
Оценка параметров радиотелескопов для наблюдения протяженных галактических газовых дисков

М. Н. Аль Наджм^{1,2}

¹*Кафедра астрофизики, Колледже науки, Университет Багдада
Багдад, Ирак*

²*Физический факультет, Южный федеральный университет*

Аннотация: Обсуждается возможность наблюдения синхротронной эмиссии от протяженных дисков ионизованного водорода удаленных галактик. Показано, что наиболее предпочтительным диапазоном длин волн с точки зрения успешности наблюдений представляется декаметровый диапазон на нижнем пределе частот, допускающим такого рода наблюдения: 3 МГц. Показано, что очень высокая яркостная температура помех в этой области частот вынуждает рассматривать только возможность интерферометрических наблюдений. В этом режиме возможно детектирование сигнала от протяженных ионизованных дисков галактик, находящихся в пределах Местной группы. Приведены также оценки возможности измерения параметров таких дисков с помощью просвечивания их излучением от пульсаров и измерения меры дисперсии сигналов от них.

Ключевые слова: III и II области, синхротронное излучение, радиоизлучение галактики, яркостная и шумовая температура, радиоинтерферометрия, декаметров интерферометр.

1. Введение

В предыдущих работах этой серии нами были выполнены расчеты параметров протяженных газовых дисков, которыми должны быть окружены наблюдаемые диски атомарного водорода в радиолинии 21 см [1, 2]. Аргументы в пользу существования протяженных дисков ионизованного водорода состоят вкратце в следующем: *i)* в последнее время появились убедительные наблюдательные данные, указывающие на то, что атомарные газовые диски галактик простираются на очень большие расстояния в радиальном направлении: если до недавнего времени полагалось, что атомарный водород II распределен в дисках, сравнимых со звездными галактическими дисками (лишь на 30-50% больше), то высокочувствительные наблюдения последних нескольких лет показали, что диски II могут превышать оптические (звездные) диски в 3-5 раз [3]; *ii)* существенным обстоятельством является наличие внегалактического фона ионизирующего

излучения с длиной волны меньше порога ионизации атомарного водорода $\lambda < 912 \text{ \AA}$, который может поддерживать в высокоионизованном состоянии большие объемы газа с концентрацией $n < 0.03 \text{ см}^{-3}$, поддерживая таким образом протяженные охватывающие оболочки ионизации (то есть газ III) вокруг дисков HI [4, 1]; *iii*) учитывая частую встречаемость протяженных дисков HI вокруг спиральных галактик [3], можно думать, что их характерные времена достаточно велики и поэтому они должны заполняться релятивистскими частицами и галактическими магнитными полями [2].

Ранее мы показали [1], что прямые наблюдения таких оболочек III возможны в линиях поглощения лаймановской серии атомарного водорода и линий ионов тяжелых элементов в ультрафиолетовом диапазоне. В последнее время появились уверенные наблюдения линий поглощения от высокозарядных ионов кислорода OVI (дублет 1032, 1038 \AA иона O^+) от протяженных галактических корон галактик, удаленных настолько, что линии попадают в ближнюю ультрафиолетовую область, доступную для наблюдений на хаббловском телескопе [5]. Однако, если говорить о локальной Вселенной, где только и обнаружены пока протяженные диски HI, то такого рода наблюдения в настоящее время существенно невозможны. Выход из этой ситуации видится в расширении наблюдений в радио-диапазон. С этой целью в нашей работе [2] были выполнены расчеты характеристик синхротронного излучения от таких протяженных дисков в предположении, что они существуют достаточно долго и релятивистские электроны и магнитные поля успевают заполнить их объем.

