

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ ДЕТЕКТУВАННЯ ГЛОБАЛЬНОГО СИГНАЛУ В ЛІНІЇ НАДТОНКОЇ СТРУКТУРИ ГІДРОГЕНУ З ЕПОХИ ТЕМНИХ ВІКІВ

О. Коноваленко<sup>1</sup>, В. Захаренко<sup>1</sup>, Б. Новосядлий<sup>2,3</sup>, Л. Гурвіц<sup>4</sup>, С. Степкін<sup>1</sup>,  
Є. Васильківський<sup>1</sup>, П. Токарський<sup>1</sup>, О. Ульянов<sup>1</sup>, О. Станіславський<sup>1</sup>, І. Бубнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Мистецтв, 4, Харків, 61002, Україна,

<sup>2</sup>Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,  
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна,

<sup>3</sup>Коледж фізики та Міжнародний центр наук майбутнього Цзілінського університету,  
вул. Кванцзінь, 2699, Чаньчунь, 130012, КНР,

<sup>4</sup>Об'єднаний інститут VLBI ERIC і Делфтський технологічний університет,  
вул. Овде Хогевенсдайк, 4, 7991, Девентер, Нідерланди

(Отримано 16 жовтня 2023 р.; в остаточному вигляді — 27 листопада 2023 р.; прийнято до друку — 04 грудня 2023 р.;  
опубліковано онлайн — 31 січня 2024 р.)

Ми аналізуємо можливості детектування за допомогою українських радіотелескопів УТР-2 і ГУРТ НАН України сигналу в лінії 21 см нейтрального гідрогену, який сформований у ранньому Всесвіті в епоху Темних віків. Ця лінія внаслідок космологічного розширення зміщена в декаметровий діапазон довжин хвиль ( $\lambda_{\text{obs}} \approx 18$  м,  $\nu_{\text{obs}} \approx 16$  МГц) лежить у смугі робочих частот цих телескопів. Яскравісна температура передбачуваного усередненого по небу глобального сигналу становить від  $\sim -0.08$  до  $\sim 0.02$  К залежно від космологічної моделі. Такий слабкий сигнал — великий виклик навіть для найбільшого у світі радіотелескопа декаметрового діапазону довжин хвиль УТР-2, оскільки рівень сигналу синхротронного випромінювання галактики на цих частотах становить 20 000–40 000 К. У статті висвітлено особливості спектроскопії на декаметрових хвилях, завадові фактори природного й апаратного походження і шляхи їх усунення для надійного детектування сигналу в лінії 21 см, який може стати важливим джерелом інформації як про середовище, у якому народжувалися перші зорі й галактики, так і про природу частинок темної матерії та величини первісних магнітних полів. Зроблено висновок, що детектування такого сигналу за допомогою найчутливіших радіотелескопів декаметрового діапазону довжин хвиль цілком можливе (за частотного накопичення 25 МГц час детектування становитиме  $\sim 50$  діб) і може бути реалізоване найближчими мирними роками в Україні.

**Ключові слова:** космологічні Темні віки, лінія 21 см гідрогену, радіоспектроскопія, радіотелескоп УТР-2.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.28.1902>

### ВСТУП

Космологічні дослідження — одні з найскладніших напрямів сучасної астрономії. Це стосується як теоретичних оцінок, так і експериментального пошуку відповідних ефектів. Причини пов'язані, зокрема, з необхідністю відходів від класичних методів теоретичної фізики та астрофізики, невизначеністю початкових умов, великою відстанню до досліджуваних об'єктів та слабкістю ефектів у будь-якому діапазоні космічного випромінювання всесвітньої астрономії.

У цій праці запропоновано об'єднати зусилля теоретиків та експериментаторів в оцінці можливостей наявності та детектування нового космологічного явища — ліній поглинання нейтрального гідрогену (довжина хвилі 21 см), що завдяки червоному зміщенню переходить у діапазон декаметрових хвиль.

В основі досліджень лежать досвід львівської школи теоретичної астрофізики та космології, а також доробок у галузі декаметрової радіоастрономії, що розвивається в Харкові протягом більше ніж півстоліття. На жаль, всесвітньовідома Радіоастрономічна обсерваторія імені С. Я. Брауде зруйнована внаслідок агресії російських окупантів. Завдяки героїчним діям Збройних сил України обсерваторія звільнена у вер-

есні 2022 року. Зараз відбувається поступове відновлення інфраструктури й наукових об'єктів Обсерваторії.

### 1. ЛІНІЯ 21 СМ З ЕПОХИ ТЕМНИХ ВІКІВ

Теплове реліктове випромінювання, яке експериментально виявили Арно Пензіас і Роберт Вільсон 1965 року [1], є ключовим джерелом інформації про наш Всесвіт та формування його великомасштабної структури. Вивчення просторових флуктуацій його температури та поляризації в космічних експериментах COBE<sup>1</sup>, WMAP<sup>2</sup>, Planck<sup>3</sup> започаткували епоху точнісної космології, коли параметри космологічної моделі визначені з точністю до відсотка [2, 3]. Водночас залишаються фундаментальні питання щодо природи домінуючих за середньою густиною компонент

<sup>1</sup> Cosmic Background Explorer (1989–1993), <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>.

<sup>2</sup> Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (2001–2010), <https://map.gsfc.nasa.gov/>.

<sup>3</sup> Space observatory Planck (2009–2018), <https://sci.esa.int/web/planck/>.



Всесвіту — темної енергії та темної матерії, причини баріонної асиметрії, моделі інфляції, формування перших зір і галактик. Останнє загострилося у зв'язку з відкриттям Космічним телескопом імені Джеймса Вебба масивних галактик з інтенсивним зореутворенням на червоних зміщеннях  $\sim 13$  [4, 5]. З іншого боку, уточнення космологічної шкали відстаней виявило розбіжність між значеннями сталої Габбла за даними реліктового випромінювання й надновими типу Ia на рівні  $> 4\sigma$  [6, 7]. Це вказує на потребу пошуку нових космологічних тестів, зокрема, аналізу можливостей детектування лінії надтонкої структури 21 см нейтрального водню з епохи Темних віків та Космічного світанку, що передували формуванню спостережуваних тепер зір і галактик. Ця лінія є важливим каналом інформації про стан баріонної матерії (температуру, концентрацію, йонізацію, просторові неоднорідності тощо) в епоху формування перших зір і галактик (див., напр., огляди [8, 9]). Останніми десятиліттями проводять експерименти з реєстрації глобального (усередненого по всьому небу) сигналу в цій лінії, зміщеній космологічним розширенням Всесвіту в метровий-декаметровий діапазон довжини хвиль. У 2018 році оголошено про першу реєстрацію цього сигналу на частоті 78 МГц в експерименті EDGES (Experiment to Detect the Global Epoch of Reionization Signature) [10]. Однак недавно опубліковані дані аналогічного експерименту SARAS 3 (Shaped Antenna measurement of the background Radio Spectrum 3) [11] не підтвердили цього відкриття.

Уже впродовж кількох років науковці Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка та Радіоастрономічного інституту НАН України разом з колегами з інших установ проводять теоретичні оцінки інтенсивності радіовипромінювання з епохи Темних віків та Космічного світанку в лініях перших молекул [12–14] та атомів водню [15, 16]. У праці [15] отримано оцінку інтенсивності свічення протогалактик (гало) в лініях 21 см, які формуються на червоних зміщеннях  $z \sim 30 - 10$ . У роботі [16] вивчено залежність глобального сигналу в лінії 21 см в епоху Темних віків, Космічного світанку та реіонізації від параметрів космологічних моделей і першого світла. У ній показано, що реєстрація спектральних особливостей лінії на різних частотах може бути добрим тестом на параметри космологічних моделей, природу частинок темної матерії та напруженість первинних магнітних полів.

У супровідній статті [21] ми показали, що в стандартній  $\Lambda$ CDM моделі з постпланківськими параметрами в епоху Темних віків на червоному зміщенні  $z = 87$  формується лінія поглинання  $\lambda_{HI} = 21$  см у спектрі реліктового випромінювання, яка для земного спостерігача зміщена в декаметровий діапазон довжини хвиль:  $\lambda_{obs} = \lambda_{HI}(1+z) \approx 18$  м. Значення диференційної яскравісної температури в центрі лінії поглинання  $\delta T_{br} \approx -35$  мК, частота лінії в максимумі поглинання 16 МГц, ефективна ширина лінії  $\approx 25$  МГц. Глибина лінії помірно чутлива до  $\Omega_b$  і  $H_0$ , слабо чутлива до  $\Omega_{dm}$  і нечутлива до інших параметрів стандартної

$\Lambda$ CDM моделі. Але лінія дуже чутлива до додаткових механізмів нагрівання або охолодження баріонної матерії під час Темних віків, тому вона може бути ефективним тестом нестандартних космологічних моделей. У моделях з темною матерією, що розпадається або самоанігілює, а також з первісним глобальним стохастичними магнітними полями температура баріонної матерії в цей період тим вища, чим більша густина цих компонент темної матерії та напруженості магнітного поля. Лінія поглинання мілкішає, щезає й переходить в емісію за значень параметрів компонент, нижчих за верхні межі на них, які впливають з наявних даних спостережень.

Найбільшим і найчутливішим радіотелескопом у цьому діапазоні частот є Український Т-подібний радіотелескоп (УТР-2) та ГУРТ, створення якого перебуває на завершальній стадії. У цій роботі ми аналізуємо можливості детектування за їхньої допомогою глобального сигналу в лінії надтонкої структури основного стану водню з епохи Темних віків, зміщеної в декаметровий діапазон довжини хвиль.

Як зазначено вище, експерименти з пошуку подібних ліній уже неодноразово проводили на частотах 50–120 МГц, заявлено про успішне детектування на частоті 78 МГц в експерименті EDGES, але спростовано в експерименті SARAS 3. Останніми роками активно розробляють засоби й методи такого пошуку в діапазоні 20–200 МГц з урахуванням української інтенсивності очікуваних сигналів і великої кількості завадових явищ, що притаманні радіоастрономії низьких частот [17–20]. Серед головних наукових завдань багатьох низькочастотних радіотелескопів нового покоління також є пошук відповідних космологічних спектральних ефектів і на нижчих частотах.

Усе більшої популярності набуває використання методів розпізнавання образів (pattern recognition), або в іншій термінології — “машинного навчання” та “штучного інтелекту”. Водночас недостатньо вивчені й майже не описані радіоспектроскопічні та завадові особливості радіоастрономії декаметрових хвиль на частотах  $< 30$  МГц, де є космологічна лінія з частотою  $\sim 16$  МГц, що пропонуємо для пошуку в цій роботі [21]. З іншого боку, 50-річний досвід створення засобів і методів спостережень, також використання вказаних вище українських радіотелескопів дають змогу по-новому оцінити можливості детектування цього цікавого й важливого космологічного ефекту та запропонувати адекватну спостережну методологію.

## II. РАДІОАСТРОНОМІЯ НА ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ В УКРАЇНІ

Як відомо, Україна є світовим лідером у галузі декаметрової радіоастрономії ( $\lambda = 10 - 100$  м,  $\nu = 3 - 30$  МГц). Цей пріоритет загально визнаний, зберігається близько 60 років і базується на створенні та використанні найбільшого у світі радіотелескопа УТР-2 (має рекордно велику ефективну площу 150 000 м<sup>2</sup>)

і побудові на його основі унікальної системи УРАН [22, 23]. Засновником цього наукового напрямку, який тепер набуває все більшої актуальності, був видатний український вчений С. Я. Брауде (1911–2003). Не можна з вдячністю не згадати унікальної людини — президента НАН України Б. Є. Патона (1918–2020), який до останніх днів свого яскравого життя всебічно підтримував розвиток низькочастотної радіоастрономії в Україні.

Упродовж останніх десятиліть відбувалася постійна модернізація УТР-2 та УРАН, включно з антенними системами, аналоговою й цифровою апаратурою, методами спостережень. Водночас використовували найсучасніші інформаційні та телекомунікаційні технології, що привело до підвищення ефективності та інформативності вітчизняної радіоастрономії в тисячу разів [24], [25]. Навіть більше, поруч з УТР-2 будеться радіотелескоп нового покоління ГУРТ, який має значно ширшу смугу частот 8 – 80 МГц (це вже

декаметровий-метровий діапазон) та багато інших переваг [24], [26].

Тепер у всьому світі відбувається бурхливий прогрес низькочастотної радіоастрономії. На всіх континентах будують нові радіотелескопи декаметрових — метрових хвиль LOFAR, NenuFAR, LWA, MWA, SKA-low. Однак за своїми головними параметрами (смуга частот, ефективна площа, чутливість, роздільна здатність, просторово-частотна характеристика, завадостійкість, динамічний діапазон аналогових і цифрових систем) українські інструменти неперевершені й максимально затребувані світовою спільнотою. Вони дали змогу отримати велику кількість пріоритетних астрофізичних та апаратно-методичних результатів під час виконання вітчизняних та міжнародних наукових проектів [27]. На рис. 1–4 показані українські радіотелескопи декаметрових хвиль та їх розміщення в Україні. Головні параметри телескопів наведені в таблиці на рис. 5 [23].



