

## МІЖЗОРЯНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ТА ДЕКАМЕТРОВА РАДІОСПЕКТРОСКОПІЯ

Присвячується 110-річчю Семена Яковича Брауде  
та 50-річчю радіотелескопа УТР-2

*Предмет і мета роботи: Аналітичний огляд головних результатів досліджень у новому напрямі низькочастотної радіоастрономії – радіоспектроскопії міжзоряного середовища на декаметрових хвилях, що привів до астрофізичного відкриття – реєстрації рекомбінаційних радіоліній у поглинанні для високозбуджених станів міжзоряних атомів вуглецю (головні квантові числа більше 600).*

*Методи і методологія: Використано найбільший у світі широкопasmовий радіотелескоп декаметрових хвиль УТР-2, оптимально під'єднаний до цифрових кореляційних спектроаналізаторів. Постійна модернізація антени та приладів дозволила розширити смугу аналізу від 100 кГц до 24 МГц та збільшити кількість каналів від 32 до 8192. Радіотелескоп та приймальна апаратура з відповідним програмним забезпеченням дозволили отримати великий час ефективного накопичення для великої серії ліній одночасно з високими роздільною здатністю, завадостійкістю та відносною чутливістю.*

*Результати: Відкрито та досліджено міжзоряні спектральні лінії нового типу – міжзоряні рекомбінаційні радіолінії вуглецю у поглинанні для рекордно високозбуджених атомів із головними квантовими числами понад 1000.*

*З'ясовано параметри ліній (інтенсивність, форма, ширина, променева швидкість) та їх зв'язок з фізичними параметрами міжзоряного середовища. Температура областей формування ліній становить близько 100 К, електронна концентрація – до  $0.1 \text{ см}^{-3}$ , розмір – близько 10 пк. Вперше рекомбінаційні радіолінії спостерігались у поглинанні, мають значне розширення, підсилюються механізмом діелектронної рекомбінації та є найбільш низькочастотними в атомній спектроскопії.*

*Висновки: Зареєстровані низькочастотні рекомбінаційні радіолінії вуглецю та їх спостереження стали новим високо-ефективним засобом діагностики холодної частково іонізованої міжзоряної плазми. За їх допомогою можливо отримувати інформацію, недоступну іншим методам астрофізики. За майже півстоліття досліджень отримано величезний обсяг апаратно-методичних та астрофізичних результатів, включно з рекордною кількістю об'єктів Галактики, де були зареєстровані відповідні лінії. Вітчизняні досягнення стимулювали багато теоретичних та експериментальних досліджень закордоном, але науковий доробок українських вчених доводить найкращі перспективи подальшого розвитку цього вельми актуального напрямку астрономічної науки.*

*Ключові слова: низькочастотна радіоастрономія, радіотелескоп, міжзоряне середовище, рекомбінаційні радіолінії, вуглець, водень, спектроаналізатор*

### 1. Вступ

Вивчення міжзоряного середовища (МЗС) є важливою та невід'ємною частиною сучасної астрофізики [1, 2]. І хоч маса речовини, що знаходиться у просторі між зірками, становить лише близько трьох відсотків від усєї маси Галактики, вона відіграє велику роль у фізичних процесах та еволюції Всесвіту. МЗС вкрай неоднорідне. Понад дев'яносто відсотків його об'єму займають молекулярні та атомарні хмари, плазмові утворення, різноманітні фізичні поля випромінювання та пилові частки. Безперервно відбувається обмін енергією і речовиною між компо-

нентами МЗС та іншими об'єктами Галактики. В одних ділянках МЗС зорі народжуються, в інших зорі, що завершили життєвий цикл, вибухають у вигляді наднових і повертають збагачену важкими елементами речовину в МЗС.

Найефективніші методи дослідження МЗС дала радіоастрономія [1, 3], а саме радіоспектроскопія, в лініях нейтрального водню HI (на частоті 1420 МГц), в сотнях типів молекул (на частотах  $1.6 \div 300$  ГГц), а також в рекомбінаційних радіолініях (РРЛ). До появи робіт українських радіоастрономів вважалось, що на частотах нижче 300 МГц лінії останнього типу взагалі не

можуть спостерігатися, хоча було чимало спроб їх зареєструвати. РРЛ виникають під час переходу збуджених електронів між різними енергетичними рівнями в атомах і є наслідком процесу рекомбінації електронів та іонів. Можливість їх виявлення в радіодіапазоні довго дискутувалась, але вони зрештою були виявлені в гарячому газі на високих частотах ( $> 1000$  МГц) у середині 1960-х рр. [4, 5].

У представленому короткому огляді наведено основні результати майже півстолітніх вітчизняних досліджень в галузі радіоспектроскопії МЗС на декаметрових хвилях. Цей новий напрям декаметрової радіоастрономії привів до астрофізичного відкриття – несподіваної реєстрації низькочастотних спектральних ліній нового типу в МЗС.

## 2. Відкриття РРЛ вуглецю на декаметрових хвилях у напрямку радіоджерела Кассіопея А

Нову сторінку в дослідженнях РРЛ відкрило несподіване виявлення харківськими дослідниками у 1970-х рр. феномену високозбуджених станів міжзоряних атомів вуглецю, що супроводжується спостереженням ліній поглинання в діапазоні декаметрових хвиль за допомогою унікального радіотелескопа УТР-2 [6–9]. Це відкриття було зроблене під час інноваційних спектроскопічних спостережень у напрямку потужного радіоджерела – залишку надвоєї Кассіопея А, низькочастотне радіовипромінювання якого “зондує” середовище на промені зору до спостерігача.

Якщо гарячий міжзоряний газ впродовж чималого часу досліджувався багатьма методами, то параметри холодних хмар (які є основою галактичних рукавів), ступінь їх іонізації та тепловий стан були фактично невідомими. Але українські радіоастрономи довели справедливість і ефективність нової методології, що ґрунтується на використанні методів низькочастотної радіоспектроскопії. Це дозволило переглянути основи фізики холодної міжзоряної плазми. Було з’ясовано, що майже всі холодні міжзоряні хмари (і молекулярні, і атомарні) є частково іонізованими завдяки присутності таких елементів, як вуглець, сірка та інші, що мають потенціал іонізації нижчий, ніж у водню. Вуглець, найпоширеніший з цих елементів, генерує придатні для виявлення РРЛ у діапазоні частот  $12 \div 1400$  МГц, які відповідають переходам між станами з головними

квантовими числами близько  $n = 900 \div 200$  відповідно. Спостереження цих РРЛ вуглецю разом із вивченням спектральних ліній інших елементів (у першу чергу ліній нейтрального водню НІ) виявилось вкрай зручним методом діагностики фізичних умов у холодному МЗС [10, 11], які є найрізноманітнішими. Те ж саме можна сказати й про фізичні процеси, що мають місце в МЗС. Як приклад можна навести перші стадії виникнення галактичних хмар і подальшого народження зірок (так звана нестійкість Релея–Тейлора).

