопи на великих (міжконтинентальних) відстанях для проведення «радіоінтерферометрії з наддовгою базою» (VLBI). Великі відстані між телескопами дозволяють досягти дуже високої кутової роздільної здатності.

Використовуючи цей метод, можна створити масив антен, який працює як одна велика радіоантена планетарних розмірів. Радіоінтерферометрія з наддовгою базою використовується для отримання зображень віддалених космічних радіоджерел, відстеження космічних апаратів, а також знаходить застосування в астрометрії – розділі астрономії, який вивчає геометричні та кінематичні властивості небесних тіл.

Використання радіоастрономії призвело до значного збільшення астрономічних знань, за рахунок відкриття нових класів астрономічних об'єктів – пульсарів, квазарів, радіогалактик. Це пояснюється тим, що радіоастрономія дозволяє сприймати космічні об'єкти, недоступні для оптичної астрономії – деякі астрономічні джерела радіовипромінювання (космічний об'єкт, який випромінює сильні радіохвилі) як-от зірки можна спостерігати і оптично, але далеко не всі космічні об'єкти можна зафіксувати таким чином.

Другий розділ присвячений огляду наукової спадщини Шкловського – книг та наукових статей. Результати свідчать про надзвичайно важливий внесок вченого у сферу радіоастрономії та астрофізики. Йосип Шкловський був піонером в галузі дослідження космічних радіоджерел, і його роботи визнані дотепер як класичні внески в цю область. У своїх дослідженнях Шкловський звертав особливу увагу на дослідження космічних об'єктів, відкривши нові способи спостереження і аналізу радіохвильових випромінювань зір та інших астрономічних об'єктів. Його роботи були і залишаються важливими джерелами наукового знання для сучасних дослідників астрофізики.

Наукова діяльність Йосипа Шкловського є важливим внеском у сучасну астрофізику та радіоастрономію. Вчений відіграв велику роль у розвитку ідеї пошуку позаземного життя і вивченні молекулярного складу міжзоряного середовища.

Праці Шкловського покликані надихнути нове покоління астрофізиків та дослідників позаземного життя. Його внесок у вивчення Всесвіту

лишається актуальним і важливим для наукового світу. Робота вченого заслуговує на увагу завдяки його пророчим ідеям і підходам до вивчення космосу. Він активно просував ідеї SETI, що сприяло створенню численних проєктів для пошуку позаземного життя.

У світлі його наукових досягнень і спостережень Йосип Шкловський залишається пам'ятною постаттю в історії науки та розвитку астрофізики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The Science of Radio Astronomy. *National Radio Astronomy Observatory*. URL: <https://public.nrao.edu/radio-astronomy/the-science-of-radio-astronomy/> (дата звернення: 20.03.2023).
2. World of Scientific Discovery on Karl Jansky. *Bookrags*. URL: <http://www.bookrags.com/biography/karl-jansky-wsd/#gsc.tab=0> (дата звернення: 20.03.2023).
3. Radio Waves from Outside the Solar System. *Nature*. URL: <https://www.nature.com/articles/132066a0> (дата звернення: 20.03.2023).
4. Karl Jansky and the Discovery of Cosmic Radio Waves. *American Astronomical Society*. URL: <https://aas.org/posts/news/2018/07/month-astronomical-history-1> (дата звернення: 20.03.2023).
5. A Note on the Source of Interstellar Interference. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1685771> (дата звернення: 20.03.2023).
6. Grote Reber and his Radio Telescope. *National Radio Astronomy Observatory*. URL: https://web.archive.org/web/20200807095454/https://www.nrao.edu/whatisra/hist_reber.shtml (дата звернення: 20.03.2023).
7. The Radio Universe. *IOPscience*. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9112/27/9/043/meta> (дата звернення: 20.03.2023).
8. British radio astronomy's birthplace: Stanley Hey's radio observatory in Richmond Park. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AntAs..15...2B/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
9. Cyg A – Seyfert 2 Galaxy. *Strasbourg astronomical Data Center*. URL: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=NAME+Cygnus+A> (дата звернення: 20.03.2023).