Рис. 1. Антени Північ–Південь (зліва) та Схід–Захід (справа) радіотелескопа УТР-2 (фото 2020 року)  
Fig. 1. The North-South (left) and East-West (right) antennas of the UTR-2 radio telescope (2020 photo)



Рис. 2. Широкопasmовий радіотелескоп нового покоління ГУРТ  
Fig. 2. Wideband radio telescope of the new generation GURT





Рис. 3. Радіотелескопи УРАН-1 (РІ НАНУ), УРАН-2 (ПГО ІГФ НАНУ), УРАН-3 (ФМІ НАНУ), УРАН-4 (РІ НАНУ)  
 Fig. 3. Radio telescopes URAN-1 (RI NASU), URAN-2 (PGO IGF NASU), URAN-3 (FMI NASU), URAN-4 (RI NASU)



Рис. 4. Розташування радіотелескопів декаметрових хвиль в Україні  
 Fig. 4. Location of radio telescopes of decameter waves in Ukraine

Для правильного формування вимог до експериментальної бази пошуку зміщеної лінії 21 см гідрогену, включно з інформацією про її параметри, що наведені в попередньому розділі, необхідно ретельно врахувати особливості радіоастрономії декаметрових хвиль як з погляду астрофізики, так і апаратно-методичних аспектів. Їх є чимало, але далі ми коротко торкнемося лише тих, які безпосередньо впливають на характер експериментів, насамперед особливостей радіотелескопів декаметрових хвиль.

Одним із головних параметрів кожного радіотелескопа є його чутливість. Вона визначається класи-

чним співвідношенням [28]

$$\Delta S_{\min} = \frac{2k_B T_{\text{noise}}}{A_{\text{eff}} \sqrt{\Delta f \Delta t}} \quad \text{Ян}, \quad (1)$$

де  $\Delta S_{\min}$  — мінімальна густина потоку електромагнітного випромінювання, що задетектована від радіоджерела,  $k_B$  — стала Больцмана,  $T_{\text{noise}}$  — шумова температура системи,  $A_{\text{eff}}$  — ефективна площа радіотелескопа,  $\Delta f$  — частотна смуга реєстрації (роздільна здатність за частотою),  $\Delta t$  — час інтегрування або накопичення (роздільна здатність за часом).

Принциповою відмінністю низьких частот є те, що шумова температура системи  $T_{\text{noise}}$  не є шумовою температурою приймача  $T_N$ , як на високих частотах (становить близько десятків К). На декаметрових вона визначається яскравісною температурою галактичного фону  $T_{\text{noise}} \approx T_B(\nu)$ , яка досягає десятків

та сотень тисяч К. Але, незважаючи на це величезне значення, радіотелескоп УТР-2 має рекордну чутливість завдяки своїй гігантській ефективній площі:  $\Delta S_{\text{min}} \sim 1 \text{ Ян} - 1 \text{ мЯн}$  (залежно від смуги й часу інтегрування, які своєю чергою визначаються параметрами досліджуваних космічних сигналів).

Радіотелескоп; координати	Частотний діапазон, МГц	Розмір, м; максимальна ефективна площа, м <sup>2</sup>	Кількість елементів ( $l \times m = N$ ); поляризація	Розмір променя на 25 МГц	Відстань від УТР-2 (LOFAR), км	РНДБ роздільна здатність на 25 МГц (УТР-2 – УРАН)
УТР-2 (РІ НАНУ); 49°39' пн. ш., 36°56' сх. д.	8 ÷ 33	1800 × 900; 140000	2040; 1 лінійна	0.4° × 0.4°	0 (≈ 2000)	–
УТР-2 (плече Південь–Північ)	8 ÷ 33	1800 × 53; 105000	240 × 6 = 1440; 1 лінійна	0.3° × 12°	0 (≈ 2000)	–
УТР-2 (плече Захід)	8 ÷ 33	900 × 45; 40000	6 × 100 = 600; 1 лінійна	0.6° × 12°	0 (≈ 2000)	–
УРАН-1 (РІ НАНУ); 49°40' пн. ш., 36°21' сх. д.	8 ÷ 33	200 × 29; 5500	4 × 24 = 96; 2 лінійні	5° × 30°	42 (≈ 1950)	59"
УРАН-2 (ПГО НАНУ); 49°38' пн. ш., 34°50' сх. д.	8 ÷ 33	238 × 116; 28000	16 × 32 = 512; 2 лінійні	3.5° × 7.5°	150 (≈ 1850)	16"
УРАН-3 (ФМІ НАНУ); 51°29' пн. ш., 23°50' сх. д.	8 ÷ 33	238 × 58; 14000	8 × 32 = 256; 2 лінійні	3.5° × 15°	946 (≈ 1100)	2.6"
УРАН-4 (РІ НАНУ); 46°24' пн. ш., 30°16' сх. д.	8 ÷ 33	238 × 29; 7000	4 × 32 = 128; 2 лінійні	3.5° × 30°	613 (≈ 1500)	4"
ГУРТ, одна субрешітка, (РІ НАНУ); 49°39' пн. ш., 36°56' сх. д.	8 ÷ 80	18 × 18; 650 (на 10 МГц)	5 × 5 = 25; 2 лінійні	30° × 30°	≈ 1 (≈ 2000)	–

Рис. 5. Основні параметри українських радіотелескопів декаметрового діапазону довжин хвиль  
Fig. 5. The main parameters of Ukrainian radio telescopes of decameter wavelength range

Наведена вище формула та її низькочастотні особливості вимагають уточнення. Наближення  $T_{\text{noise}} \approx T_B$  справедливе лише тоді, коли антенна температура (потужність радіосигналу від галактичного фону) на виході антени або антенного елемента набагато більша, ніж шумова температура приймача (антенного підсилювача), що під'єднаний до антени:  $T_a \gg T_N$ . Але в кожній антені є втрати  $\eta_A$  (частотно-залежне ослаблення сигналу), зокрема, під час використання сучасних широкосмугових активних антенних елементів [29]. Отже,  $T_a = T_B \eta_A$ , а скоригована формула для чутливості виглядає так:

$$\Delta S_{\text{min}} = \frac{2k_B T_{\text{noise}}}{A_{\text{eff}} \sqrt{\Delta f \Delta t}} \left( 1 + \frac{T_N}{T_a} \right) \text{ Ян}, \quad (2)$$

Коефіцієнт зменшення чутливості  $m = T_a / (T_a + T_N)$  може бути помітно меншим за 1. Наприклад, коли антенна температура фону дорівнює шумовій температурі приймача (іноді конструктори радіотелескопів це допускають), чутливість зменшується удвічі, що еквівалентне зменшенню ефективної площі (її максимізація — головна експериментальна мета радіоастрономів) удвічі. Це змушує ввести новий параметр якості низькочастотного радіотелескопа — системна екві-

валентна ефективна площа (System Equivalent Effective Area)

$$\text{SEEA} = A_{\text{eff}} T_a / (T_a + T_N) = m \cdot A_{\text{eff}} \text{ м}^2.$$

Коректнішою оцінкою якості порівняно з традиційним параметром якості на високих частотах є системна еквівалентна густина потоку (System Equivalent Flux Density):

$$\text{SEFD} = 2k_B T_{\text{noise}} / A_{\text{eff}} \text{ Ян}.$$

На низьких частотах  $T_{\text{noise}}$  визначається передусім  $T_B$  і в жодному разі не може бути зменшена для підвищення якості радіотелескопа порівняно з високими частотами (міліметровий–сантиметровий діапазони), коли  $T_{\text{noise}}$  може бути зменшена через використання сучасних напівпровідників та криогенної техніки.

Формули (1) та (2) використовують під час спостережень точкових радіоджерел з кутовими розмірами, меншими за ширину діаграми спрямованості радіотелескопа (для УТР-2 кутова роздільна здатність  $\sim 30'$ ). Для протяжних та/або ізотропних у просторі радіоджерел (саме таким є глобальний сигнал у лінії 21 см водню з Темних віків) доцільно використовувати співвідношення для мінімально задетектованої

яскравішої температури

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_B}{m\sqrt{\Delta f \Delta t}}. \quad (3)$$

Як видно, у цьому разі ефективна площа, тобто розмір радіотелескопа, не важливі, можна використовувати невелику антену й навіть один антенний елемент із квазіізотропною діаграмою спрямованості. Цей висновок є принциповим для досліджень позагалактичних, майже ізотропних космологічних ефектів різних типів. Тонку просторову структуру подібних джерел вивчають на наступних етапах досліджень після детектування власне ефекту. Максимізація коефіцієнта  $m$  і наближення його до 1 є вкрай важливим у кожному випадку. Це реалізовано для всіх українських радіотелескопів, оскільки вдалося досягнути вельми високого відношення  $T_a$  та  $T_N$  на рівні 6–10 дБ, що дає  $m = 0.8 - 0.9$ . Навіть більше, це забезпечено в широкій смузі частот радіотелескопів, що продемонстровано нижче.

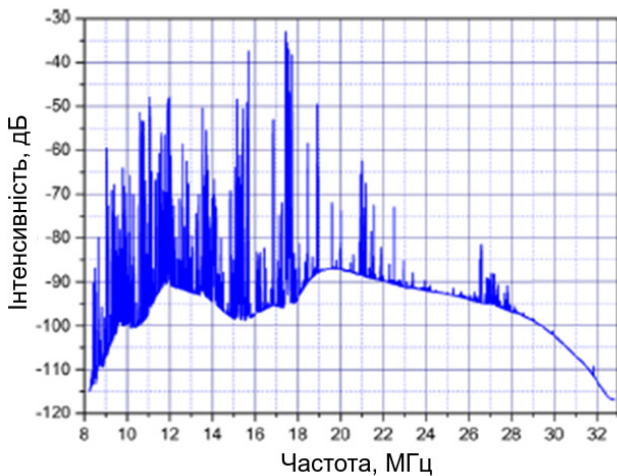


Рис. 6. Відгук радіотелескопа УТР-2 на радіовипромінювання галактичного фону в денний час

Fig. 6. Response of the UTR-2 radio telescope to the radio radiation of the galactic background during the daytime

На рис. 6–7 показані амплітудно-частотні характеристики (смуга пропускання) радіотелескопа УТР-2. Це реальні відгуки телескопа на галактичний фон, який займає увесь електромагнітний радіоспектр від гектометрових до дециметрових хвиль. Ці відгуки містять також вузькосмугові радіозавади, інтенсивність і кількість яких суттєво залежить від часу доби (вночі набагато менше) і частоти (майже відсутні на частотах понад 15–20 МГц). Ці радіочастотні завади мають ширину  $\Delta\nu_{RFI} \sim 10$  кГц. Нерівномірність характеристики зумовлена використанням спеціальної 3-смугової системи антенного підсилення зі смугами пропускання 8–12, 12–18, 18–33 МГц. Ця нерівномірність коригується певним чином калібруваннями та розрахунками. Радіотелескопи УРАН-1–УРАН-4 ма-

ють подібні смуги частот — 8–33 МГц (див. таблицю на рис. 5).

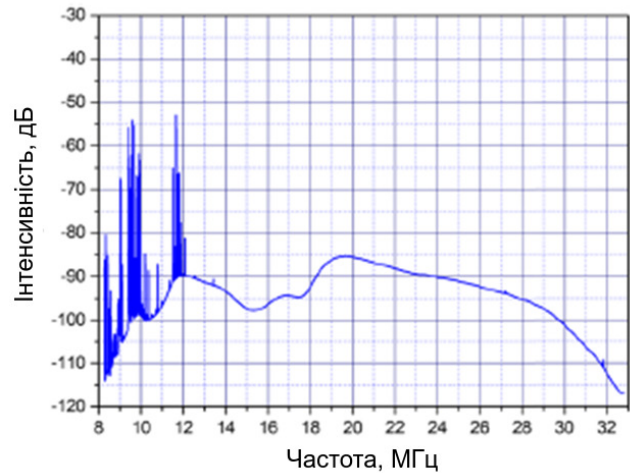


Рис. 7. Відгук радіотелескопа УТР-2 в нічний час

Fig. 7. Response of the UTR-2 radio telescope at night

Важливо підкреслити, що така смуга частот здається недостатньою для пошуку вельми широких космологічних ліній нейтрального водню (див. далі). Однак в обсерваторії ім. С. Я. Брауде поруч із радіотелескопом УТР-2 створюється радіотелескоп нового покоління ГУРТ. Незважаючи на те, що менші розміри (як показано вище, тут розмір не важливий), цей інструмент відрізняється низкою переваг, серед яких головною є значно ширша смуга частот, що становить 8–80 МГц. Телескоп ГУРТ збирається з 25-елементних двополяризованих субграток з аналоговим фазуванням у субгратці та цифровим між ними. На рис. 8–9 показані амплітудно-частотні характеристики ГУРТ у денний та нічний часи. Видно також значно більшу рівномірність коефіцієнта передачі, що також корисно.