Особлива роль атомів вуглецю у МЗС пояснюється тим, що вуглець є найбільш поширеним елементом, що має потенціал іонізації менший, ніж у водню (міжзоряна ряснота вуглецю відносно рясноти водню  $C/H$  складає  $3.7 \cdot 10^{-4}$ , енергія іонізації вуглецю  $E_C = 11.2$  еВ, енергія іонізації водню  $E_H = 13.6$  еВ); він є майже повністю іонізованим у розрідженому міжзоряному газі; вуглець є головним фактором, що визначає термостатичні процеси в хмарах нейтрального водню завдяки переходу тонкої структури іонів вуглецю  $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ ; більша частка міжзоряних молекул містить атоми вуглецю; вуглець відіграє значну роль у хімічних реакціях у газовій фазі та ефективно віддзеркалює фізичні процеси у МЗС.

На рис. 1 зображена схема збуджених атомів, які генерують РРЛ, включно з рекордно високозбудженими станами на рівнях  $n > 600$ , що були відкриті в Україні під час радіоспектроскопічних пошукових спостережень на УТР-2 більш ніж 40 років тому.

На рис. 2 наведено унікальний спектр, отриманий на початку 2000-х рр. у напрямку радіодже-

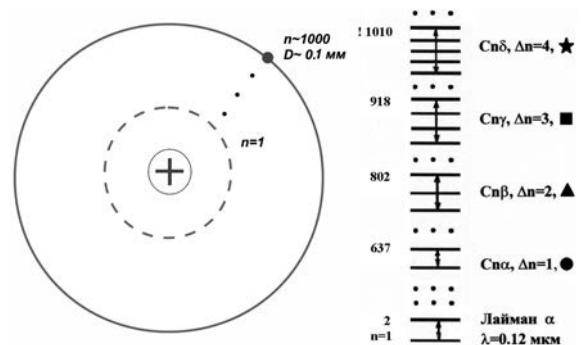


Рис. 1. Схематичне зображення рідбергівського атому, що в результаті процесу рекомбінації став нейтральним у високозбудженому стані (максимальне зареєстроване головне квантове число становить приблизно 1000)

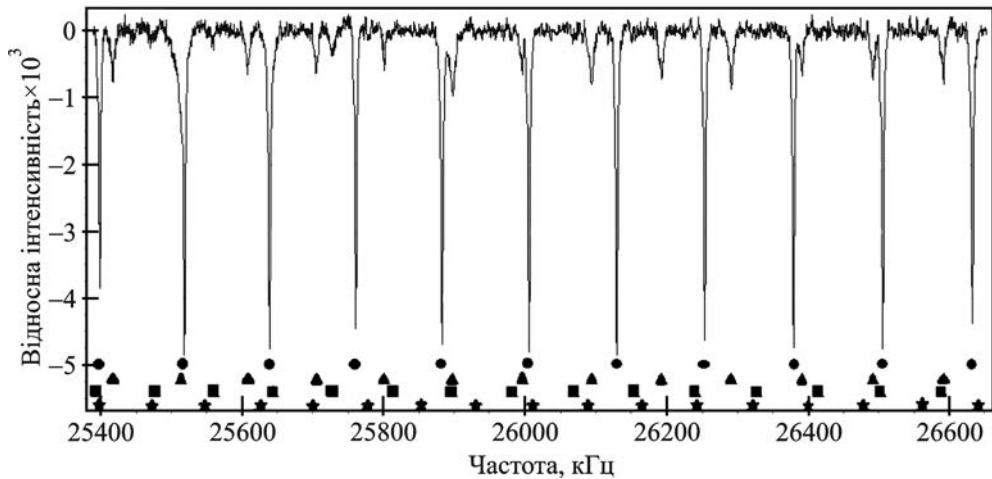


Рис. 2. РРЛ в напрямку Кассіопеї А поблизу частоти 26 МГц

рела Кассіопея А. Позначки у нижній частині рисунка відповідають положенням частот ліній тих типів, що наведені на рис. 1 праворуч. Позначкам ● відповідають частоти  $\alpha$ -переходів ( $\Delta n = 1$ ), ▲ –  $\beta$ -переходів ( $\Delta n = 2$ ), ■ –  $\gamma$ -переходів ( $\Delta n = 3$ ) і ★ –  $\delta$ -переходів ( $\Delta n = 4$ ). Під час цих досліджень були виявлені РРЛ, що відповідають рівням збудження атомів вуглецю зі значеннями головного квантового числа до  $n = 1009$  [12]. Це є неперевершеним рекордом українських радіоастрономів, який навряд чи буде повтореним. Спектри середніх профілів цих ліній наведено на рис. 3.

Параметри ліній (інтенсивність, ширина, форма профілів, радіальна швидкість) дають унікальну можливість визначити головні фізичні параметри значної частини МЗС [11], зокрема в галактичних рукавах Оріона та Персея, які лежать на промені зору в напрямку Кассіопеї А.

### 3. Об'єкти та методи досліджень декаметрової радіоспектроскопії

Визначення параметрів низькочастотних РРЛ надає потужний інструмент для дослідження фізичних умов у МЗС, що важливо, наприклад, для розвитку теорії зореутворення. Температура, електронна концентрація, тиск, щільність, механізми рекомбінації та іонізації, нагріву і охолодження в середовищі, швидкість та напрямок руху речовини, характер фонового випромінювання визначають інтенсивність та форму спектральних профілів. Інші астрофізичні методи вивчення холодної частково іонізованої плазми

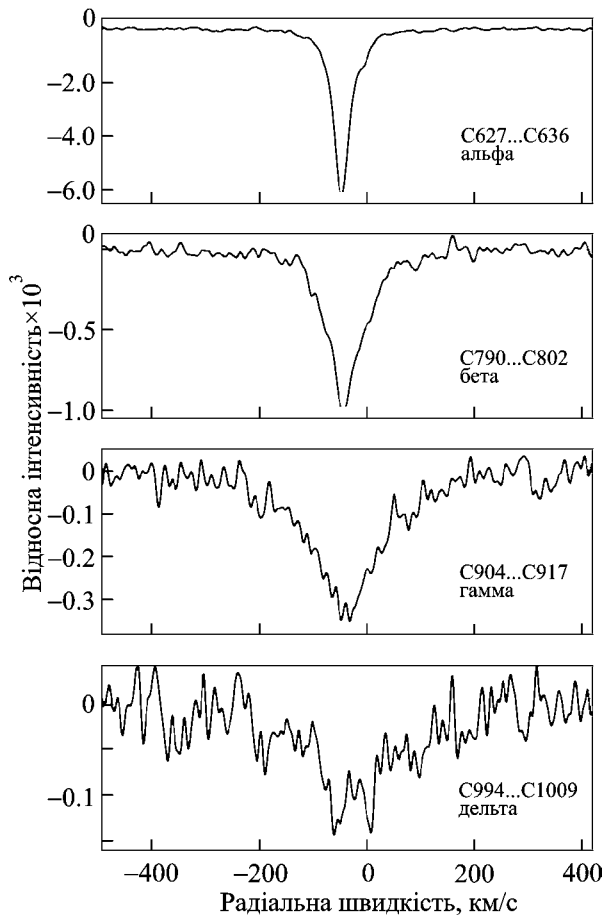


Рис. 3. Усереднені спектри  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  та  $\delta$  РРЛ для рекордно високих атомних рівнів у інтервалі  $n = 630 \div 1000$ , що були відкриті за допомогою радіотелескопу УТР-2

мають значно менші можливості. Наголосимо, що попри значні експериментальні труднощі детектування РРЛ, особливо на вкрай низьких частотах (ці труднощі значною мірою були по-

долані українськими радіоастрономами), теорія формування РРЛ була добре розвинена. Це відноситься до класичних розрахунків частот переходів у рідбергівських атомах, ізотопічного зсуву, сил осциляторів, формування доплерівських, лоренцівських та фойгтівських профілів ліній та їх розширення, коефіцієнтів неврівноваженості з урахуванням фізичних умов (включно з діелектронною рекомбінацією) у міжзоряних хмарах [5, 13–15]. Отже, є непогане підґрунтя для коректної астрофізичної інтерпретації результатів спостережень (див. рис. 4 та 5). При цьому вкрай

важливо правильно оцінювати параметри спостережуваних ліній з урахуванням параметрів радіотелескопів, апаратури, просторової геометрії експериментів в Галактиці [11].