10. Radio Astronomy. *University of Cambridge*. URL: <https://web.archive.org/web/20131110022209/http://www.phy.cam.ac.uk/history/years/radioast.php> (дата звернення: 20.03.2023).
11. How Do Radio Telescopes Function?. *Wondrium Daily*. URL: <https://www.wondriumdaily.com/how-do-radio-telescopes-function/> (дата звернення: 20.03.2023).
12. The Karl G. Jansky Very Large Array. *National Radio Astronomy Observatory*. URL: <https://science.nrao.edu/facilities/vla/> (дата звернення: 20.03.2023).
13. Open Spectrum: A Path to Ubiquitous Connectivity. *ACM Queue*. URL: <https://web.archive.org/web/20080621000315/http://www.acmqueue.org/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=37> (дата звернення: 20.03.2023).
14. Frequencies for Radio Astronomy & Space Science (IUCAF). *International Science Council*. URL: <https://council.science/what-we-do/affiliated-bodies/frequencies-for-radio-astronomy-space-science-iucaf/> (дата звернення: 20.03.2023).
15. Dr Elizabeth Alexander: first female radio astronomer. *Academia.edu*. URL: https://www.academia.edu/478168/Dr_Elizabeth_Alexander_first_female_radio_astronomer (дата звернення: 20.03.2023).
16. Radio astronomy. *Profilpelajar*. URL: https://profilpelajar.com/article/Radio_astronomy (дата звернення: 20.03.2023).
17. Demonstrating the Principles of Aperture Synthesis with TableTop Laboratory Exercises. *EPJ Web of Conferences*. URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2019/05/epjconf_ise2a2017_02004.pdf (дата звернення: 20.03.2023).
18. Baseline. *COSMOS*. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/b/Baseline> (дата звернення: 20.03.2023).
19. Microwave Probing of the Invisible. *Caltech: Division of Geological and Planetary Sciences*. URL:

- <https://web.archive.org/web/20070831223606/http://www.gps.caltech.edu/faculty/muhleman/muhleman.html> (дата звернення: 20.03.2023).
20. Interferometric Observation of Cosmic Microwave Background Anisotropies. *IOPscience*. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/306911/fulltext/37664.text.html> (дата звернення: 20.03.2023).
21. What is a Visibility?. *California Institute of Technology*. URL: <https://nexsci.caltech.edu/software/KISupport/v2tutorial.html> (дата звернення: 20.03.2023).
22. The Moments of the Brightness Distribution of a Radio Source. *Oxford Academic*. URL: <https://academic.oup.com/mnras/article/175/3/461/1021417> (дата звернення: 20.03.2023).
23. A Phase Sensitive Interferometer Technique for the Measurement of the Fourier Transforms of Spatial Brightness Distributions of Small Angular Extent. *Oxford Academic*. URL: <https://academic.oup.com/mnras/article/118/3/276/2602209> (дата звернення: 20.03.2023).
24. When, why, and how to do self-calibration. *National Radio Astronomy Observatory*. URL: https://science.nrao.edu/facilities/alma/naasc-workshops/nrao-cd-wm16/Selfcal_Madison.pdf (дата звернення: 20.03.2023).
25. Geodesy with VLBI. *International VLBI Service*. URL: <https://vlbi.org/welcome-to-the-ivs/information/geodesy-with-vlbi/> (дата звернення: 20.03.2023).
26. Very Long Baseline Array. *National Radio Astronomy Observatory*. URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vlba/> (дата звернення: 20.03.2023).
27. About the EVN. *The European VLBI Network*. URL: <https://www.evlbi.org/> (дата звернення: 20.03.2023).
28. Radar Mapping of the Solar System. *Encyclopedia.com*. URL: <https://www.encyclopedia.com/science/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/radar-mapping-solar-system> (дата звернення: 20.03.2023).

29. Observations of the Spectrum of High-Intensity Solar Radiation at Metre Wavelengths. I. The Apparatus and Spectral Types of Solar Burst Observed. *CSIRO Publishing*. URL: <https://www.publish.csiro.au/ch/CH9500387> (дата звернення: 20.03.2023).
30. Solar type I noise storms and newly emerging magnetic flux. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982A%26A...105..221S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
31. Polarization Measurements of the Three Spectral Types of Solar Radio Burst. *CSIRO Publishing*. URL: <https://www.publish.csiro.au/ph/ph580201> (дата звернення: 20.03.2023).
32. Herringbone bursts associated with type II solar radio emission. *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/23579642_Herringbone_bursts_associated_with_type_II_solar_radio_emission (дата звернення: 20.03.2023).
33. A review of solar type III radio bursts. *IOPscience*. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/14/7/003> (дата звернення: 20.03.2023).
34. Variable emission mechanism of a Type IV radio burst. *Astronomy & Astrophysics*. URL: https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2019/03/aa34510-18/aa34510-18.html (дата звернення: 20.03.2023).
35. A study of Type V solar radio bursts - Observations. *Astrophysics Data System*. URL: <https://adsabs.harvard.edu/full/1977SoPh...55..459R> (дата звернення: 20.03.2023).
36. The position and polarization of Type V solar bursts. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980A%26A....88..218D/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).