Крім того, нижні лінії на обох малюнках показують рівень власних шумів субгратки, який на  $\sim 10$  дБ менший від антенної температури фону, що дає дуже високі значення  $m \approx 0.9$  [30].

Отже, очевидна доцільність використання субграток ГУРТ і навіть їхніх окремих елементів. Вони забезпечують необхідні смугу частот, чутливість, рівномірність коефіцієнта передачі, стабільність, заводськість, економічність та ефективність експлуатації. Нагадаємо, що субгратки та антенні елементи системи LOFAR (Нідерланди та інші країни Європи) та NeuFAR (Франція за участю українських радіоастрономів) мають схожі смуги частот 10(20)–80 МГц і також можуть координовано використовуватися в пошуках зміщених ліній HI на декаметрових-метрових хвилях.

Підкреслимо, що взагалі вигляд Всесвіту на найнижчих частотах, який можна спостерігати з поверхні Землі (це саме декаметровий діапазон), абсолютно не такий, ніж, наприклад, в оптиці або у високочастотній радіоастрономії. На декаметрах превалюють нетепло-



ві механізми радіовипромінювання, нестационарна нерівноважна радіоемісія під час поширення хвиль і заряджених частинок у магнітоактивній плазмі. Відбувається сильна взаємодія радіовипромінювання з плазмою (поглинання, рефракція, розсіяння), прояв-

ляються великомасштабна еволюція та тонкі атомні процеси. У такий спосіб низькочастотна радіоастрономія дає змогу отримувати унікальну інформацію, яка недоступна іншими методами астрофізичних досліджень.

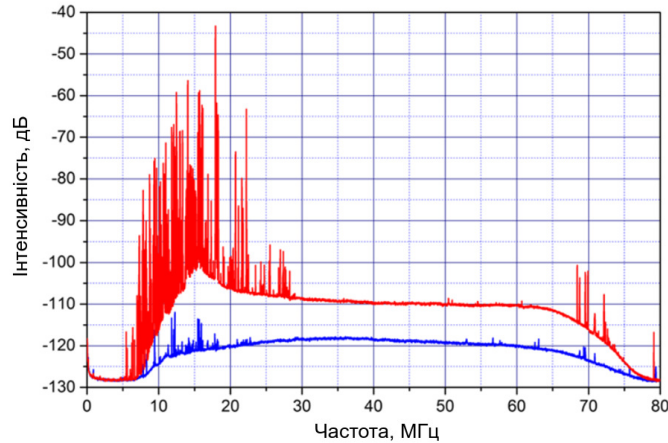


Рис. 8. Відгук субгратки радіотелескопа ГУРТ на радіовипромінювання галактичного фону (амплітудно-частотна характеристика з додаванням вузькосмугових радіозавад) у денний час. Червона лінія — антенна температура, синя — власні шуми субгратки

Fig. 8. Response of the subarray of the GURT radio telescope to the radio radiation of the galactic background (amplitude-frequency characteristic with the addition of narrow-band radio interference) during daytime. The red line is the antenna temperature, the blue line is the intrinsic noise of the subarray.

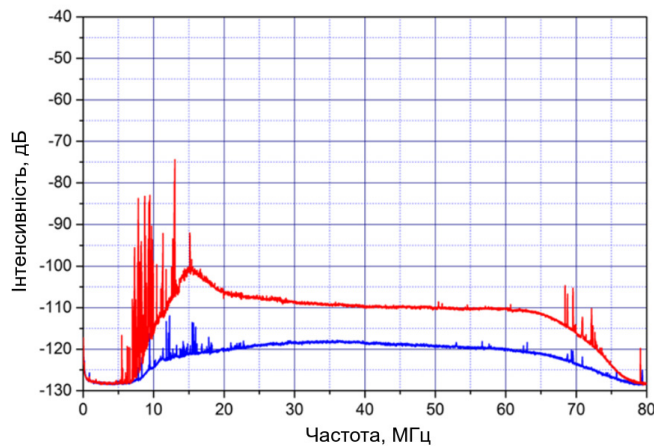


Рис. 9. Відгук ГУРТ у нічний час. Червона лінія — антенна температура, синя — власні шуми субгратки

Fig. 9. Response of the GURT at night. The red line is the antenna temperature, the blue line is the intrinsic noise of the subarray

Важливим прикладом низькочастотного астрофізичного феномену є нетеплове синхротронне радіовипромінювання Галактики, яке вже згадували вище. Воно формується завдяки рухові релятивістських електронів (один із компонентів космічних променів) у магнітному полі Галактики і дуже інтенсивне на декаметрових хвилях: досягає в середньому  $\sim 500\,000$  К на частоті 10 МГц та  $\sim 20\,000$  біля 30 МГц. Спектр випромінювання має степеневий вигляд типу  $T_B(\nu) \propto \nu^{-2.6}$ . На рис. 10 показана великомасштабна карта цього галактичного фону, що побудована на частоті 20 МГц (смуга реєстрації 20 кГц) комбінованим використанням секції УТР-2 та антени УРАН-2

(кутова роздільна здатність близько  $10^\circ$ ). Принципово є добре помітна зміна яскравісної температури фону залежно від координат (галактичних або екваторіальних). Так поблизу галактичної площини щодо полюсів зміна температури  $T_B$  досягає  $\sim 6$  дБ. На рис. 11 показана добова зміна інтенсивності прийнятого сигналу за орієнтації нерухомих у меридіані променів антен ГУРТ та УТР-2 в напрямку схилення  $\delta \approx 40^\circ$ , що відповідає радіоджерелу Лебідь А. Перетин наведеної карти на рис. 10 для відповідного схилення в інтервалі прямих сходжень  $\alpha = 0^h - 24^h$  забезпечується завдяки добовому обертанню Землі.

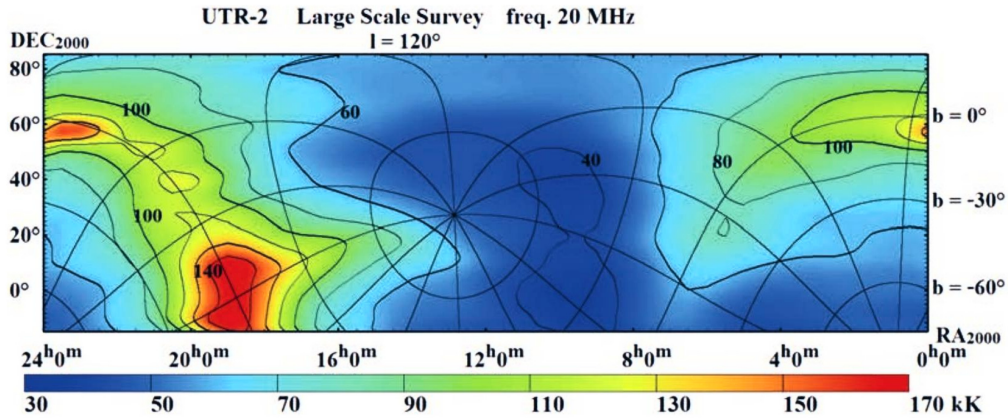


Рис. 10. Мапа радіовипромінювання галактичного фону на частоті 20 МГц [31]  
 Fig. 10. Map of radio emission of the galactic background at the frequency of 20 MHz [31]

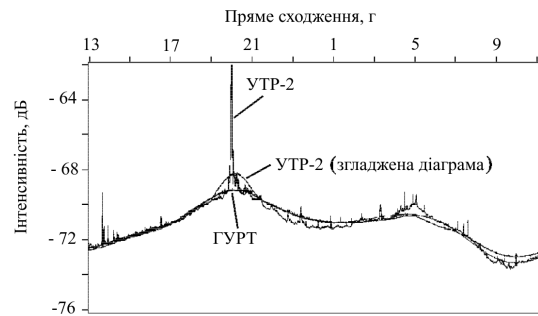


Рис. 11. Добовий скан радіовипромінювання Галактики за нерухомих діаграм спрямованості антен Схід-Захід УТР-2 та субгратки ГУРТ на частоті 25 МГц. Інтенсивний пік відповідає радіоджерелу Лебідь А (схилення складає  $40^{\circ}30'$ )  
 Fig. 11. Daily scan of the radio emission of the Galaxy with stationary directional diagrams of the East-West UTR-2 antennas and the GURT subarray at the frequency of 25 MHz. The intense peak corresponds to the radio source Cyg A ( $\delta = 40^{\circ}30'$ )

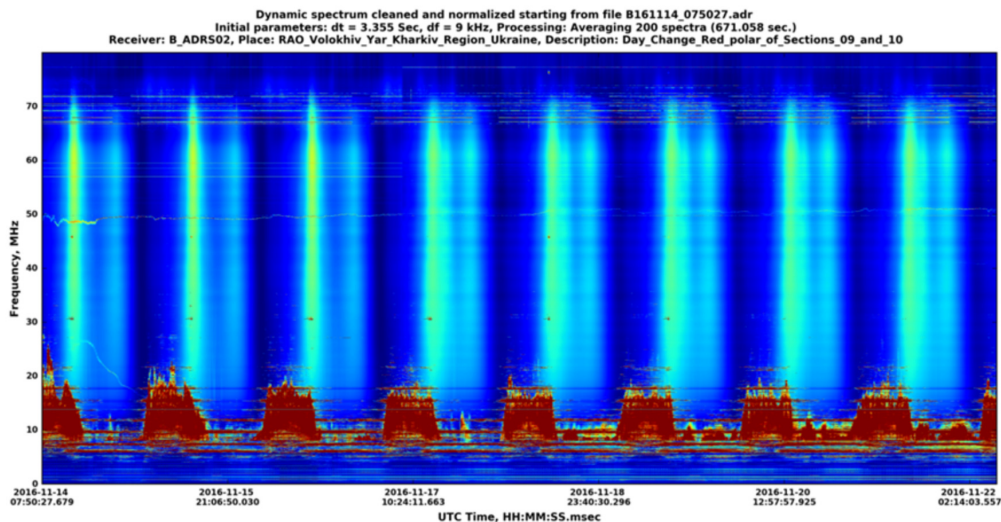


Рис. 12. Восьмиразове проходження Галактики через нерухому діаграму спрямованості субгратки ГУРТ, яка зорієнтована на схилення  $50^{\circ}$  (зенітне положення діаграми)  
 Fig. 12. Eight-time passage of the Galaxy through the fixed directional diagram of the GURT subarray, which is oriented at the inclination of  $\delta = 50^{\circ}$  (the zenith position of the diagram)



На рис. 12 показаний подібний експеримент, коли промінь субґратки ГУРТ орієнтований у зеніт  $\delta = 50^\circ$ . Результат упродовж 8 діб сканування подано у тривимірному вигляді: час–частота–інтенсивність (показана яскравість: світлий колір — максимум інтенсивності, темний — мінімум). Видно, що в усій смужці частот 8–80 МГц зміна інтенсивності не менша за 3 дБ і повторюється від доби до доби з високою точністю.

Важливо зазначити, що за подібних добових спостережень, але за допомогою лише одного антенного елемента (має дуже широку діаграмну спрямованість  $\theta_A \gtrsim 100^\circ$ ) також реєструється зміна інтенсивності сигналу від галактичного фону  $\sim 3$  дБ (удвічі). Сказане підтверджено вимірюваннями й на окремих активних антенних елементах ГУРТ, і на диполях УТР-2. Це також показано ще на початку 70-х років під час прецизійних експериментів на напівхвильових антенних диполях декаметрових хвиль [32]. Відповідна добова зміна інтенсивності корисна в упровадженні методики пошуку слабких ліній як під час використання антенґраток, так і для окремих елементів. В останньому випадку низька кутова роздільна здатність, як показано вище, допустима, оскільки досліджуване радіоджерело є ізотропним у просторі.

Описаний вище галактичний фон дає принципові обмеження на дослідження позагалактичних космологічних ефектів на декаметрових та метрових хвилях (це так званий “передній фон”). За своєю яскравістю температурою він у десятки й сотні тисяч разів перевищує температуру реліктового фону  $T_{\text{СМВ}}(0) = 2.73$  К, який і є “заднім” фоном у формуванні ліній НІ у поглинанні для  $z \sim 80$ . Отже, відносну інтенсивність шуканих ліній треба оцінювати, порівнюючи з галактичним фоном, який катастрофічно зменшує спостережуваність ліній у реальних експериментах.