Завдяки ретельному вимірюванню спостережних характеристик РРЛ було визначено фізичні параметри великої кількості хмар міжзоряної плазми [16–18]. Встановлено, що це досить тепле (порівняно з абсолютним нулем) середовище з електронною температурою близько 100 К та електронною густиною до  $0.1 \text{ см}^{-3}$ . Було виявлено незвичний механізм низькотемпературної діе-

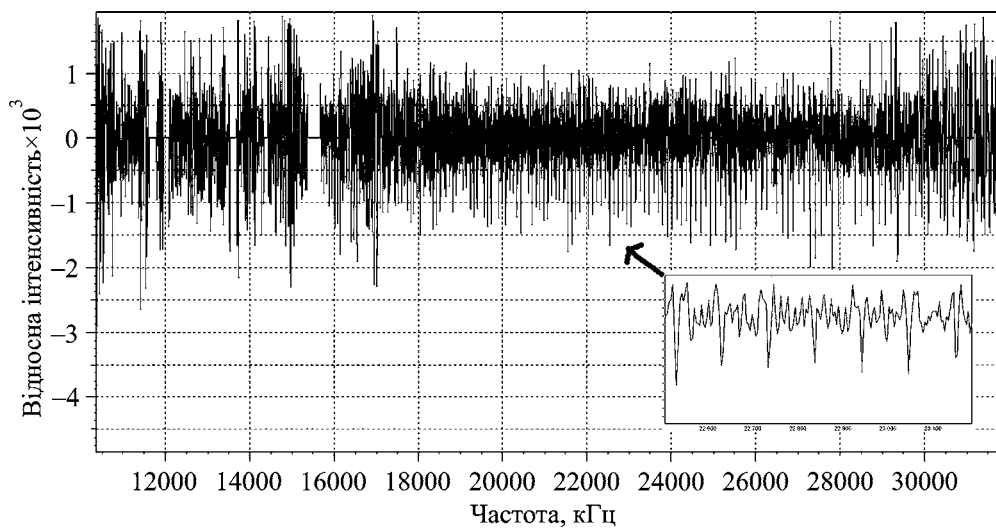


Рис. 4. РРЛ, виміряні у надширокій смузі частот  $10 \div 32$  МГц на радіотелескопі УТР-2

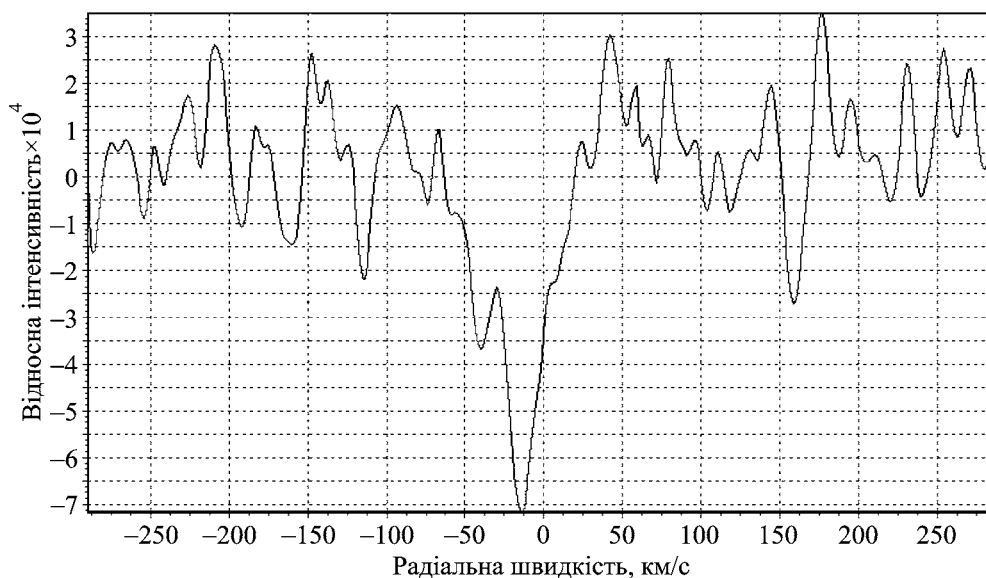


Рис. 5. Середній спектр РРЛ  $\text{C}627\alpha - \text{C}637\alpha$  у напрямку S140, вперше задетектований на низьких частотах за допомогою радіотелескопа УТР-2

електронної рекомбінації, що підсилює інтенсивності відповідних ліній у десятки разів, а також механізми розширення спектральних ліній. Ці механізми включають збільшення ширини спектральних ліній внаслідок зіткнення частинок речовини, впливу випромінювання галактичного фону та радіоджерел, а також ефекту Доплера.

Експериментальні методи декаметрової радіоспектроскопії впродовж майже півстоліття ґрунтуються на створенні декількох поколінь цифрових кореляційних аналізаторів спектра (з кількістю частотних каналів від 32 до 4096, смугами аналізу від 100 кГц до приблизно 1 МГц та частотною роздільною здатністю до 1 кГц) та на довготривалих спостереженнях серій спектральних ліній (одночасно від однієї до десяти) з максимальним використанням переваг гігантського Т-подібного радіотелескопа УТР-2 (висока чутливість та роздільна здатність, багатопроменевість, завадостійкість, широкосмуговість, електронне керування променем практично у всій напівсфері, повне покриття UV-площини). Вищевказані методи описані у багатьох наукових публікаціях та в оглядовій статті [19]. Для подальшого розвитку методології вкрай низькочастотних радіоспектроскопічних спостережень у Радіоастрономічному інституті НАН України впроваджено багаторозрядні багатоканальні спектроаналізатори на основі сучасних великих програмованих мікросхем. Розширення частотного діапазону спостережень до  $8 \div 32$  і

$8 \div 80$  МГц було досягнуто завдяки впровадженню в експлуатацію фур'є-аналізаторів реального часу DSP-Z (Digital Spectro-Polarimeter, type Z, 8192 каналів) та ADR (Advanced Digital Receiver, 16384 каналів) [20], а також перших секцій нового радіотелескопу ГУРТ [21]. На рис. 4 наведено нещодавно отриманий на УТР-2 спектр, де в смузі частот  $10 \div 32$  МГц присутні сотні РРЛ, що формуються в хмарах на промені зору в напрямку Кассіопеї А. Усереднення такої великої кількості одночасно спостережуваних ліній у десятки разів підвищує чутливість вимірювань, що дозволяє, зокрема, вивчати РРЛ з відносною інтенсивністю до  $10^{-5}$ .