Учитывая важность таких наблюдений как для понимания физических процессов в галактических газовых дисках, так и для понимания особенностей распространения релятивистских частиц на большие расстояния от их источников в пределах звездных дисков, а также для уверенного подсчета доли барионов, заключенной в спиральных галактиках, в настоящей работе мы обсудим возможные методы регистрации такого излучения и приводим

оценки требований к приемным устройствам, которые позволяли бы его регистрировать. Вполне очевидно (см. ниже), что ожидаемые потоки синхротронного излучения оказываются весьма низкими и возможность их регистрации предъявляет к приемникам определенные требования. Настоящая работа посвящена описанию этих требований. В нашей работе [1] мы показали, что такие протяженные газовые диски могут большое количество ионизованного газа, превосходящего количество наблюдаемого атомарного газа в несколько раз, поэтому поиски возможности его наблюдений в радиодиапазоне могут представлять существенный интерес.

2. Синхротронная светимость протяженных дисков НП

Как было показано в [2] полная синхротронная спектральная светимость протяженного галактического диска ионизованного водорода имеет вид

$$\frac{dL}{d\nu} \approx 3 \cdot 10^{-21} \kappa_e \int_{\nu}^{\nu_M} H^{\frac{p-1}{2}} \left(\frac{6.3 \cdot 10^{18}}{\nu} \right)^{\frac{(p-1)}{2}} \left[1 - \left(\frac{\nu}{6.3 \cdot 10^{18}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2.1 \cdot 10^{19}}{\omega_c} \right)^{12} \tau^{p-2} dV \frac{\text{эрг}}{\text{Гц} \cdot \text{с}}, \quad (1)$$

в интервале $\nu_m < \nu < \nu_M$. Здесь, как и в [2] приняты следующие обозначения: $\omega_c = eH/mc$ – циклотронная частота электрона, H – напряженность магнитного поля, $\tau = t/t_0$, $t_0 = mc^2/c\sigma_T w$, $w = 2w_H + 2w_\gamma/3$ – плотность энергии, заключенная в магнитном поле и в фоновом поле реликтового излучения, здесь приняты численные значения $w_H \approx 0.7$ эВ см⁻³ [6], а $w_\gamma \approx 0.4$ эВ см⁻³ (см., например [7]), плотность энергии релятивистских электронов принималась в виде

$$\varepsilon = \int EN_e(E)dE = \kappa_e \int E^{-p+1} dE, \quad E_m < E < E_M \quad (2)$$

в ограниченном интервале энергий $E_m < E < E_M$, здесь κ_e – нормировочный коэффициент, определяемый полной лотностью энергии релятивистских

электронов в межзвездной среде, p – показатель спектра релятивистских электронов, E_m и E_M – минимальная и максимальная энергии в степенном спектре электронов, соответственно, определяемые механизмами ускорения и транспорта (см. подробнее в [8, 9]). Интегрирование в (1) ведется по всему излучающему объему, то есть по всему объему, включающему как протяженный диск НІ, так и охватывающий его слой ионизированного водорода НІІ, поскольку релятивистские электроны заполняют весь этот объем. Впрочем, следует учитывать, что как энергия релятивистских электронов, так и напряженность магнитного поля уменьшаются в радиальном направлении и поэтому периферийные слои протяженного диска НІ вместе с охватывающим слоем НІІ будут излучать в низкочастотной области синхротронного спектра.

Как было показано ранее [2], удельная светимость единицы излучающего объема уменьшается в результате адиабатического расширения электронов космических лучей как $I_\nu \propto r^{-2p}$, откуда следует, что полная светимость всего протяженного диска будет зависеть от его радиуса R как $\int I_\nu dV \propto R^{-2(p-1)}$, что для принимаемого обычно показателя спектра релятивистских электронов в Галактике $p \approx 2.2$ это дает довольно быстрое убывание $\int I_\nu dV \propto R^{-2.5}$. Поскольку космические лучи производятся в процессе вспышек сверхновых, то размеру области их генерации и ускорения можно сопоставить радиус звездного диска R_* . Поэтому, если говорить о газовых дисках, выходящих далеко за пределы оптических (звездных) радиусов $R \approx 4 - 5R_*$, то их полная синхротронная светимость может составлять 2–3% от синхротронной светимости основных дисков галактик, то есть дисков в пределах оптического радиуса и поэтому наблюдения таких протяженных дисков в низко-частотной области спектра: коль скоро зависимость синхротронной от частоты имеет вид $I_\nu \propto \nu^{(p-1)/2}$, т.е. $I_\nu \propto \nu^{-0.6}$ для $p = 2.2$, то