37. Radio Emission from the Sun and Stars. *Annual Reviews*. URL: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.aa.23.090185.001125> (дата звернення: 20.03.2023).
38. Black Hole Hunters. *The New York Times*. URL: <https://www.nytimes.com/2015/06/09/science/black-hole-event-horizon-telescope.html> (дата звернення: 20.03.2023).
39. Black holes. *ClearlyExplained*. URL: <https://clearlyexplained.com/black-holes/> (дата звернення: 20.03.2023).
40. Pulsar. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/pulsar> (дата звернення: 20.03.2023).
41. Binary Pulsars. *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/binary-pulsars> (дата звернення: 20.03.2023).
42. International Celestial Reference System (ICRS). *Astronomical Applications Department*. URL: https://aa.usno.navy.mil/faq/ICRS_doc (дата звернення: 20.03.2023).
43. The Astrophysical Journal. *IOPscience*. URL: <https://iopscience.iop.org/journal/0004-637X> (дата звернення: 20.03.2023).
44. V* V818 Sco - Low Mass X-ray Binary. *Strasbourg astronomical Data Center*. URL: <https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-id?Ident=V818+Sco> (дата звернення: 20.03.2023).
45. On the Nature of the Source of X-Ray Emission of Sco XR-1. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1967ApJ...148L...1S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
46. Cosmic Radio Waves. *De Gruyter*. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.4159/harvard.9780674423916/html> (дата звернення: 20.03.2023).
47. The Astrophysical Journal Letters. *IOPscience*. URL: <https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205> (дата звернення: 20.03.2023).

48. On the Nature of the Galactic Halo. *Astrophysics Data System*. URL: <https://adsabs.harvard.edu/full/1958RvMP...30..935P> (дата звернення: 20.03.2023).
49. On the problem of the nature of the gas corona of the galaxy. *Astrophysics Data System*. URL: <https://adsabs.harvard.edu/full/1959AnAp...22..913P> (дата звернення: 20.03.2023).
50. Symposium – International Astronomical Union, Non-Stable Stars. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/volume/CBF19619962B637968FE64CDBF65C3E1> (дата звернення: 20.03.2023).
51. Symposium - International Astronomical Union, Extragalactic Radio Sources. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/volume/51B7980B90112BBFA125DEDB7058905C?pageNum=7> (дата звернення: 20.03.2023).
52. Is Cassiopeia A a black hole?. *Nature*. URL: <https://www.nature.com/articles/279703a0> (дата звернення: 20.03.2023).
53. Is Cassiopeia A a black hole?. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979Natur.279..703S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
54. Age of Pulsar PSR 0833–45. *Nature*. URL: <https://www.nature.com/articles/225252a0> (дата звернення: 20.03.2023).
55. Nature of Emission from Pulsar NP 0532. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1970Natur.225..251S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
56. Symposium - International Astronomical Union, Cosmical Gas Dynamics. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/volume/51B7980B90112BBFA125DEDB7058905C?pageNum=7>

- [union/volume/D10F4CE4A7A79255FBFED027AA3D9362](https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/article/35-optical-emission-from-the-crab-nebula-in-the-continuous-spectrum/EFEC5A1D57315FD2EDA39B647044E35B) (дата звернення: 20.03.2023).
57. Optical emission from the Crab nebula in the continuous spectrum. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/article/35-optical-emission-from-the-crab-nebula-in-the-continuous-spectrum/EFEC5A1D57315FD2EDA39B647044E35B> (дата звернення: 20.03.2023).
58. The mass loss of SS 433 and its effect on the X-ray and radio emission of this source. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981AZh....58..554S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
59. Pulsars and Type II Supernovae. *Astrophysics Data System*. URL: <https://adsabs.harvard.edu/full/1971ApL.....8..101S> (дата звернення: 20.03.2023).
60. The nature of planetary nebulae and their nuclei. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1956AZh....33..315S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
61. On Fast Corpuscles of the Upper Atmosphere. *Springer*. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-39914-9_41 (дата звернення: 20.03.2023).
62. On the Nature of the Tycho X-ray Source. *Nature*. URL: <https://www.nature.com/articles/238144a0> (дата звернення: 20.03.2023).
63. An empirical model of the M 87 jet. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984AZh....61..833S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
64. On the Ejection of Gas from Active Nuclei of Galaxies. *Astrophysics Data System*. URL: <https://adsabs.harvard.edu/full/1972ApL....10....5S> (дата звернення: 20.03.2023).