#### 4. Нові можливості вивчення МЗС за допомогою низькочастотних РРЛ

Останніми роками за допомогою УТР-2 була доведена надзвичайна інформативність декаметрової радіоспектроскопії МЗС. Вдалося зареєструвати РРЛ у десятках напрямків у нашій Галактиці, що відкриває принципово нові можливості її діагностики. Спектри, виміряні в напрямках туманності S140 та галактичної площини, наведено на рис. 5 і рис. 6 відповідно. На рис. 7 показано результати спостережень у напрямках Галактики з координатами  $l = 10^\circ, b = 0^\circ$ ;  $l = 50^\circ, b = 0^\circ$ ;  $l = 80^\circ, b = 0^\circ$ . Відкриті на УТР-2 лінії поглинання вуглецю показані жирною лінією, емісійні лінії HI та CO – тонкою та штриховою лініями

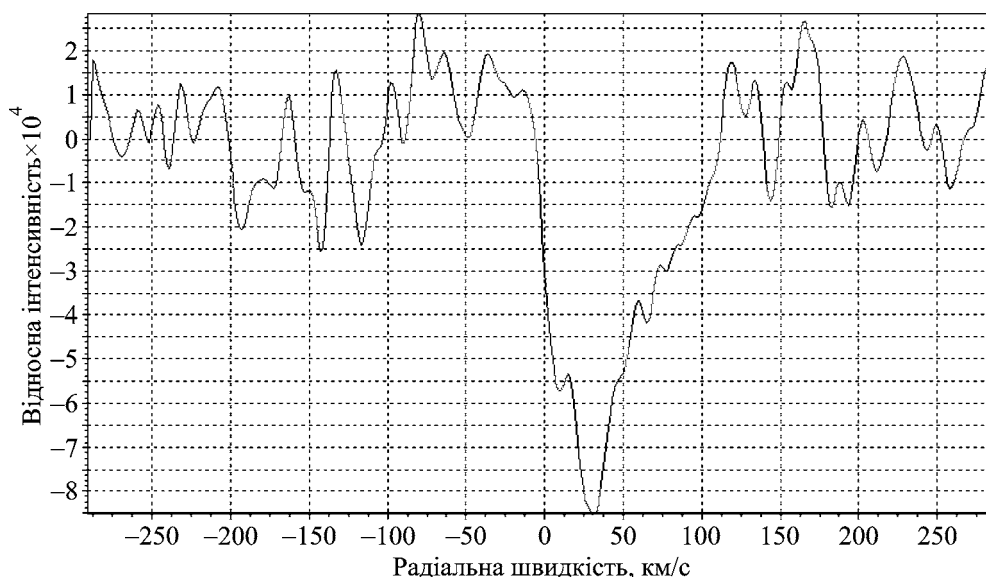


Рис. 6. Середній спектр РРЛ C627α – C636α у напрямку області Галактики з координатами  $l = 40^\circ, b = 0^\circ$

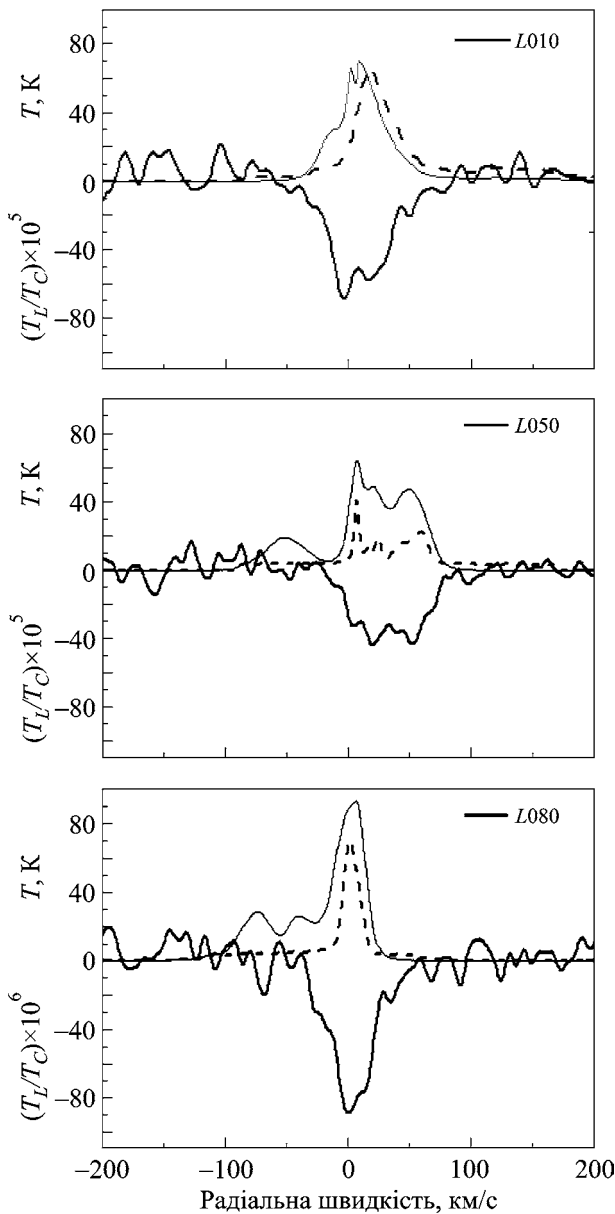


Рис. 7. РРЛ вуглецю, що виникають у хмарах СІ, порівняно з лініями нейтрального водню НІ та молекул СО

відповідно. Дані щодо ліній двох останніх типів взято з відомих спектральних оглядів височастотної радіоастрономії (1420 МГц і 114 ГГц).

Наведені малюнки доводять, що розподіл іонізованого вуглецю значно ближчий до розподілу нейтрального водню, ніж молекулярної речовини. Цей факт дозволив впровадити новий, найточніший метод визначення параметрів середовища, насамперед температури, щільності, розміру. У цьому методі, крім рівняння, що пов'язує інтенсивність ліній нейтрального водню з трьома фізичними параметрами, використовуються

ще два рівняння для інтенсивності РРЛ вуглецю та їх ширини з тими ж фізичними параметрами середовища (рис. 7).

Отже, кількість атомів водню на промені зору, яка визначає інтегральну інтенсивність лінії, становить [1]:

$$N_H \approx n_H s \approx 3.88 \cdot 10^{17} T_K \int \tau_H(v) dv,$$

де  $n_H$  – об'ємна концентрація водню,  $s$  – розмір міжзоряної хмари,  $T_K$  – її кінетична температура.

Цьому рівнянню властива досить велика неоднозначність у визначенні параметрів, можливі такі значення:  $T = 10 \div 1000$  К,  $s = 0.1 \div 100$  кпк,  $n_H = 1 \div 1000$  см<sup>-3</sup>.