### III. РАДІОСПЕКТРОСКОПІЯ НА ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ

Одним з головних досягнень декаметрової радіоастрономії є детектування екзотичного астрофізичного явища — спектральних ліній рекордно високозбуджених атомів міжзоряного вуглецю для головних квантових чисел  $n > 600$  ( $\nu < 30$  МГц). Це відкриття було зроблене близько 45 років тому саме в Україні за допомогою радіотелескопа УТР-2 [33]. Відповідні рекомбінаційні лінії вперше спостерігали в поглинанні на фоні потужного нетеплового радіовипромінювання. Таке явище поглинання дає додаткові переваги в надійній ідентифікації слабого ефекту та важливе для врахування в пошуку нових ліній поглинання. Задетектовані лінії стали новим ефективним засобом діагностики холодної, частково йонізованої міжзоряної плазми, а українські інструменти найзручніші для розвитку цієї перспективної методології [34], [35]. Невипадково, що за допомогою УТР-2 досліджено найбільшу кількість об’єктів Галактики в декаметровому діапазоні довжин хвиль, що важливо для майбутніх спостережень інших ліній у Галактиці та від позага-

лактичних джерел [36], [37]. Водночас важливі знання про головні параметри низькочастотних рекомбінаційних радіоліній та їх вплив на пошук космологічних ліній нейтрального гідрогену.

Частоти рекомбінаційних ліній визначаємо формулою Рідберга

$$\nu_{\text{RL}} = cZ^2R \left(1 - \frac{m}{M}\right) \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n + \Delta n)^2}\right], \quad (4)$$

де  $R$  — стала Рідберга,  $m$ ,  $M$  — маси електрона й атома відповідно,  $c$  — швидкість світла,  $Z$  — заряд ядра,  $n$ ,  $\Delta n$  — головне квантове число та його зміна. Легко показати, що на декаметрах відстань між сусідніми лініями становить ( $n \gg \Delta n \sim 1$ ):

$$\Delta\nu_{\text{RL}} \approx \frac{3\nu_{\text{RL}}}{n}. \quad (5)$$

У такий спосіб створюються серії ліній, що відповідають різним  $n$  та  $\Delta n$ . Незалежні серії виникають для різних атомів (ізотопічний зсув) відповідно до коефіцієнта  $(1 - m/M)$ . Як приклад розгляньмо лінію однократно йонізованого вуглецю ( $Z = 1$ ), яка виникає внаслідок переходу електрона між сусідніми рівнями з головними квантовими числами 640 та 639 (лінії, що виникають під час переходів  $\Delta n = 1$ , називають  $\alpha$ -лініями). Частота переходу відповідно до (4) дорівнює  $\nu_{\text{RL}}(640) \approx 25$  МГц, відстань до сусідньої лінії ( $n = 641 \rightarrow n = 640$ ) відповідно до (5) становить  $\Delta\nu_{\text{RL}} \sim 125$  кГц.

Інтегральну відносну інтенсивність ліній визначаємо як [34]

$$I_{\text{RL}} = \int \Delta T_{\text{RL}}/T_{\text{B}} d\nu \approx 2 \cdot 10^6 \frac{N_e^2 l b_n \beta_n}{T_e^{5/2}}, \quad c^{-1},$$

де  $\Delta T_{\text{RL}} = -T_{\text{B}}\tau_{\text{RL}}$  — абсолютна інтенсивність за оптичної глибини  $\tau_{\text{RL}}$ ,  $N_e, T_e$  — електронні густина та температура міжзоряної хмари,  $l$  — її довжина вздовж променя зору,  $b_n, \beta_n$  — коефіцієнти нерівноважності, що визначаються заселеністю атомних рівнів.

Ширина відповідних ліній визначається доплерівським  $\Delta\nu_{\text{D}}$ , штарківським  $\Delta\nu_{\text{P}}$  та радіативним  $\Delta\nu_{\text{R}}$  механізмами й дорівнює [34]

$$\Delta\nu_{\text{DPR}} = \sqrt{\Delta\nu_{\text{D}}^2 + (\Delta\nu_{\text{P}} + \Delta\nu_{\text{R}})^2}.$$

На сьогодні добре встановлено, що декаметрові рекомбінаційні лінії вуглецю виникають у частково йонізованих холодних дифузних міжзоряних хмарах гідрогену, коли останній є практично нейтральним, а вуглець — повністю йонізований [37]. Це відбувається завдяки різним потенціалам йонізації:  $E_{\text{H}} = 13.6$  еВ, а  $E_{\text{C}} = 11.2$  еВ (головне джерело йонізації — ультрафіолетові кванти з довжиною хвилі  $913 \text{ \AA} < \lambda < 1100 \text{ \AA}$ ). Фізичні умови в подібних хмарах такі: електронна температура  $T_e \sim 50 - 100$  К, електронна концентрація  $N_e \sim 1 - 0.001 \text{ см}^{-3}$ , розмір  $l \sim 1 - 100$  пк, турбулентний рух  $\Delta V_{\text{T}} \sim 10$  км/с (1 кГц), максимальна радіальна швидкість  $V_r \sim 300$  км/с (30 кГц).

Водночас головні параметри декаметрових ліній, що підтверджуються експериментами та розрахунками, становлять: відстань між лініями  $\Delta_{RL} \approx 120$  кГц, кількість  $\alpha$ -ліній в інтервалі 8–33 МГц,  $N_{RL} \approx 300$ , ширина ліній  $\Delta\nu_{DPR} \approx 1 - 10$  кГц, відносна інтенсивність  $\Delta T_{RL}/T_B \sim 10^{-3} - 10^{-5}$ , інтегральна відносна інтенсивність  $I_{RL} \sim 10 - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

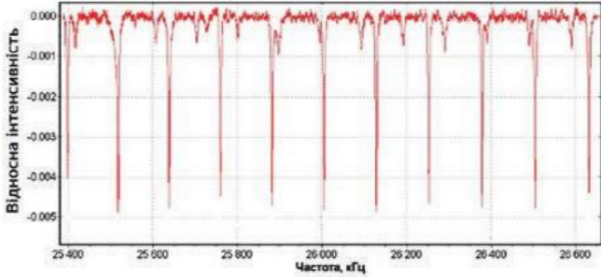


Рис. 13. Високочутливі одночасні спостереження десяти рекомбінаційних радіоліній вуглецю C 627 $\alpha$ -C 636 $\alpha$  поблизу частоти 26 МГц

Fig. 13. High sensitive simultaneous observations of ten recombination radio lines of carbon C 627  $\alpha$ -C 636  $\alpha$  near the frequency of 26 MHz

Для підтвердження сказаного на рис. 13, 14 показаний приклад детектування рекомбінаційних ліній на частоті  $\sim 26$  МГц у напрямку радіоджерела Касіопея А. Параметри ліній досить типові і для інших об'єктів Галактики.

Отже, видно, що в Галактиці є величезна кількість рекомбінаційних ліній у всьому спектрі декаметрових хвиль [37], [38]. Головно вони концентруються поблизу галактичної площини, але спостерігаються й на досить великих галактичних широтах  $|b| > 10^\circ$ . Незважаючи на порівняно низьку інтенсивність, вони все ж таки суттєво перевищують абсолютну та відносну інтенсивність космологічних ліній HI, які плануються для пошуку. Однак багаті знання стосовно параметрів низькочастотних рекомбінаційних ліній дають підстави сподіватися на їх результативне відокремлення від радіоспектроскопічного спостережного ефекту, пов'язаного з лінією поглинання HI, зміщеною на декаметрові хвилі.

Як впливає з розділу I та супутньої статті [21], головні параметри очікуваної лінії такі:

частота лінії 21 см гідрогену у власній системі відліку  $\nu_H = 1420$  МГц, червоне зміщення  $z \approx 87$ , частота зміщеної розширенням Всесвіту лінії для спостерігача на Землі  $\nu_L \sim 16$  МГц, інтенсивність (середня)  $\Delta T_L \approx 0.04 \text{ K}^4$ , ширина на рівні 0.5 максимуму  $\Delta\nu_L \approx 25$  МГц, ширина на рівні 0.1 максимуму  $\Delta\nu'_L \approx 50$  МГц, поляриність від'ємна, поляризація відсутня, кутовий розмір джерела  $\Theta_S = 4\pi$  (ізотропне), температура “заднього фону”  $T_{\text{СМВ}}(0) \approx 2.73$

<sup>4</sup> У розділі I, у супутній статті [21] та в [15, 16] диференціальна яскравісна температура в лінії 21 см нейтрального гідрогену позначена  $\delta T_{\text{Br}}$ , тут і далі  $\Delta T_L$

К, температура “переднього фону” поблизу 20 МГц  $T_B = 40000 \text{ K}$ .

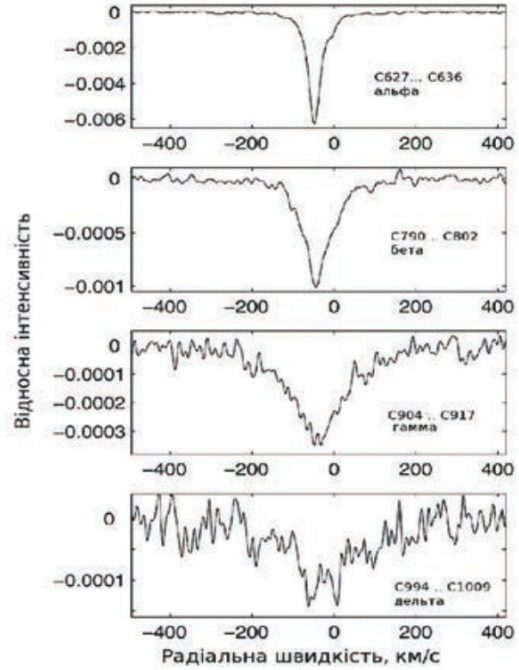


Рис. 14. Детектування  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ -рекомбінаційних радіоліній та відкриття рекордно високобуджених станів міжзоряних атомів на рівнях  $n \sim 1000$

Fig. 14. Detection of  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ -recombination radio lines and discovery of record highly excited states of interstellar atoms at  $n \sim 1000$  levels

Отже, з урахуванням наведених вище параметрів лінії, радіоспектроскопічних вимог та досвіду попередніх досліджень на декаметрових хвилях сформулюємо головні параметри експериментів.

1. Смуга аналізу  $\Delta F = (2 - 10)\Delta\nu_L \approx 50 - 250$  МГц.
2. Роздільна здатність за частотою  $\Delta f = \Delta\nu_{\text{obs}}/(1 - 10) \approx 25 - 2.5$  МГц.
3. Кількість частотних каналів  $M = \Delta F/\Delta f_{\text{min}} = 20 - 100$ .
4. Частота дискретизації  $F \geq 2\Delta F = 100 - 500$  МГц.
5. Розрядність дискретизації  $q = 16$  біт.
6. Роздільна здатність з погляду радіозавад та рекомбінаційних ліній  $\Delta f_{\text{RFI}} = 1 - 10$  кГц.
7. Кількість каналів  $M_{\text{RFI}} = 5000 - 25000$ .
8. Кутова роздільна здатність  $\Theta_A = 30^\circ - 180^\circ$ .
9. Поляризація  $N_p = 2$ .
10. Відносна чутливість  $(T_B \gg T_{\text{СМВ}}) \Delta T_L/T_B \approx 10^{-6}$ .
11. Відношення сигнал/шум  $S/N \rightarrow 10$ .
12. Рівень флуктуацій на спектрах  $\sigma \leq (\Delta T_L/T_B)/(S/N) = 10^{-7}$ .

13. Роздільна здатність за часом не потрібна (ефект стаціонарний).

14. Тип спектроаналізатора а) цифровий автокореляційний, б) цифровий із прямим швидким перетворенням Фур'є.

Прокоментуємо та звернемо увагу на деякі важливі вимоги до експерименту в галузі низькочастотної радіоастрокосмофізики.

Смуга аналізу повинна бути в декілька разів більшою, ніж ширина лінії. Це забезпечує реалізацію відносних спектроскопічних вимірювань, які набагато точніші, ніж абсолютні. Інтенсивність у лінії порівнюємо з сусіднім рівнем спектра, де ліній завідомо немає, саме тому ми обираємо антену ГУРТ зі смугою 8–80 МГц. Оцінки показують, що досягнути значно ширшої смуги за збереження максимальних чутливості  $m \sim 0.9$  та завадостійкості практично неможливо. Антенні елементи на зворотному боці Місяця в майбутньому поліпшать ситуацію.

Роздільна здатність повинна бути в декілька разів ліпшою, ніж ширина лінії, щоб з'ясувати форми ліній (кількість каналів декілька десятків).

За наявності вузькосмугових радіозавад, що притаманні декаметровим хвилям, роздільна здатність повинна бути досить високою ( $\leq 10$  кГц), а кількість каналів досягати багатьох тисяч. Суперечливість двох останніх вимог знімається використанням вищої роздільної здатності на етапі спостережень, а під час вторинної обробки отриманих спектрів із завадами й рекомбінаційними лініями останні усуваються спеціальною цифровою фільтрацією, а потім самі спектри “згладжуються” за частотою й відповідно до очікуваної ширини космологічних ліній.