65. Symposium - International Astronomical Union, Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/volume/F4636F0CE2A2617B48FEC36AC5E287BF> (дата звернення: 20.03.2023).
66. On the nature of the emission from the galaxy NGC 4486. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/article/53-on-the-nature-of-the-emission-from-the-galaxy-ngc-4486/EA858C516940BAAFF41077F54D4711DE> (дата звернення: 20.03.2023).
67. Supernovae in multiple systems. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980AZh....57..673S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
68. Supernovae in Multiple Systems. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980SvA....24..387S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
69. Symposium - International Astronomical Union, External Galaxies and Quasi-Stellar Objects. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/volume/C9D1373CD922AE8141742AEAA344ED5F> (дата звернення: 20.03.2023).
70. The Law of Momentum Conservation and Some Problems of Metagalactic Astronomy. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/article/law-of-momentum-conservation-and-some-problems-of-metagalactic-astronomy/5BD7D5581245D3C71BD217035FC5698B> (дата звернення: 20.03.2023).
71. Some problems of meta-galactic radio-emission. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international->

- astronomical-union/article/43-some-problems-of-metagalactic-radioemission/8D127BA826E8EDA11CA2367EFEC2BFAF (дата звернення: 20.03.2023).
72. Monochromatic Radio Emission from the Galaxy and the Possibility of its Observation. *Springer*. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-7752-5_35 (дата звернення: 20.03.2023).
73. Review of Publications – Cosmic Radio Waves. *Astrophysics Data System*. URL: <https://adsabs.harvard.edu/full/1961JRASC..55...91S> (дата звернення: 20.03.2023).
74. Symposium – International Astronomical Union, Early Evolution of the Universe and Its Present Structure. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomical-union/volume/462154D9B6A1CEF819084B01DBB60688> (дата звернення: 20.03.2023).
75. Evolutionary effect in quasars as a consequence of galaxy formation process. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/5A857CBFEA4A5482045CF1499AF3B497/S007418090003936Xa.pdf> (дата звернення: 20.03.2023).
76. Estimate of the ionization and mass of the envelopes of type I supernovae on the basis of the radioactive-decay hypothesis. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981AZh....58.1017S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
77. Estimate of the ionization and mass of the envelopes of type I supernovae on the basis of the radioactive-decay hypothesis. *Astrophysics Data System*. URL: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1981SvA....25..578S> (дата звернення: 20.03.2023).

78. High Energy Astrophysics (L' Astrophysique de Grande Energie). *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/transactions-of-the-international-astronomical-union/article/48-high-energy-astrophysics-l-astrophysique-de-grande-energie/9323245926393EEDDC6E8080B40B62F5> (дата звернення: 20.03.2023).
79. On the Nature of Fine Structure of Active Regions on the Sun. *Cambridge Core*. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/transactions-of-the-international-astronomical-union/article/12-on-the-nature-of-fine-structure-of-active-regions-on-the-sun/8EEE584F999BC6A22D9F598073FB4455> (дата звернення: 20.03.2023).
80. Possible Observation of Monochromatic Radioemission from Interstellar Molecules. *Astrophysics Data System*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1955LIACo...6..675S/abstract> (дата звернення: 20.03.2023).
81. Searching for Interstellar Communications. *Nature*. URL: <https://www.nature.com/articles/184844a0> (дата звернення: 20.03.2023).
82. SETI@home is in hibernation. *SETI@home*. URL: <https://setiathome.berkeley.edu/> (дата звернення: 20.03.2023).
83. Breakthrough Initiatives. URL: <https://breakthroughinitiatives.org/initiative/1> (дата звернення: 20.03.2023).