Завдяки детектуванню РРЛ вуглецю в тій самій хмарі маємо [11]

$$I_C = \int \tau_C(v) dv = 2 \cdot 10^6 n_e^2 s (b_n \beta_n)_C / T_e^{2.5}, \quad (1)$$

де  $I_C$  – інтегральна інтенсивність РРЛ;  $n_e$  – електронна концентрація;  $T_e$  – електронна температура (в рівноважних умовах  $T_e = T_K$ );  $(b_n \beta_n)_C$  – коефіцієнти, що визначають населеність рівнів вуглецю (табульовані).

Третє рівняння пов'язує ширину ліній вуглецю з електронною концентрацією [13]:

$$\Delta v \sim n_e^{5.2} / T^{0.1},$$

де  $n \approx 640$ .

Оскільки в холодних міжзоряних хмарах вуглець повністю іонізований, а кількість атомів (іонів) вуглецю відносно атомів водню добре відома ( $n_e \approx 3 \cdot 10^{-4} n_H$ ), фізичні параметри хмар визначаються точніше. У багатьох випадках вони наступні:  $n_H \approx 100$  см<sup>-3</sup>,  $n_e \approx 0.03$  см<sup>-3</sup>,  $T_K = T_e \approx 75$  К,  $s \approx 10$  пк.

## 5. Реєстрація РРЛ водню у поглинанні на декаметрових хвилях

Важливо зазначити, що на нижній межі діапазону радіоастрономічних спектроскопічних досліджень донедавна виявлялися лише РРЛ вуглецю. РРЛ найпоширенішого у Всесвіті елемента – водню – дотепер на декаметрових хвилях не спостерігались. Це пов'язано з тим, що вуглець має менший потенціал іонізації, ніж водень, тому останній залишається майже повністю нейтральним у холодній розрідже-

ній міжзоряній плазмі. Але унікальні можливості радіотелескопу УТР-2 дозволили зареєструвати найнижчочастотніші спектральні лінії

водню у МЗС. На рис. 8 наведено відповідні нещодавно відкриті спектри альфа-ліній водню і вуглецю.

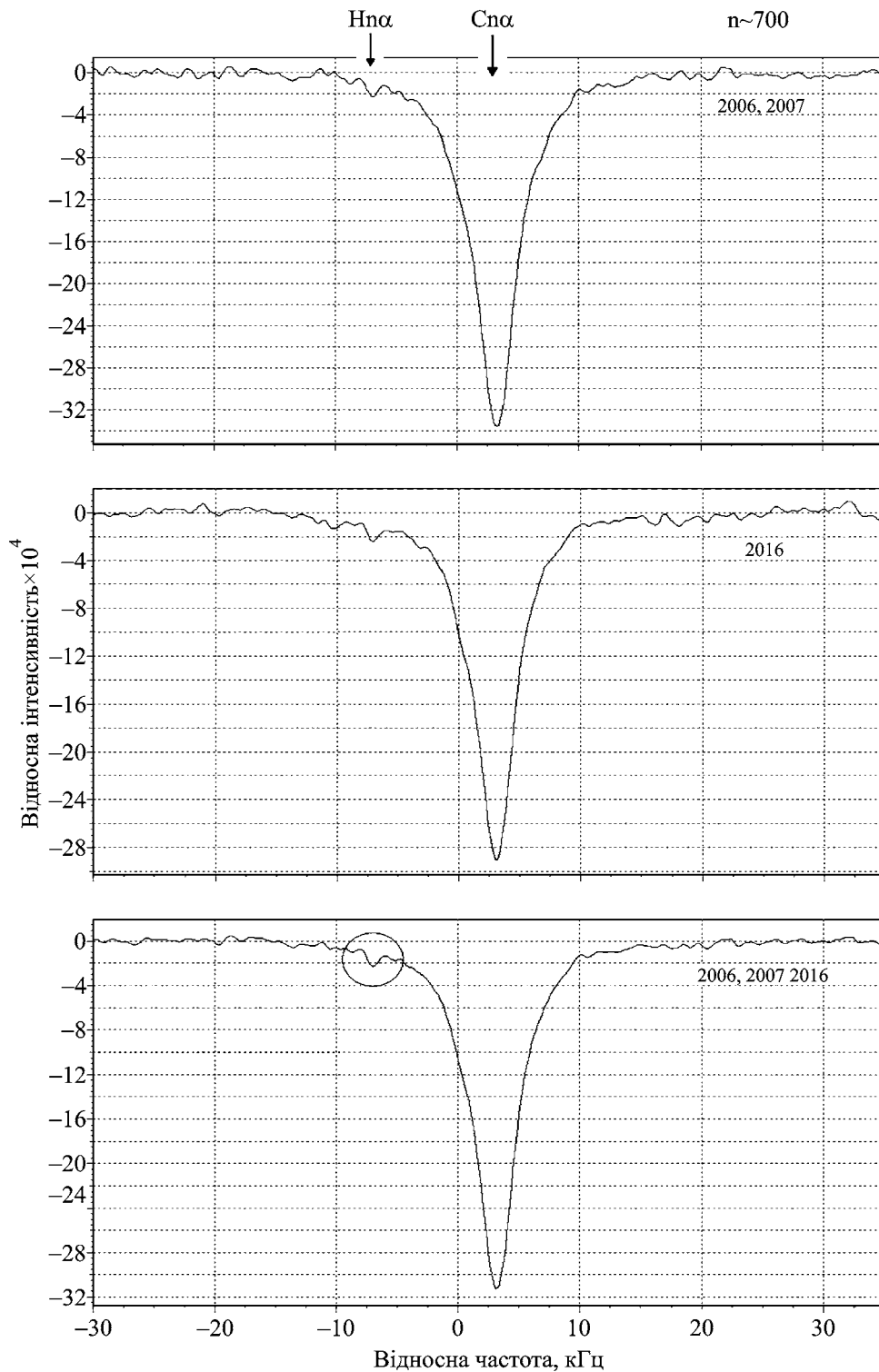


Рис. 8. РРЛ міжзоряних атомів вуглецю і водню. Середні спектри, що вперше були виміряні на частотах 20, 24, 26 МГц у 2006–2016 рр. при спостереженнях в напрямку радіоджерела Кассіопея А

Різниця в частотах ліній вуглецю та водню зумовлена ізотопічним зсувом, який залежить від маси атома. Частота ліній визначається як [1]

$$\nu_n = cZ^2R \left( 1 - \frac{m_e}{M_a} \right) \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n + \Delta n)^2} \right),$$

де  $c$  – швидкість світла;  $Z$  – заряд ядра;  $R$  – стала Рідберга;  $m_e$ ,  $M_a$  – маса електрона і маса атома;  $n$ ,  $\Delta n$  – головне квантове число та його зміна.

Атомів вуглецю значно менше у космосі, ніж атомів водню ( $C/H \approx 3 \cdot 10^{-4}$ ), а і їх потенціали іонізації складають відповідно  $E_C = 11.2$  еВ та  $E_H = 13.6$  еВ, тому кількість іонів водню є багатотисячкратно меншою, ніж кількість іонів вуглецю. Це є головною причиною того, що лінії водню значно слабкіші, і тільки добре розвинена методологія низькочастотної спектроскопії дозволила зареєструвати відповідні лінії поглинання. Крім того, слід нагадати, що у формулі (1) міра емісії для вуглецю становить

$$ME = n_e^2 s = n_{eC} n_{iC} s,$$

де  $n_e$  – об'ємна густина електронів від вуглецю ( $n_{eC} = n_e$ ),  $n_{iC}$  – об'ємна концентрація іонів вуглецю.