полный поток из области протяженных газовых дисков на частотах $\nu \approx 3$ МГц будут составлять около 10% от светимости дисков на частотах $\nu \approx 3$ МГц. Например, оценки потока синхротронного излучения от типичной галактики с зарегистрированными протяженными газовыми дисками в списке [3, 10] дает оценку потока синхротронного излучения $I_\nu \approx 3 \cdot 10^{-25}$ эрг см^{-2} с^{-1} $\text{Гц}^{-1} = 30$ Ян; здесь были приняты следующие параметры для галактики: радиус оптического диска 5 кпк, радиус диска атомарного водорода HI в 5 раз больше оптического радиуса, плотность энергии релятивистских электронов космических лучей принята равной плотности в диске нашей Галактики $\varepsilon = 1$ эВ см^{-3} , их спектр энергии – степенной с показателем $p = 2.2$, расстояние до галактики 100 Мпк – эти параметры соответствуют галактике номер 5 из списка [10] (см. их таблицу 1). Другие галактики из [3, 10] дают сравнимые или меньшие потоки. Соответствующая яркостная температура равна около $T_{B,\nu} \approx 0.1$ К. Это означает принципиальную возможность детектирования синхротронного излучения от протяженных окологалактических газовых дисков только на очень низких частотах $\nu \approx 3$ МГц, которые, как отмечалось выше, считаются практически непригодными для радионаблюдений из-за высокой яркостной температуры неба на этих частотах. С другой стороны такого рода наблюдения имеют принципиальную важность для детектирования излучения от очень слабых протяженных источников и могут нести много новой информации о динамике и эволюции галактик и Вселенной в целом.

2.1. Методы наблюдения протяженного синхротронного излучения от дисков

Решение проблемы наблюдаемости слабого синхротронного излучения от таких протяженных дисков видится таким образом в необходимости выхода в декаметровый радио-диапазон: $3 \text{ MHz} < \nu < 30 \text{ MHz}$ ($10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$).

Известно, однако, что этот диапазон частот сильно отягощен помехами от радиотрансляций, которые делают радиоастрономические наблюдения практически невозможными, особенно в области частот $3 < \nu < 8$ МГц, [11, 12]. Лишь в ночное время помехи ослабевают на сравнительно короткое (около 3-х часов) время (Рис 1) [13, 14].