За вказаних умов ключовим параметром радіоспектроскопії слабких ліній є необхідний час накопичення  $\Delta t$  за заданих чутливості й роздільної здатності. Тоді відповідно до (3) маємо

$$\sigma = \Delta T_{\min}/T_B = 1/\sqrt{\Delta f \Delta t} = 10^{-7}, \quad (6)$$

що за  $\Delta f = 2.5$  МГц дає

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f \cdot \sigma^2} = 463 \text{ доби}. \quad (7)$$

Це надзвичайно великий час неперервних спостережень ( $\approx 1.3$  роки), що практично неможливо реалізувати.

Однак є можливість значного зменшення  $\Delta t$  враховуючи деякі вище наведені обставини. Якщо знехтувати з'ясуванням форми лінії, а зосередитися на факті власне детектування (вузькосмугові завади вже усунені), то під час вторинної обробки можна додатково згладити спектри із частотною роздільною здатністю  $\Delta f = \Delta \nu_L = 25$  МГц (це оптимально з погляду теорії детектування ефекту). Як видно з (7), тривалість накопичення зменшується в 10 разів і стає цілком реальною:

$$\Delta t = \frac{1}{25 \cdot 10^6 \times 10^{-14}} \text{ сек} \approx 46 \text{ діб}.$$

На жаль, є додаткові завадові чинники, які значно ускладнюють експерименти з пошуку вкрай слабких та досить широких позагалактичних спектральних ліній, що буде розглянуто в наступних підрозділах.

#### IV. ЗАВАДОВІ РАДІОСПЕКТРОСКОПІЧНІ ЧИННИКИ ТА МЕТОДИ ПОШУКУ КОСМОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ГІДРОГЕНУ НА ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ

На рис. 15 показана структура запропонованого експерименту. У лівій частині зображені позагалактичні ділянки видимого Всесвіту, що містять астрофізичні об'єкти досліджень — реліктове радіовипромінювання з яскравісною температурою  $T_{\text{СМВ}} \approx 2.73$  К, на тлі якого формується лінія поглинання гідрогену з інтенсивністю  $\Delta T_L$  і пошук якої — головна мета експерименту. Значно ближче є Галактика з потужним нетепловим радіовипромінюванням, що має неперервний спектр із значним градієнтом, заповнює все небо, але має зміну інтенсивності на кілька дБ  $T'_B$  та  $T''_B$  залежно від галактичних координат. У Галактиці формуються низькочастотні вузькосмугові рекомбінаційні радіолінії, описані в попередньому підрозділі, які мають інтенсивність  $\Delta T'_{LR}$  та  $\Delta T''_{LR}$  і залежать від фонового радіоджерела  $T'_B$  та  $T''_B$  та фізичних умов відповідно до оптичної глибини  $\tau'_{LR}$  і  $\tau''_{LR}$ . У правій частині малюнка наведена спрощена схема радіотелескопа, що складається з власне антенної системи, антенних та магістральних підсилювачів (АП, МП), ліній передачі сигналів, спектроаналізаторів, комп'ютерів реєстрації та обробки інформації для отримання кінцевого результату (на малюнку внизу), калібрувальних генераторів шуму ГШ1 та регульованих атенюаторів АТ1. Діаграма спрямованості антени (ДС) із шириною  $\Theta_A$  зміщується щодо Галактики через добове обертання Землі. У навколосемному просторі наявні вузькосмугові радіозавади від радіостанцій  $\Delta I_{\text{RFI}}$  (згадані у попередньому підрозділі), а також порівняно широкосмугові завади, що виникають завдяки певним атмосферним (точніше, йоносферно-магнітосферним) явищам.

Як видно із сказаного, лише один із факторів, що показані на рисунку, є позитивним і стосується предмета пошуку та досліджень — космологічна лінія нейтрального гідрогену, що зміщена в декаметровий діапазон радіохвиль і має від'ємну інтенсивність  $\Delta T_L$ . Усі інші параметри та явища, що показані на малюнку та приймаються (або формуються) радіотелескопом, є завадовими і вражаюче ускладнюють розв'язання поставленої задачі. Проаналізуємо їх докладніше, оскільки боротьба з ними — головна мета спостережної методології, яку пропонуємо в нашій роботі.

##### А. Вільно-вільне поглинання

Вільно-вільне поглинання радіовипромінювання  $T_B$  та  $\Delta T_L$  у плазмовому середовищі Галактики. Як видно з рис. 15, на шляху розповсюдження позагалактичного радіовипромінювання до спостерігача є товстий шар нашої Галактики з приблизним розміром 20 кпк на 1 кпк, головною складовою якого є цілком або частково йонізоване міжзоряне середовище. Одним з





### В. Вузькосмугові радіозавади

Вузькосмугові радіозавади  $\Delta I_{\text{RFI}}$  від випромінювань радіостанцій, спеціальних службових радіосистем, паразитних радіовипромінювань власне радіотелескопа (комп'ютери, монітори, генератори, блоки живлення та ін.). Це притаманне саме декаметровим хвилям, але завдяки багаторічному досвіду досліджень у цьому діапазоні розвинуті методи моніторингу завад, поліпшена електромагнітна сумісність засобів, упроваджені критерії ідентифікації корисних сигналів та завад, включно з повним усуненням останніх. У разі пошуку космологічних ліній гідрогену головним критерієм ідентифікації є принципова різниця в частотній ширині ефектів для  $\Delta T_L$  ( $\Delta \nu_L \sim 25$  МГц) та  $\Delta I_{\text{RFI}}$  ( $\Delta f_{\text{RFI}} = 1 - 10$  кГц). Дуже перспективним є використання методів машинного навчання в проблемах боротьби з такими та іншими типами завад у низькочастотній радіоастрономії. У всякому разі необхідні висока частотна роздільна здатність на етапі спостережень  $\Delta f_{\text{RFI}} = 1 - 10$  кГц, відповідне очищення від завад й усереднення за частотою до  $\Delta f = 2.5 - 25$  МГц.

### Г. Низькочастотні радіозавади природного походження

Низькочастотні радіозавади  $\Delta I_{\text{ATM}}$ , пов'язані з явищами в нижній атмосфері, йоносфері та магнітосфері Землі. Типовим прикладом природних імпульсних радіозавад у низькочастотній радіоастрономії є коротке в часі радіовипромінювання, що виникає під час електростатичних розрядів в атмосфері — блискавках. Хоча цей ефект досить потужний, на перший погляд, він не є небезпечним - ширина в часі дуже мала — декілька мс, а спектр досить широкий, неперервний, без спектральних особливостей. Але це справедливо для “близьких” блискавок. Завдяки йоносферному поширенню радіохвиль від “далеких” розрядів можлива поява спектральних особливостей, які мають ширину від одиниць до десятків МГц, що небезпечно, оскільки подібне до спектральної ширини шуканого ефекту. Нещодавно схожий завадовий ефект був виявлений під час спостережень на УТР-2. Вірогідно, він зумовлений суперпозицією сигналів величезної кількості блискавок, що притаманне тропічним широтам (близько 100 блискавок у секунду, інтервал між ними становить  $\sim 10$  мс). Відбиваючись від йоносфери на певних частотах ( $\lesssim 15$  МГц), сигнали приходять до радіотелескопа під кутами  $\Delta \approx 10^\circ - 40^\circ$  над горизонтом і створюють додаткову порівняно широкосмугову потужність в інтервалі  $\sim 8 - 15$  МГц, що небезпечно, оскільки є в інтервалі параметрів очікуваної лінії НІ. Однак установлено, що подібний широкосмуговий спектральний ефект спостерігається за низької часової роздільної здатності  $\Delta t_p > 100$  мс. За високої роздільної здатності  $\Delta t_p = 1 - 10$  мс квазінеперервний за часом і частотою ефект розділяється на окремі імпульси, які вже набагато простіше відфіль-

трувати на тлі стаціонарного в часі широкосмугового ізотропного явища космологічної лінії гідрогену. До того ж спостереження в зенітних напрямках, особливо з помірно вузькою діаграмою спрямованості, суттєво зменшать указаний завадовий ефект.

Крім вказаного, є деякі інші атмосферно-магнітосферні частотно-залежні радіофізичні явища (авроральна емісія, шуманівські резонанси та ін.). Але всі вони зосереджені на вкрай низьких частотах  $\ll 1$  МГц і не впливають на якість експериментів у радіоастрономії декаметрових хвиль.

У зв'язку з просторовою ізотропністю шуканого радіоджерела такі низькочастотні негативні явища, як: рефракція, розсіяння, мерехтіння в йоносфері, у міжпланетному й міжзоряному середовищах — не мають значення. Поглинанням йоносфери на частотах  $> 8$  МГц можна знехтувати.

Отже, як і в п. В, на етапі спостережень необхідна висока часова роздільна здатність  $\Delta t_p < 10$  мс, потім — очищення сигналів від імпульсних завад (включно з методами машинного навчання), а на етапі вторинної обробки забезпечується необхідне усереднення за часом до значення  $\Delta t \approx 4 \cdot 10^6$  с.

Усунення радіозавад природного походження, які спричиняються сплесками Сонця та Юпітера з багатою частотно-часовою структурою та максимумом інтенсивності на декаметрових хвилях, також потребує достатньо високого частотно-часового розділення на етапі спостережень. Як і раніше, відповідна фільтрація на етапі вторинної обробки можлива способом машинного навчання.

### Д. Рекомбінаційні лінії

$\Delta T_{\text{LR}}$  займають особливе місце серед усіх інших завадових ефектів, що приходять у радіотелескоп з навколишнього середовища. Насамперед це єдиний чинник, що має від'ємну полярність, як і лінія гідрогену  $\Delta T_L$ . Якщо врахувати значення  $\Delta T_{\text{LR}}$  на три порядки більше, ніж  $\Delta T_L$ , то здається, що всюди наявні в Галактиці рекомбінаційні лінії дуже небезпечні з погляду їх надійного відокремлення від позагалактичного ефекту. Однак не випадково в розділі III докладно описані фізика формування цих незвичайних ліній та всі їхні параметри. У наслідку вказані лінії стають найбільш детермінованим та стабільним завадовим чинником на тлі усіх інших, які мають вкрай нестаціонарний і навіть спорадичний характер. Отже, добре відомі описані вище мала ширина ліній  $\Delta \nu_{\text{DPR}} = 1 - 10$  кГц  $\ll \Delta \nu_L \approx 25$  МГц, їхня частота  $\nu_{\text{RL}}$  та відстань між ними  $\Delta \nu_{\text{RL}} \approx 100$  кГц (профілі лінії НІ із шириною  $\Delta \nu_L \approx 25$  МГц знаходиться приблизно 200 рекомбінаційних ліній), інтенсивність цих ліній залежно від фізичних умов у середовищі та розподіл ліній у Галактиці дають підстави сподіватися на ефективні ідентифікацію та усунення рекомбінаційних радіоліній із широкосмугових спектрів, що містять космологічні лінії нейтрального гідрогену в діапазоні декаметрових радіохвиль.

Нижче розглянемо ще три типи паразитних спектральних ефектів (небезпечних завадових чинників), які, на відміну від попередніх, виникають у самому радіотелескопі й недостатньо описані в попередніх дослідженнях.

### Е. Апаратурний шум $\Delta G$

Кожен радіотелескоп складається з великої кількості радіотехнічних засобів та елементів — антен, фільтрів, підсилювачів, фазообертачів, ліній передачі, розгалужувачів сигналів, атенуаторів, реєстраторів. Усі вони мають частотно-залежні характеристики передачі, які зумовлюються детермінованими активними та реактивними елементами, а також непрогнозованими паразитними ємностями, індуктивностями, резисторами [40]. Як наслідок формуються нерівномірні за частотою функції передачі з характерними коливаннями з періодом від одиниць до десятків МГц та амплітудою  $\Delta G = T_B \cdot \Delta k_1$ , що збігається із шириною очікуваної лінії НІ. Додатковою небезпекою є те, що вказані коливання за частотою відбуваються навколо певного середнього спектра потужності  $G(\nu) \sim T_B(\nu)$  і тому можуть мати від'ємну полярність. Ретельне налагоджування елементів дає змогу мінімізувати вказані коливання, але зменшити їх до рівня меншого за 1% від середнього неможливо. Отже, цей паразитний спектральний ефект може перевищувати очікувану інтенсивність лінії НІ на чотири порядки, що потребує використання спеціальних методів спостережень (див. далі).

### Ж. Апаратурний шум $\Delta P$

Завадовий ефект, що позначений на рис. 15 як  $\Delta P \propto T_B \Delta k_2$ , видається подібним до попереднього  $\Delta G$ , але має іншу фізику походження і також небезпечний. Із теорії довгих ліній передачі сигналів відомо, що потужність відбитого шумового сигналу з рівномірним спектром від навантажень, що з'єднує довга лінія, становить

$$P_{\text{в}}(f) = r^2 \cos(4\pi Lf/V_{\text{ф}}),$$

де  $r$  — коефіцієнт відбиття від навантажень ( $r = 0-1$ ),  $L$  — довжина лінії,  $V_{\text{ф}}$  — фазова швидкість поширення радіохвилі в лінії передачі (радіочастотному кабелі),  $f$  — частота спектра.