Коли у міжзоряній хмарі іонізовано лише вуглець, то  $n_e = n_{eC} = n_{iC}$ .

Рівняння для інтегральної інтенсивності ліній водню відрізняється від (1) та має вигляд

$$I_H = \int \tau_H(\nu) d\nu = 2 \cdot 10^6 n_{iH} (n_{eH} + n_{eC}) s (b_n \beta_n)_H / T_e^{2.5},$$

де  $n_{iH}$ ,  $n_{eH}$  – об'ємні концентрації іонів та електронів від водню,  $(b_n \beta_n)_H$  – коефіцієнти нерівноважності населеностей рівнів іонів водню.

Оскільки вуглець іонізований повністю, а водень лише на тисячні долі відсотка (ця слабка іонізація відбувається завдяки космічним променям з енергіями 1–2 МеВ [1, 2]), тільки завдяки електронам, які вивільняються внаслідок іонізації вуглецю ( $n_{eC} \gg n_{eH} = n_{iH}$ ), лінії водню можна все ж таки зареєструвати.

Вкрай важливо зазначити, що коефіцієнти  $(b_n \beta_n)_C$  та  $(b_n \beta_n)_H$  на низьких частотах принципово відрізняються. Для вуглецю вони досягають значень 10 ÷ 100, тоді як для водню – приблизно 1.

Це зумовлено впливом низькотемпературної діелектронної рекомбінації в іонах вуглецю за  $n > 600$  та  $T_e \sim 100$  К [7, 12], яка фактично “підсилює” інтенсивності відповідних РРЛ у десятки разів. Отже, лінії вуглецю є найефективнішими для діагностики холодної частково іонізованої міжзоряної плазми [11].

Слід зауважити, що в сучасній радіоастрономії напрям вкрай низькочастотної спектроскопії перебуває у стадії швидкого розвитку. Так, за допомогою європейської системи LOFAR розгорнута амбітна програма досліджень Всесвіту за допомогою низькочастотних РРЛ [22–24]. Проте український радіотелескоп УТР-2 залишається найбільш високочутливим і найефективнішим, особливо на частотах нижче 30 МГц, завдяки великій ефективній площі, динамічному діапазону, завадостійкості, фактору наповненості елементів [25]. Понад сорокарічні дослідження українських радіоастрономів успішно продовжуються [26]. Це знаходить своє відображення у світовому визнанні, що супроводжується активним цитуванням у публікаціях закордонних вчених відповідних результатів робіт, виконаних в Україні.

## 6. Висновки

Головні результати досліджень МЗС методами декаметрової радіоспектроскопії, отримані протягом останнього півстоліття, полягають у наступному.

1. Відкрито низькочастотні міжзоряні спектральні лінії поглинання нового типу – РРЛ атомів вуглецю, а також рекордно високі рівні збудження атомів з головними квантовими числами понад 1000. Вперше у астрофізиці РРЛ спостерігались у поглинанні. Відповідний розмір гігантських атомів досягає 0.1 мм. Це є важливим як для астрофізики, так і для фізичної науки в цілому.

2. Зареєстровано значне (в десятки разів) розширення ліній високозбуджених атомів, обумовлене фоновим випромінюванням, зіткненнями атомів і електронів у середовищі та ефектом Доплера. Це дає незалежні можливості детального вивчення щільності, температури та швидкості руху галактичних утворень.

3. Запропоновано новий метод прецизійної діагностики холодної міжзоряної плазми через виявлення та дослідження РРЛ вуглецю, а також ліній нейтрального водню HI та РРЛ водню в Галактиці, що дозволяє вивчати тепловий, іоніза-



ційний та еволюційний стани головних утворень галактичних рукавів – атомно-молекулярних міжзоряних хмар.

Серед перспективних задач низькочастотної астрорадіоспектроскопії слід відзначити повномасштабний огляд Галактики в РРЛ вуглецю та водню. Будуть цінними спостереження як з помірною кутовою роздільною здатністю  $\sim 10^\circ$  для усього Північного неба, так і вивчення тонкої просторової структури обраних об'єктів. До цих задач природно долучаються пошукові дослідження ліній інших типів, включно з тими, що зміщуються на низькі частоти в процесі космологічної еволюції Всесвіту.

Відкриття українських вчених в галузі низькочастотної радіоспектроскопії міжзоряної холодної частково іонізованої плазми стимулювали багато теоретичних та експериментальних праць в провідних астрофізичних і радіоастрономічних установах світу. Проте апаратно-методологічний і астрофізичний потенціали вітчизняної радіоастрономії залишаються найвищими у цій перспективній галузі наукових досліджень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Каплан С. А., Пикельнер С. Б. *Физика межзвездной среды*. Москва: Наука, 1979. 592 с.
- Спитцер Л. *Физические процессы в межзвездной среде*. Москва: Мир, 1981. 349 с.
- Шкловский И. С. *Космическое радиоизлучение*. Москва: Гостехиздат, 1956. 492 с.
- Кардашев Н. С. О возможности обнаружения разрешенных линий атомарного водорода в радиодиапазоне. *Астрономический журнал*. 1959. Т. 36, № 5. С. 838–844.
- Gordon M. A. and Sorochenko R. L. *Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Applications*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publ., 2002. 358 p. DOI: 10.1007/978-94-010-0261-5
- Konovalenko A. A. and Sodin L. G. Neutral  $^{14}\text{N}$  in the interstellar medium. *Nature*. 1980. Vol. 283. P. 360–361. DOI: 10.1038/283360a0
- Blake D. H., Crutcher R. M., and Watson W. D. Identification of the anomalous 26.131-MHz nitrogen line observed towards Cas A. *Nature*. 1980. Vol. 287. P. 707–708. DOI: 10.1038/287707a0
- Konovalenko A. A. and Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature*. 1981. Vol. 294. P. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
- Konovalenko A. A. Review of decameter wave recombination lines: Problems and Methods. In: M. A. Gordon and R. L. Sorochenko, eds. *Radio Recombination Lines: 25 Years of Investigation. Proceedings of IAU Colloq.* (September 11–16, 1989, Puschino). Dordrecht: Springer, 1990. P. 175–189. DOI: 10.1007/978-94-009-0625-9\_17
- Konovalenko A. A., Stepkin S. V., and Shalunov D. V. Low-Frequency Carbon Recombination Lines. *Radio Phys. Radio Astron.* 2001. Vol. 6, No. 1. P. 21–31.
- Konovalenko A. A. and Stepkin S. V. Radio Recombination Lines. In: L. I. Gurvits, S. Frey and S. Rawlings, eds. *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky – JENAM'03. EAS Publication Series*. 2005. Vol. 15, P. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158
- Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., and Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. Vol. 374, Is. 3. P. 852–856. DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
- Gee C. S., Percival L. C., Lodge J. G., and Richards D. Theoretical Rates for Electron Excitation of Highly-Excited Atoms. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1976. Vol. 176, Is. 1. P. 209–215. DOI: 10.1093/mnras/175.1.209
- Shaver P. A. Theoretical intensities of low-frequency recombination lines. *Pramana – J. Phys.* 1975. Vol. 5, Is. 1. P. 1–28. DOI: 10.1007/BF02875147
- Walmsley C. M. and Watson W. D. The influence of dielectronic-like recombination at low temperature on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon. *Astrophys. J.* 1982. Vol. 260. P. 317–325. DOI: 10.1086/160256
- Коноваленко А. А. Наблюдения рекомбинационных линий углерода на дециметровых волнах в направлении источника Кассиопея А. *Письма в Астрономический журнал*. 1984. Т. 10, № 11. С. 846–853.
- Коноваленко А. А. Обнаружение линий возбужденного углерода на дециметровых волнах в некоторых галактических объектах. *Письма в Астрономический журнал*. 1984. Т. 10, № 12. С. 912–917.
- Kantharia N. G., Anantharamaiah K. R., and Payne H. E. Carbon Recombination Lines between 34.5 and 770 MHz toward Cassiopeia A. *Astrophys. J.* 1998. Vol. 506, Is. 2. P. 758–772. DOI: 10.1086/306266
- Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Литвиненко Л. М., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Стьопкін С. В., Шепелев В. О., Зарка Ф., Рукер Г. О., Лекашо А., Панченко М., Брук Ю. М., Токарський П. Л., Бубнов І. М., Єрін С. М., Колядін В. Л., Мельник В. М., Калініченко М. М., Станіславський О. О., Доровський В. В., Христенко О. Д., Шевченко В. В., Белов О. С., Грідін А. О., Антонов О. В., Бовкун В. П., Резніченко О. М., Борцов В. М., Квасов Г. В., Остапченко Л. М., Шевчук М. В., Шевченко В. А., Яцків Я. С., Вавілова І. Б., Брауде І. С., Шкуратов Ю. Г., Рябов В. Б., Підгорний Г. І., Тимошевський А. Г., Литвиненко О. О., Галанін В. В., Рябов М. І., Браженко А. І., Ващишин Р. В., Французенко А. В., Кошовий В. В., Івантишин О. Л., Лозінський А. Б., Харченко Б. С., Васильева Я. Ю., Кравцов І. П., Васильківський С. В., Литвиненко Г. В., Муха Д. В., Василенко Н. В., Шевцова А. І., Мірошніченко А. П., Кутай Н. В., Соболев Я. М., Цвик Н. О. Засновнику дециметрової радіоастрономії в Україні академіку НАН України Семену Яковичу Брауде 110 років: історія створення та розвитку вітчизняної експериментальної бази впродовж останнього півстоліття. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 1. С. 5–73. DOI: 10.15407/rpra26.01.005

20. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
21. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
22. Oonk J. B. R., van Weeren R. J., Salas P., Salgado F., Morabito L. K., Toribio M. C., Tielens A. G. G. M., and Röttgering H. J. A. Carbon and hydrogen radio recombination lines from the cold clouds towards Cassiopeia A. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. Vol. 465, Is. 1. P. 1066–1088. DOI: 10.1093/mnras/stw2818
23. Salgado F., Morabito L. K., Oonk J. B. R., Salas P., Toribio M. C., Röttgering H. J. A., and Tielens A. G. G. M. Low-frequency Carbon Radio Recombination Lines. II. The Diffuse Interstellar Medium. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 837, Is. 2. id. 142. DOI: 10.3847/1538-4357/aa5d9a
24. Salas P., Oonk J. B. R., van Weeren R. J., Salgado F., Morabito L. K., Toribio M. C., Emig K., Röttgering H. J. A., and Tielens A. G. G. M. LOFAR observations of decameter carbon radio recombination lines towards Cassiopeia A. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. Vol. 467, Is. 2. P. 2274–2287. DOI: 10.1093/mnras/stx239
25. Peters W. M., Lazio T. J. W., Clarke T. E., Erickson W. C. and Kassim N. E. Radio recombination lines at decametre wavelengths. Prospects for the future. *Astron. Astrophys.* 2011. Vol. 525. id. A128. DOI: 10.1051/0004-6361/201014707
26. Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Калініченко М. М., Мельник В. М., Сидорчук М. А., Станіславський О. О., Степкін С. В., Ульянов О. М. Радіовипромінювання Всесвіту на декаметрових хвилях. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2019. Т. 24, № 1. С. 3–43. DOI: 10.15407/rpra24.01.003

## REFERENCES

1. KAPLAN, S. A. and PIKELNER, S. B., 1979. *Physics of the Interstellar Medium.* Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
2. SPITZER, L., 1978. *Physical Processes in the Interstellar Medium.* New York: Wiley.
3. SHKLOVSKII, I. S., 1956. *Cosmic Radio Emission.* Moscow, Russia: Gostekhizdat Publ. (in Russian).
4. KARDASHEV, N. S., 1959. On the Possibility of Detection of Allowed Lines of Atomic Hydrogen in the Radio-Frequency Spectrum. *Sov. Astron.* vol. 3, pp. 813–820.
5. GORDON, M. A. and SOROCHENKO, R. L., 2002. Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Applications. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publ. DOI: 10.1007/978-94-010-0261-5
6. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1980. Neutral  $^{14}\text{N}$  in the interstellar medium. *Nature.* vol. 283, pp. 360–361. DOI: 10.1038/283360a0
7. BLAKE, D. H., CRUTCHER, R. M. and WATSON, W. D., 1980. Identification of the anomalous 26.131-MHz nitrogen line observed towards Cas A. *Nature.* vol. 287, pp. 707–708. DOI: 10.1038/287707a0
8. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1981. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature.* vol. 294, pp. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
9. KONOVALENKO, A. A., 1990. Review of decameter recombination lines: Problems and Methods. In: M. A. GORDON and R. L. SOROCHENKO, eds. *Radio Recombination Lines: 25 Years of Investigation. Proceedings of IAU Colloq.* Dordrecht: Springer, pp. 175–189. DOI: 10.1007/978-94-009-0625-9\_17
10. KONOVALENKO, A. A., STEPKIN, S. V. and SHALUNOV, D. V., 2001. Low-Frequency Carbon Recombination Lines. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 6, no. 1, pp. 21–31.
11. KONOVALENKO, A. A. and STEPKIN, S. V., 2005. Radio Recombination Lines. In: L. I. GURVITS, S. FREY and S. RAWLINGS, eds. *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky – JENAM'03. EAS Publication Series.* vol. 15, pp. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158
12. STEPKIN, S. V., KONOVALENKO, A. A., KANTHARIA, N. G. and UDAYA SHANKAR, N., 2007. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 374, is. 3, pp. 852–856. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
13. GEE, C. S., PERCIVAL, L. C., LODGE, J. G. and RICHARDS, D., 1976 Theoretical Rates for Electron Excitation of Highly-Excited Atoms. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 176, is. 1, pp. 209–215. DOI: 10.1093/mnras/175.1.209
14. SHAVER, P. A., 1975. Theoretical intensities of low-frequency recombination lines. *Pramana – J. Phys.* vol. 5, is. 1, pp. 1–28. DOI: 10.1007/BF02875147
15. WALMSLEY, C. M. and WATSON, W. D., 1982. The influence of dielectronic-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon. *Astrophys. J.* vol. 260, pp. 317–325. DOI: 10.1086/160256
16. KONOVALENKO, A. A., 1984. Decameter-wavelength carbon recombination lines toward Cassiopeia A. *Sov. Astron. Lett.* vol. 10, is. 11, pp. 353–356.