Видно, що для типових радіотехнічних параметрів УТР-2, УРАН, ГУРТ, а саме,  $r \approx 0.1$ ,  $L \approx 1-100$  м;  $V_{\text{ф}} = 200000$  км/с, маємо, що амплітуда коливань уздовж частоти становить  $r^2 = 0.01$  (1%), а період паразитних коливань для типових довжин з'єднувальних кабелів у структурі радіотелескопа від 1 м до 100 м лежить в інтервалі від 1 МГц до 100 МГц. Отже, цей завадовий ефект також може збігатися із шириною лінії  $\Delta \nu_L \approx 25$  МГц, може мати як позитивну, так і від'ємну полярність і є досить потужним — на чотири порядки більшим, ніж інтенсивність  $\Delta T_L$ .

### И. Апаратурний шум $\Delta Q$

Можливий завадовий ефект  $\Delta Q \propto T_B \cdot \Delta k_3$  виявили нещодавно українські радіоастрономи [41]. Він також схожий за проявленням з попередніми двома ефектами (коливання потужності рівномірного шумового спектра у функції частоти). Але тут ефект пов'язаний з розміщенням антенних елементів на певній висоті над ґрунтом, особливо, коли останній є дво- або багат шаровим. Як показують розрахунки [41], відбуваються різнополярні коливання щодо середнього значення з амплітудою до 10% і періодом від одиниць до десятків МГц. Як і в попередніх випадках, це може бути дуже схожим на спектральний ефект, що шукається як космологічна лінія НІ, є небезпечним і вимагає спеціальних методів завадостійких спостережень.

У кожному радіоастрономічному експерименті доводиться стикатись із класичною спостережною проблемою — виявлення слабкого ефекту (спектральна лінія, сигнал від джерела неперервного радіовипромінювання, імпульсний або спорадичний сигнал) на тлі потужного шумового випромінювання із широким спектром. Це можуть бути власні шуми радіоастрономічного приймача або яскравісна температура галактичного фону, як на декаметрових хвилях. Для усунення цього потужного "п'єдесталу" традиційно використовують метод порівняння із шумовим спектром еталонного джерела, який віднімається від спектра, що приймається радіотелескопом. Різні підходи до цього методу називають модуляційними або компенсаційними [28]. На рис. 15 показане таке еталонне джерело — генератор шуму ГШ1, потужність якого регулюється атенуатором АТ1. Бажано, щоб потужність і спектр такого генератора  $T_{\text{ВН}}(\nu)$  були максимально близькими до параметрів фону  $T_{\text{В}}(\nu)$ , що забезпечити на практиці непросто. Іноді використовують числову апроксимацію широкошумового спектра (вважається, що всі завадові ефекти вже усунені) на етапі вторинної обробки, але треба бути впевненим, що динамічний діапазон реєстрації космічних сигналів і точність апроксимації поліномом певного ступеня є достатніми.

Метод порівняння зі спектром еталонного генератора шуму використовували в експериментах з пошуку та дослідження рекомбінаційних ліній на декаметрових хвилях більше як 40 років тому [42]. На рис. 16, показаний один з перших спектрів (а), що був виміряний на УТР-2 влітку 1978 року. Він є різницею між спектром космічного радіовипромінювання радіоджерела Касіопея А  $S_A(\nu)$  і спектром, що виміряний окремо без радіотелескопа, але з під'єднанням до спектроаналізатора генератора шуму ГШ1 зі спектром  $S_{\text{ГШ}}(\nu)$  подібно до того, як показано на рис. 15. Як видно, "п'єдестал" відсутній, але спектр спотворений (не є пласким, базова лінія не дорівнює 0) завдяки передусім указаному вище значному градієнту частотно-залежного галактичного фону. Дивлячись на цей виміряний спектр, практично неможливо стверджувати про детектування спектральної лінії, необхідно використовувати адекватну методику



обробки. У праці [42] була запропонована нова процедура корекції базової (“нульової”) лінії, простіша, однозначна та ефективніша, ніж традиційна апроксимація поліномом, коли завжди є проблема у виборі ступеня полінома та кількості точок апроксимації.

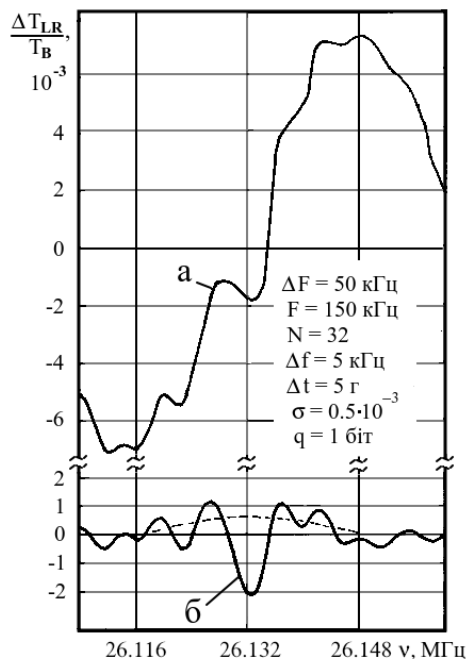


Рис. 16. Детектування міжзоряних рекомбінаційних радіоліній на декаметрових хвилях  
 Fig. 16. Detection of interstellar recombination radio lines at decameter waves

Нагадаємо, що для декаметрової радіоспектроскопії на УТР-2 близько 50 років тому був розроблений та впроваджений уперше в колишньому СРСР радіоастрономічний цифровий кореляційний спектроаналізатор на інтегральних мікросхемах [43]. Цей високо-ефективний прилад вимірював автокореляційну функцію досліджуваного сигналу за алгоритмом

$$R(nT) = \sum_{i=1}^M x(iT)x(iT + nT),$$

де  $x(iT)$  — дискретизований за часом та амплітудою вхідний сигнал,  $T$  — період дискретизації (частота  $F = 1/T$ ),  $i$  — номер відліку вхідного сигналу,  $n$  — номер відліку автокореляційної функції,  $M$  — загальна кількість відліків вхідного сигналу,  $MT$  — загальний час накопичення в корелометрі,  $N = n_{\max}$  — загальна кількість каналів корелометра.

Метод порівняння був реалізований безпосередньо в корелометрі вимірюванням диференційної автокореляційної функції як різниці між функціями від антени та генератора шуму

$$R(nT) = R_A(nT) - R_{\Gamma\text{Ш}}(nT).$$

На етапі вторинної обробки розраховували диференційний спектр способом прямого дискретного Фур'є-перетворення

$$S(\nu) = S_A(\nu) - S_{\Gamma\text{Ш}}(\nu) = 2T \sum_{n=1}^N R(nT) \cos(2\pi\nu nT), \quad (10)$$

що і показано на рис 15 (а).

Легко зрозуміти, що вказані “гладкі” спотворення широкосмугового спектра формуються початковими відліками автокореляційної функції, тоді як за вузькосмугову спектральну лінію відповідальні всі відліки, включно з  $n_{\max} = N$ .

Отже, уперше показано [42], що “відсічення” початкової ділянки автокореляційної функції  $R(nT)$  за кількістю  $n = N_K$  за умови  $N_K \ll N$  перед Фур'є перетворенням повністю ліквідує широкосмугові спотворення спектра, не впливаючи на вузькосмугові спектральні деталі. Це демонструється на рис. 16 (б), коли скоригований спектр отримано вкрай простим перетворенням, що практично не відрізняється від (10)

$$S(\nu) = 2T \sum_{n=N_K}^N R(nT) \cos(2\pi\nu nT),$$

де  $N_K = 6$ .

Оскільки в розробленому автокорелометрі [43] вимірюється нормована функція ( $R(0) = 1$ ), то диференційний спектр стає центрованим, тобто

$$\int_0^{\infty} S(\nu) d\nu = 0.$$

Як видно з рис. 16 (б), невелике зміщення спостережуваної спектральної лінії дуже легко центрується стосовно максимуму лінії, що показано на рис. 16 (б) пунктиром.

За допомогою вказаного перетворення з відсіченням ділянки  $R(nT)$  довжиною  $n = N_K = 3 - 6$  оперативно оброблено багато тисяч вимірних спектрів, що показало високу ефективність процедури та повністю довело надійність детектування нового астрофізичного явища — міжзоряних рекомбінаційних ліній поглинання рекордно високозбуджених атомів на екстремально низьких радіочастотах.

Наведені вище історичні науково-технічні результати показують не тільки можливості ефективної корекції “нульової” лінії в спектрах. Вони демонструють також правильність вибору параметрів спектроскопічного пошукового експерименту відповідно до очікуваних параметрів міжзоряних низькочастотних спектральних ліній (апробація вибору параметрів для пошуку космологічних ліній HI):

- частота лінії  $\nu_L = 26.13$  МГц (декаметрові хвилі);
- лінія нейтрального водню, або рекомбінаційна;
- абсолютна інтенсивність  $\Delta T_L \sim 30$  К;
- температура фону  $T_B \sim 30\,000$  К;
- відносна інтенсивність  $\Delta T_L / T_B \sim 10^{-3}$ ;
- ширина лінії  $\Delta \nu_L = 10$  кГц ( $\sim 100$  км/с);

поляризація відсутня;

кутовий розмір джерела  $\Theta_S = 0.5^\circ - 10^\circ$ .

Тоді параметри експерименту, що були сформульовані близько 50 років тому, полягають у наступному (у термінах, представлених наприкінці розділу III):

1. Смуга аналізу  $\Delta F = (2 - 10)\Delta\nu_L = 20 - 100$  кГц.
2. Роздільна здатність за частотою  
 $\Delta f = \Delta\nu_L / (1 - 10) = 1 - 10$  кГц.
3. Кількість частотних каналів  
 $N = \Delta F / \Delta f_{\min} = 20 - 100$ .
4. Частота дискретизації  $F \geq 2\Delta F = 40 - 200$  кГц.
5. Розрядність дискретизації  $q = 1 - 16$  біт.
6. Роздільна здатність з точки зору радіозавад  
 $\Delta f_{\text{RFI}} = \Delta f = 1 - 10$  кГц.
7. Кількість каналів  $N_{\text{RFI}} = N = 20 - 100$ .
8. Роздільна здатність за простором  $\Theta_A = \Theta_S = 0.5^\circ - 10^\circ$ .
9. Відносна чутливість  $\Delta T_e / T_D \approx 10^{-3}$ .
10. Відношення сигнал-шум  $S/N \geq 10$ .
11. Рівень флуктуацій на спектрах  
 $\sigma \leq (\Delta T_L / T_B) / (S/N) = 10^{-4}$ .

Відповідно до (7) оцінено необхідний час накопичення для роздільної здатності  $\Delta f$  від 1 кГц до 10 кГц:

$$\Delta t = 1 / (\Delta f \sigma^2) = 10^4 - 10^5 \text{сек} \approx 3 - 30 \text{годин}.$$

Обрані і реалізовані параметри експерименту наведені на рис. 16. Разом з високоякісним радіотелескопом УТР-2 вони дали змогу успішно задетектувати вельми слабкий радіоспектроскопічний ефект. Сказане підтверджується також значно чутливішими експериментами [35], що показані на рис. 13, 14. За смуги аналізу  $\Delta F \approx 1.5$  МГц та ефективного часу накопичування  $\Delta t = 5000$  годин досягнута рекордна чутливість  $\sigma \approx 10^{-5}$ . Вочевидь, коли наведені дані з роздільною здатністю  $\Delta f \approx 1$  кГц “згладити” до  $\Delta f \approx 25$  МГц, то чутливість стане близькою до  $\sigma = 10^{-6} - 10^{-7}$ , що треба для пошуку лінії HI. Це доводить гарні перспективи виконання багатьох астрофізичних завдань, пов’язаних з радіоспектроскопією космічного випромінювання на декаметрових хвилях.

Водночас є принципова різниця в описаних вище експериментах стосовно рекомбінаційних ліній та новій задачі пошуку космологічної лінії HI на декаметрових хвилях.

Передусім чотири головні параметри експерименту — ширина лінії  $\Delta\nu_L$ , смуга аналізу  $\Delta F$ , кількість каналів  $N$  та відносна інтенсивність  $\Delta T_L / T_B$  — відрізняються в багато кількість разів — на три-чотири порядки! Як видно, при дослідженнях вузьких рекомбінаційних ліній та, відповідно, у смузі аналізу практично відсутні завади  $\Delta I_{\text{RFI}}$  (можна знайти “вікна”), чинники  $\Delta I_{\text{АТМ}}$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  набагато ширші, ніж  $\Delta\nu_L$  і навіть  $\Delta F$ . Останні лише формують певний додатковий градієнт у смузі частот  $\sim 50$  кГц,

який ефективно усувається, як показано вище. Температура  $T_B$  також не є небезпечною для спостережень рекомбінаційних ліній, оскільки абсолютна інтенсивність останніх залежить від  $T_B$ :  $\Delta T_{\text{LR}} = T_B \cdot \sigma_{\text{LR}}$ . Отже, експеримент з пошуку космологічної лінії HI, що пропонуємо в цій праці, є набагато складнішим і потребує спеціальних методів усунення численних завадових чинників, описаних на початку розділу III.

Значимо, що метод порівняння із сигналом ГШ1, показаний вище, є досить ефективним, але неідеальним. Як випливає з рис. 15, сигнал генератора не охоплює значної частини елементів і систем радіотелескопа — антени, підсилювачі, частина ліній передачі та ін. У спектрі від ГШ1 відсутні практично всі як зовнішні, так і внутрішні завадові чинники, що приймаються антеною і які б під час порівняння віднімалися від завад у спектрі. Значно поліпшити ситуацію може метод порівняння з діаграмною модуляцією. За такої умови головний промінь радіотелескопа (діаграма спрямованості) наводиться на досліджуване радіоджерело, що має досить компактний розмір  $\Theta_S$ , із реєстрацією відповідного спектра  $S'(\nu)$ . Інший промінь з такою самою шириною  $\Theta_A$  наводиться (послідовно або одночасно) на сусідню ділянку неба з відстані  $\Delta\Theta > \Theta_S$  ( $\Theta_A < \Delta\Theta$ ), але максимально близько до джерела, щоб параметри телескопа не змінювались. Водночас також реєструється порівняльний спектр  $S''(\nu)$ . Дуже важливо, що цей спектр має всі такі самі зовнішні та внутрішні завадові спектральні особливості. Тоді, отримуючи диференційний спектр  $S(\nu) = S'(\nu) - S''(\nu)$ , ми маємо тільки позитивний ефект  $\Delta T_L$ , а всі інші компенсуються. Але, на жаль, цей метод діє лише для компактних радіоджерел. В ізотропному в просторі радіоджерелі з лінією HI під час отримання диференційного спектра ефект  $\Delta T_L$  буде також знищений.

У цій праці ми пропонуємо інший, ефективніший метод порівняння спектрів, а саме: використовуємо спектри, що вимірюються в напрямках галактичного фону з температурами  $T'_B$  та  $T''_B$ , які відрізняються приблизно вдвічі (див. рис. 12). В обох спектрах наявні всі завадові чинники (у дещо різних значеннях) та позитивна спектральна особливість. Цю схему можна зобразити в аналітичному вигляді. Для спрощення допустимо, що всі завади з вузькосмуговими структурами  $\Delta T_{\text{LR}}$ ,  $\Delta I_{\text{RFI}}$ ,  $\Delta I_{\text{АТМ}}$  уже усунені. Звернімо увагу також на те, що позитивний ефект  $\Delta T_L$  (як і завадові вузькосмугові фактори) є адитивним до  $T_B$ , тоді як завади  $\Delta G$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  мультиплікативними щодо  $T_B$ . Як наслідок можемо записати два відповідних спектри у вигляді

$$S'(\nu) = T'_B + \Delta T_L + T'_B \Delta K + T'_B \Delta K_2 + T'_B \Delta K_3,$$

$$S''(\nu) = T''_B + \Delta T_L + T''_B \Delta K_1 + T''_B \Delta K_2 + T''_B \Delta K_3.$$

Щоб спростити, приймаємо, що  $T''_B \approx 2T'_B$ , тоді

$$S''(\nu) \approx 2T'_B + \Delta T_L + 2T'_B \Delta K_1 + 2T'_B \Delta K_2 + 2T'_B \Delta K_3.$$

Для зрівняння повних потужностей обох спектрів (як і в разі зрівняння потужностей спектрів від анте-

ни та генератора шуму) подвоюємо значення  $S'(\nu)$  і отримуємо диференційний спектр як

$$S(\nu) \approx 2S'(\nu) - S''(\nu) \approx 2\Delta T_L - \Delta T_L = \Delta T_L.$$

Отже, зміна температури галактичного фону (приблизно вдвічі) завдяки добовому обертанню Землі за нерухомої діаграми спрямованості, така сама зміна заводових факторів, які пропорційні до  $T_B$ , а також незмінність інтенсивності  $\Delta T_L$  дають змогу виділити останню й на тлі власне галактичного фону (великого “п’єдесталу”), і на тлі небезпечних широкосмугових (близьких до смуги лінії НІ) заводових чинників. Безперечно, якість указаних порівнянь  $S'(\nu)$  та  $S''(\nu)$  залежна від збігів відповідних спектрів, один з яких тяжіє до галактичної площини, а другий — до високоширотних ділянок Галактики.

Дуже важливу роль у структурі кожного радіотелескопа відіграє приймач-реєстратор космічних радіосигналів (рис. 15). Його побудова залежить від характеристик досліджуваних сигналів. У нашому випадку потрібен реєстратор-спектроаналізатор, тобто прилад, який вимірює потужність вхідного сигналу у досить вузьких смугах, що розподілені послідовно в максимально широкій смузі частот. Для радіотелескопа УТР-2 свого часу розроблено декілька постійно прогресуючих поколінь кореляційних спектроаналізаторів [35, 43, 44], смуга частот яких збільшувалась від  $\sim 100$  кГц до  $\sim 30$  МГц, а кількість каналів від 32, 128 до 4096 (перший прилад коротко згаданий вище). Указаний підхід виявився досить ефективним. Вимірювання автокореляційної функції сигналу перед її Фур’є-перетворенням вельми корисне, оскільки дає змогу коригувати “нульову” лінію, оперативно виявляти вузькосмугові радіозавади, забезпечує максимальне накопичення сигналу за мінімальної комп’ютерної пам’яті. Однобітне квантування в таких аналізаторах максимально спрощує конструкцію, забезпечує стабільність та швидкодію. Однак, незважаючи на переваги, однобітне квантування зменшує заводостійкість широкосмугових вимірювань ( $\Delta F \sim 50$  МГц) за наявності вузькосмугових інтенсивних радіозавад, що притаманне нашим запланованим дослідженням. Є два очевидні розв’язки цієї проблеми: будуючи новий кореляційний спектроаналізатор, необхідно використовувати аналого-цифровий перетворювач із кількістю розрядів не менше, ніж 16 та спеціальну мікросхемну й комп’ютерну техніку, яка тепер уже доступна. Другий підхід полягає у вимірюваннях спектра способом цифрового прямого швидкого Фур’є-перетворення реального часу вхідного сигналу відповідно до співвідношення

$$G(\nu) = \frac{1}{M} \left\{ \left[ \sum_{i=0}^M x(iT) \cos(2\pi\nu iT) \right]^2 + \left[ \sum_{i=0}^M x(iT) \sin(2\pi\nu iT) \right]^2 \right\}.$$

Такі спектроаналізатори нового покоління вже розроблені й успішно використовуються на радіотелескопах УТР-2, УРАН, ГУРТ [25]. Їхньою важливою особливістю є те, що вони максимально універсальні й дають змогу вимірювати всі параметри космічних радіосигналів — енергетичні, просторові, спектральні, часові, поляризаційні, крос-кореляційні, причому з найвищими чутливостями, заводостійкостями й роздільними здатностями. Водночас можливі як прямі вимірювання спектрів, так і розрахунки автокореляційних та крос-кореляційних функцій (саме ці спектроаналізатори пропонуємо для пошуку космологічних ліній НІ, принаймні на перших етапах спостережень).

Можливий алгоритм цих спостережень полягає в такому:

1. Антена система радіотелескопа (один диполь чи субгратка ГУРТ зі смугою 8–80 МГц) фазується в зенітному напрямку (висота над горизонтом  $h$  становить  $90^\circ$ ) екваторіальна координата (пряме схилення) дорівнює  $\delta = 50^\circ$ .

2. Упродовж  $\sim 12$  годин (біля максимуму галактичного фону) вимірюємо спектри потужності на виході антени із заданим інтервалом попереднього накопичення  $\Delta t_n = 0.1 - 1$  сек (це відповідає часовій роздільній здатності за частотною роздільною здатності  $\Delta f = 4$  кГц). Ця послідовність спектрів  $S''(\nu)$  (первинні дані) зберігається в пам’яті комп’ютера.

3. Таку саму процедуру проводимо в наступні 12 годин біля мінімуму фону, а послідовність спектрів  $S'(\nu)$  також зберігається в пам’яті комп’ютера.

4. Після добових спостережень доцільна вторинна оперативна обробка — фільтрація вузькосмугових та імпульсних завад на всіх парціальних спектрах, згладжування спектрів до роздільних здатностей, наприклад,  $\Delta f = 2.5$  МГц та  $\Delta f = 25$  МГц, усереднення за часом до значень  $\Delta t = 12$  годин для спектрів  $S'(\nu)$  та  $S''(\nu)$ . Ці дії суттєво стискають інформацію, яку доцільно накопичувати на жорстких дисках. На цьому ж етапі можливі розрахунки диференційних спектрів  $S(\nu) = 2S'(\nu) - S''(\nu)$  з їх накопиченням на тих самих дисках.

5. Процедури 1–4 проводимо щодобово впродовж півроку, щоб охопити всі положення Чумацького Шляху на небі (наприклад, від зими до літа) з чітким часовим урахуванням добового зміщення положення Чумацького Шляху на 3 хв 57 сек за добу. Усі зафіксовані спектри за півроку також зберігаються на дисках для фінальної обробки та аналізу даних. Остання передбачає, зокрема, усереднення даних за часом до максимального досягнутого часу накопичення  $\Delta t$ .

Головним критерієм правильності експериментальної методології є оцінка рівня флуктуацій на спектрах та її відповідність формулі  $\sigma = 1/\sqrt{\Delta f \Delta t}$  з урахуванням частотної роздільної здатності та часу накопичення. Ефект очищення від завад усіх типів також оцінюємо чітким зменшенням рівня флуктуацій відповідно до закону  $\sigma \sim 1/\sqrt{\Delta t}$ .



## V. ДЕЯКІ РЕЗЕРВИ ПЛІПШЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ПОШУКУ КОСМОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ НІ НА ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ

Як видно з попередніх підрозділів, пошук цікавого й важливого космологічного явища є вкрай складним спостережним радіоастрономічним завданням. Воно вимагає реалізації рекордних параметрів апаратури та методів, яких раніше ніколи не було досягнуто в радіоастрономії декаметрових хвиль. Запроваджені засоби й методи спостережень у своїх головних підходах є підставою для отримання позитивних результатів. Однак укажемо на деякі додаткові можливості поліпшення пошуку та дослідження космологічних ліній НІ.

### A. Багатоантенні спостереження

Галактичне нетеплове радіовипромінювання є широкосмуговим  $\delta$ -корельованим розподіленним по небу шумом. Під час спостережень на незалежних антенах, що рознесені на відстань  $d > \lambda/2$  (на декаметрових-метрових хвилях  $d > 50 \text{ м} - 0.5 \text{ м}$ ) сигнали від фону на виходах антен будуть декорельованими у відповідному діапазоні частот в 3 МГц–300 МГц. Отже, ці сигнали можна усереднювати, що приведе до зменшення флуктуацій у  $\sqrt{R}$  разів ( $R$  — кількість радіотелескопів або диполів), що еквівалентно зменшенню необхідного часу накопичення також у  $R$  разів. Оскільки один антенний елемент є досить простою конструкцією, їх легко використовувати в досить великій кількості —  $R \gg 1$ . Ускладнює ситуацію те, що кількість спектроаналізаторів повинна бути такою самою. Субгратка ГУРТ складніша, ніж елемент, але їх є більше, ніж 10, і за наявності відповідної кількості реєстраторів багатоантенна методика теж можлива.

### B. Розширення діапазону частот антен УТР-2 та ГУРТ

Антенні елементи й субгратки, з яких складаються радіотелескопи УТР-2 та УРАН (загальна кількість елементів близько 4000), традиційно використовують у діапазоні 8–32 МГц, що недостатньо для пошуку ліній НІ. Однак є підстави вважати, що реальна смуга частот телескопів значно ширша — 5–50 МГц. Це треба додатково дослідити. За позитивного висновку багатоантенні дослідження будуть можливими й на величезній кількості антен цих радіотелескопів.

### B. Двопроменеві спостереження

Субгратки ГУРТ, УТР-2, УРАН мають порівняно вузькі діаграми спрямованості —  $\Theta_A \sim 30^\circ$ . Якщо зорієнтувати діаграму однієї субгратки на точку із координатами  $\delta = 50^\circ, \alpha = 0^h$ , а другої — на напрямок  $\delta = 50^\circ, \alpha = 12^h$  (однак симетрично до полярної зорі та поверхні Землі) з вимірюванням відповідних спектрів, як показано вище, ми отримуємо схожість спектрів  $S'(\nu)$  та  $S''(\nu)$  у “протифазі” та ідентичність

радіозавад, які додатково зменшуються під час отримання диференційних спектрів, а час спостережень скорочується удвічі.