17. KONOVALENKO, A. A., 1984. Decameter excited-carbon lines in certain galactic objects. *Sov. Astron. Lett.* vol. 10, is. 12, pp. 384–386.
18. KANTHARIA, N. G., ANANTHARAMAIAH, K. R. and PAYNE, H. E., 1998. Carbon Recombination Lines between 34.5 and 770 MHz toward Cassiopeia A. *Astrophys. J.* vol. 506, is. 2, pp. 758–772. DOI: 10.1086/306266
19. KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., LYTVY-NENKO, L. M., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEP-KIN, S. V., SHEPELEV, V. A., ZARKA, P., RUC-KER, H. O., LECACHEUX, A., PANCHENKO, M., BRUCK, YU. M., TOKARSKY, P. L., BUBNOV, I. M., YERIN, S. M., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., KALINICHENKO, M. M., STANISLAVSKY, O. O., DOROVSKYY, V. V., KHRISTENKO, O. D., SHEVCHENKO, V. V., BELOV, O. S., GRIDIN, A. O., ANTONOV, O. V., BOVKUN, V. P., REZNICHENKO, O. M., BORTSOV, V. M., KVASOV, G. V., OSTAPCHENKO, L. M., SHEVCHUK, M. V., SHEVCHENKO, V. A., YATSKIV, YA. S., VAVILOVA, I. B., BRAUDE, I. S., SHKURATOV, Y. G., RYABOV, V. B., PIDGORNYY, G. I., TYMOSHEVSKY, A. G., LYTVY-NENKO, O. O., GALANIN, V. V., RYABOV, M. I., BRAZHENKO, A. I., VASHCHISHIN, R. V., FRANTSUZENKO, A. V., KOSHOVYY, V. V., IVANTYSHYN, O. L., LOZINSKY, A. B., KHARCHENKO, B. S., VASYLIEVA, I. Y., KRAVTSOV, I. P., VASYLKIVSKY, Y. V., LITVINENKO, G. V., MUKHA, D. V., VASYLENKO, N. V., SHEVTSOVA, A. I., MIROSHNICHENKO, A. P., KUHAL, N. V., SOBOLEV, YA. M. and TSVYK, N. O., 2021. The Founder of the Decameter Radio Astronomy in Ukraine Academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 Years Old: History of Creation and Development of the National Experimental Base for the Last Half Century. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 1, pp. 5–73. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.01.005
20. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., KOLIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
21. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KHRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
22. OONK, J. B. R., VAN WEEREN, R. J., SALAS, P., SALGADO, F., MORABITO, L. K., TORIBIO, M. C., TIELENS, A. G. G. M. and RÖTTGERING, H. J. A., 2017. Carbon and hydrogen radio recombination lines from the cold clouds towards Cassiopeia A. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 465, is. 1, pp. 1066–1088. DOI: 10.1093/mnras/stw2818
23. SALGADO, F., MORABITO, L. K., OONK, J. B. R., SALAS, P., TORIBIO, M. C., RÖTTGERING, H. J. A. and TIELENS, A. G. G. M., 2017. Low-frequency Carbon Radio Recombination Lines. II. The Diffuse Interstellar Medium. *Astrophys. J.* vol. 837, is. 2, id. 142. DOI: 10.3847/1538-4357/aa5d9a
24. SALAS, P., OONK, J. B. R., VAN WEEREN, R. J., SALGADO, F., MORABITO, L. K., TORIBIO, M. C., EMIG, K., RÖTTGERING, H. J. A. and TIELENS, A. G. G. M., 2017. LOFAR observations of decameter carbon radio recombination lines towards Cassiopeia A. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 467, is. 2, pp. 2274–2287. DOI: 10.1093/mnras/stx239
25. PETERS, W. M., LAZIO, T. J. W., CLARKE, T. E., ERICKSON, W. C. and KASSIM, N. E., 2011. Radio recombination lines at decametre wavelengths. Prospects for the future. *Astron. Astrophys.* vol. 525, id. A128. DOI: 10.1051/0004-6361/201014707
26. KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., KALINICHENKO, M. M., MELNIK, V. M., SIDORCHUK, M. A., STANISLAVSKY, A. A., STEP-KIN, S. V. and ULYANOV, O. M., 2019. The Universe Radio Emission at Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 24, no. 1, pp. 3–43. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra24.01.003

S. V. Stepkin, O. O. Konovalenko, Y. V. Vasylykivskiy,  
and D. V. Mukha

Institute of Radio Astronomy,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### INTERSTELLAR MEDIUM AND DECAMETER RADIO SPECTROSCOPY

*Purpose:* The analytical review of the main results of research in the new direction of the low-frequency radio astronomy, the interstellar medium radio spectroscopy at decameter waves,

which had led to astrophysical discovery, recording of the radio recombination lines in absorption for highly excited states of interstellar carbon atoms (more than 600).

*Design/methodology/approach:* The UTR-2 world-largest broadband radio telescope of decameter waves optimally connected with the digital correlation spectrum analyzers has been used. Continuous modernization of antenna system and devices allowed increasing the analysis band from 100 kHz to 24 MHz and a number of channels from 32 to 8192. The radio telescope and receiving equipment with appropriate software allowed to have a long efficient integration time enough for a large line series simultaneously with high resolution, noise immunity and relative sensitivity.

*Findings:* A new type of interstellar spectral lines has been discovered and studied, the interstellar carbon radio recombination lines in absorption for the record high excited atoms with principal quantum numbers greater than 1000. The line parameters (intensity, shape, width, radial velocity) and their relationship with the interstellar medium physical parameters have been determined. The temperature of line forming regions is about 100 K, the electron concentration up to  $0.1 \text{ cm}^{-3}$  and the size of a line forming region is about 10 pc.

For the first time, radio recombination lines were observed in absorption. They have significant broadening and are amplified by the dielectronic-like recombination mechanism and are also the lowest frequency lines in atomic spectroscopy. *Conclusions:* The detected low-frequency carbon radio recombination lines and their observations have become a new highly effective tool for the cold partially ionized interstellar plasma diagnostics. Using them allows obtaining the information which is not available with the other astrophysical methods. For almost half a century of their research, a large amount of hardware-methodical and astrophysical results have been obtained including a record number of Galaxy objects, where the relevant lines have been recorded. The domestic achievements have stimulated many theoretical and experimental studies in other countries, but the scientific achievements of Ukrainian scientists prove the best prospects for further development of this very important area of astronomical science.

*Key words:* low-frequency radio astronomy, radio telescope, interstellar medium, radio recombination lines, carbon, hydrogen, spectral analyzer

*Стаття надійшла до редакції 01.09.2021*