### G. Модельні експерименти для перевірки методології

Перевірка можливостей досягнення рекордної радіоспектроскопічної чутливості можлива за допомогою інструментальної моделі. За такої умови залишаються експериментальна установка й методологія, але замість антени під'єднуються прилади, що імітують радіоастрономічні умови. Це генератор шуму ГШ2, потужність якого регулюється атенюатором АТ2 до рівня  $T_B$  зі спектром 8–80 МГц, а також ГШ3, сигнал якого через фільтр зі смугою  $\Delta\nu_L = 25 \text{ МГц}$  додається до сигналу ГШ2, але із сильним ослабленням АТ3, щоб забезпечити відношення  $\Delta T_L/T_B \approx 10^{-6}$ . Це повинно підтвердити необхідний час накопичення  $\Delta t$  та відсутність певної кількості внутрішніх завад.

### D. Варіаційний метод багатократного порівняння

Для пошуку нових слабких радіоастрономічних ефектів у край важливо використовувати різні незалежні експериментальні установки, що є в різних географічних пунктах і мають дещо різні параметри експериментів з наступним порівнянням результатів. Бажаними будуть навіть деякі зміни параметрів під час тривалих експериментів — тип диполів, довжина ліній передачі, підсилювачі, спектроаналізатори з різними смугами аналізу та роздільною здатністю. Під час порівняння результатів шуканий ефект повинен повторюватись у будь-якій конфігурації приладів та параметрів.

### E. Місячні місії

Безперечно, вирішальним кроком принципового поліпшення умов експерименту з пошуку ліній НІ та інших “слабких” астрофізичних ефектів на низьких частотах є встановлення радіотелескопів декаметрових-гектометрових хвиль на зворотному боці Місяця. За цих умов виникає унікальна ситуація, коли повністю зникають чисельні земні радіозавади, негативний вплив йоносфери та жорсткі технічні вимоги до відповідних експериментальних засобів. Немає сумнівів, що протягом наступних 10–20 років подібні місячні проекти будуть реалізовані.

## ВИСНОВКИ

Отже, запропонований і описаний у нашій праці радіоспектроскопічний експеримент дуже складний, тривалий, але не безнадійний. Теоретичні оцінки можливості існування лінії нейтрального гідрогену, що зміщені в діапазон декаметрових хвиль та їхні фізичні параметри є обґрунтованими й багатократно перевіреними. Сформульовані вимоги до параметрів

пошукових спостережень базуються на півстолітньому досвіді радіоастрономічних досліджень на декаметрових хвилях, включно з радіоастроспектроскопією. Проведення вказаних експериментів цілком можливе й реальне в найближчі роки.

### ПОДЯКИ

Роботу виконано за підтримки проектів НАН України “Горизонт”, “Міжзір’я”, “Радіотелескоп” та відомчих наукових тем ВФА НАН України, а також проє-

кту Міністерства освіти і науки України “Моделювання світності елементів великомасштабної структури раннього Всесвіту та залишки галактичних наднових зірок та спостереження змінних зірок” (номер державної реєстрації 0122U001834). Вячеслав Захаренко дякує за фінансову підтримку проєкту Europlanet 2024 RI, що фінансується Програмою досліджень та інновацій “Горизонт 2020” Європейського Союзу (грантова угода № 871149). Автори вдячні європейським колеґам за участь у підготовці пропозицій програми UPSCALE.

- 
- [1] A. A. Penzias, R. W. Wilson, *Astrophys. J.* **142**, 419 (1965); <https://doi.org/10.1086/148307>.
- [2] Planck Collaboration: N. Aghanim *et al.*, *Astron. Astrophys.* **641**, A1 (2020); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833880>.
- [3] Planck Collaboration: N. Aghanim *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **641**, A6 (2020); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>.
- [4] B. E. Robertson *et al.*, *Nat. Astron.* **7**, 611 (2023); <https://doi.org/10.1038/s41550-023-01921-1>.
- [5] E. Curtis-Lake, Four metal-poor galaxies spectroscopically confirmed beyond redshift ten; submitted to *Nat. Astron.*
- [6] L. Verde, T. Treu, A.G. Riess, *Nat. Astron.* **3**, 891 (2019); <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0902-0>.
- [7] A. G. Riess *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **934**, 7 (2022); <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5c5b>.
- [8] V. Bromm, N. Yoshida, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **49**, 373 (2011); <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102608>.
- [9] J. R. Pritchard, A. Loeb, *Rep. Prog. Phys.* **75**, 086901 (2012); <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/8/086901>.
- [10] J. D. Bowman *et al.*, *Nature* **555**, 67 (2018); <https://doi.org/10.1038/nature25792>.
- [11] S. Singh *et al.*, *Nat. Astron.* **6**, 607 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01610-5>.
- [12] B. Novosyadlyj, Yu. Kulinich, V. Shulga, W. Han, *Astrophys. J.* **888**, 27 (2020); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab530f>.
- [13] Yu. Kulinich, B. Novosyadlyj, V. Shulga, W. Han, *Phys. Rev. D* **101**, id.083519 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.083519>.
- [14] B. Novosyadlyj, Yu. Kulinich, B. Melekh, V. Shulga, *Astron. Astrophys.* **663**, A120 (2022); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243238>.
- [15] B. Novosyadlyj, V. Shulga, Yu. Kulinich, W. Han, *Physics of the Dark Universe* **27**, 100422 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.dark.2019.100422>.
- [16] B. Novosyadlyj, Yu. Kulinich, G. Milinevsky, V. Shulga, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **526**, 2724 (2023); <https://doi.org/10.1093/mnras/stad2927>.
- [17] K. Tauscher, D. Rapetti, J. O. Burns, E. Switzer, *Astrophys. J.* **853**, 187 (2018); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa41f>.
- [18] D. Rapetti, K. Tauscher, J. Mirocha and J. O. Burns, *Astrophys. J.* **897**, 174 (2020); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9b29>.
- [19] K. Tauscher, D. Rapetti, J. O. Burns, *Astrophys. J.* **897**, 175 (2020); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9b2a>.
- [20] K. Tauscher *et al.*, *Astrophys. J.* **915**, 66 (2021); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac00af>.
- [21] B. Novosyadlyj, Yu. Kulinich, O. Konovalenko, this issue; *J. Phys. Stud.* **28**, 1901 (2024); <https://doi.org/10.30970/jps.28.1901>
- [22] S. Ya. Braude, *Antennas* **26**, 3 (Svyaz' Publ., Moscow, 1978).
- [23] O. O. Konovalenko *et al.*, *Radio Phys. Radio Astron.* **26**, 5 (2021); <https://doi.org/10.15407/Rpra26.01.005>.
- [24] A. Konovalenko *et al.*, *Exp. Astron.* **42**, 11 (2016); <https://doi.org/10.1007/S10686-016-9498-X>.
- [25] V. Zakharenko *et al.*, *J. Astron. Instrum.* **5**, 1641010 (2016); <https://doi.org/10.1142/S2251171716410105>.
- [26] A. A. Konovalenko *et al.*, *Radio Phys. Radio Astron.* **21**, 83 (2016); <https://doi.org/10.15407/rpra21.02.083>.
- [27] O. O. Konovalenko *et al.*, *Radio Phys. Radio Astron.* **24**, 3 (2019); <https://doi.org/10.15407/rpra24.01.003>.
- [28] J. D. Kraus, *Radio Astronomy* (McGraw-Hill, 1966).
- [29] P. L. Tokarsky, A. A. Konovalenko, S. N. Yerin, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65**, 4636 (2017); <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2730238>.
- [30] P. L. Tokarsky, A. A. Konovalenko, S. N. Yerin, I. N. Bubnov, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67**, 7312 (2019); <https://doi.org/10.1109/tap.2019.2929322>.
- [31] M. A. Sidorchuk *et al.*, *Radio Phys. Radio Astron.* **26**, 287 (2021); <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.287>.
- [32] V. V. Krymkin, *Radiophys. Quantum Electron.* **14**, 161 (1971); <https://doi.org/10.1007/bf01031395>.
- [33] A. A. Konovalenko, L. G. Sodin, *Nature* **294**, 135 (1981); <https://doi.org/10.1038/294135a0>.
- [34] A. A. Konovalenko, S. V. Stepkin, in: *Radio astronomy from Karl Jansky to microjanski. Vol. 15*, edited by L. I. Gurvits, S. Frey, S. Rawlings (EAS publ., Budapest, 2005), p. 271; <https://doi.org/10.1051/eas:2005158>.
- [35] S. V. Stepkin, A. A. Konovalenko, N. G. Kantharia, N. Udaya Shankar, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **374**, 852 (2007); <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x>.
- [36] A. A. Konovalenko, in: *Radio recombination lines: 25 years of investigation. Proceedings of IAU colloq.*, edited by M. A. Gordon, R. L. Sorochenko, (Springer, Dordrecht, 1990), p. 175; [https://doi.org/10.1007/978-94-009-0625-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0625-9_17).

- [37] S. V. Stepkin, O. O. Konovalenko, Y. V. Vasylykivskiy, D. V. Mukha, *Radio Phys. Radio Astron.* **26**, 314 (2021); <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.314>.
- [38] A. K. Vydula *et al.*, *Astron. J.* **167**, 2 (2024); <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad08ba>.
- [39] S. Ya. Braude, A. V. Megn, B. P. Ryabov, N. K. Sharykin, I. N. Zhouck, *Astrophys. Space Sci.* **54**, 3 (1978); <https://doi.org/10.1007/bf00637902>.
- [40] E. P. Abranin, Yu. M. Bruck, V. V. Zakharenko, A. A. Konovalenko, *Exp. Astron.* **11**, 85 (2001); <https://doi.org/10.1023/a:1011109128284>.
- [41] P. L. Tokarsky, A. A. Konovalenko, J. Modelski, *IEEE Access* **11**, 75225 (2023); <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294694>.
- [42] А. А. Коноваленко, дисс. канд. физ.-мат. наук (ИРЕ АН УССР, Харьков, 1982).
- [43] A. A. Konovalenko, *Pribory i tekhnika experimenta* **6**, 123 (1981);
- [44] S. V. Stepkin, *Radio Phys. Radio Astron.* **1**, 255 (1996); <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/22/278>.

## ON THE POSSIBILITY OF DETECTING A GLOBAL SIGNAL IN THE LINE OF THE HYPERFINE STRUCTURE OF HYDROGEN FROM THE DARK AGES

A. Konovalenko<sup>1</sup>, V. Zakharenko<sup>1</sup>, B. Novosyadlyj<sup>2,3</sup>, L. Gurvits<sup>4</sup>, S. Stepkin<sup>1</sup>, Y. Vasylykivskiy<sup>1</sup>, P. Tokarsky<sup>1</sup>, O. Ulyanov<sup>1</sup>, A. Stanislavsky<sup>1</sup>, I. Bubnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Radio Astronomy NAS Ukraine, Kharkiv, Ukraine,*

<sup>2</sup>*Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv, Ukraine,*

<sup>3</sup>*College of Physics, International Center of Future Science, Jilin University, Changchun, China,*

<sup>4</sup>*Joint Institute for VLBI ERIC, Dwingeloo, Netherlands*

We analyze the possibilities of detecting a signal in the hydrogen 21 cm line, which was formed in the early universe during the Dark Ages, using the Ukrainian radio telescopes UTR-2 and GURT of the National Academy of Sciences of Ukraine. As a result of cosmological expansion, this line is shifted to the decameter range of wavelengths ( $\lambda_{\text{obs}} \approx 18$  m,  $\nu_{\text{obs}} \approx 16$  MHz) and is in the band of operating frequencies of these telescopes. The brightness temperature of the predicted sky-averaged global signal ranges from  $\sim -0.08$  to  $\sim 0.02$  K, depending on the cosmological model. Such a weak signal is a big challenge even for the world's largest radio telescope in the decameter wavelength range UTR-2, since the signal level of the synchrotron radiation of the Galaxy at these frequencies is 20 000–40 000 K. The paper highlights the peculiarities of spectroscopy at decameter waves, interfering factors of natural and instrumental origin and ways to eliminate them in order to reliably detect the signal in the 21 cm line, which can become an important source of information both about the environment in which the first stars and galaxies were born, and about the nature of dark matter particles and the magnitude of primordial magnetic fields. It was concluded that the detection of such a signal using the most sensitive radio telescopes of the decameter wavelength range is quite possible (with a frequency accumulation of 25 MHz, the detection time will be  $\sim 50$  days) and can be implemented in the coming years of peace in Ukraine.

**Key words:** cosmological Dark Ages, hydrogen 21 cm line, radio spectroscopy, UTR-2 radio telescope.