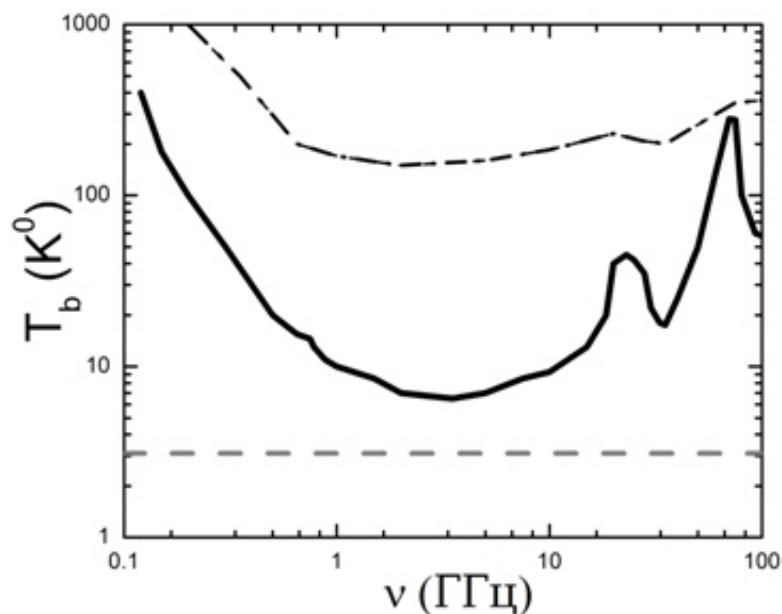


Рис. 1.– Яркостная температура неба $T_b(K^0)$ в зависимости от частоты ν (ГГц). Штриховая линия – Метагалактика. Сплошная линия – Зенит и полюс Галактики. Штрих-пунктирная линия – Галактический экватор [13, 14].

По этой причине в мире существует только три радиотелескопа в интервале дециметровых длин волн: это радиотелескоп УТР-2 вблизи Харькова (Украина) [15, 16], Дециметровый Массив (Decameter Array) в Нансево Франции [17] и Низкочастотный Массив (Low Frequency Array) с ядром в Голландии и разветвленной сетью антенн в Европе [18]. Чувствительность этих инструментов в области частот $\nu > 8$ (около 10 Ян) недостаточна для детектирования потоков, ожидаемых от протяженных синхротронных дисков удаленных галактик из приведенного выше списка [3, 10]. Вместе с тем, она может оказаться достаточной для наблюдения протяженных газовых дисков в

галактиках ближайшей окрестности. Такая задача может быть решена в режиме интерферометра на радиоастрономическом комплексе, включающим радиотелескоп УТР-2 в комплексе с радиотелескопами Уран-2 (вблизи г. Полтава с базой интерферометра около 150 км, Уран-3 в Волынской области с базой интерферометра около 1000 км, Уран-4 в Одесской области с базой около 500 км). А именно, если говорить о рабочей полосе частот этого комплекса и предполагать, как это сделано выше, наклон спектра синхротронного излучения равным 0.6, то поток на этих частотах окажется на полпорядка-порядок меньше потока на частотах $\nu = 3$ МГц и поэтому будет измерим даже для более близких галактик, не входящих в список [3, 10].

Угловой размер газовых дисков галактик такого типа, расположенных на расстояниях от 1 до 100 Мпк, составляет 1° и $1'$, соответственно. Это позволяет с помощью интерферометрических наблюдений строить довольно подробные (особенно в первом случае) карты поверхностной яркости. Действительно, как сказано выше, база украинского декаметрового радиоинтерферометра комплекс достигает около 1000 км, что дает угловое разрешение около нескольких угловых секунд. Более того, учитывая большую общую площадь этого интерферометра, его чувствительность по потоку (см. оценки ниже) может оказаться вполне достаточной, чтобы исследовать протяженные газовые галактические диски, расположенные от нас на расстояниях вплоть до нескольких сотен Мпк.

Более того, использование радиоинтерферометров может решить и проблему защиты от фоновых шумов. В режиме интерферометра фазовая настройка антенн на плече интерферометра выделяет на небе только один источник, волновой фронт от которого в точности соответствует скоррелированной фазе антенн, то есть сигнал от него попадает на антенны с фиксированной временной задержкой и разностью фаз. В таком случае даже излучение от помех, попадающих на боковые лепестки диаграммы направленности отдельной антенны, не могут оказать существенного влияния

на сигнал [19, 20] (Рис 2). В целом, если яркостная температура источника равна T_b , а температура фоновых помех T_N , то телесный угол диаграммы направленности, необходимый для выделения источника на фоне помех равен $\Delta\Omega \approx T_b/T_N$. В свою очередь, телесный угол диаграммы определяется равенством $\Delta\Omega = (\lambda/B)^2$, откуда получается оценка минимального размера базы интерферометра

$$B = \lambda \sqrt{\frac{T_N}{T_b}}, \quad (3)$$

что в интересующей нас области частот 3 МГц и соответствующей им фоновой температуре помех дает $B \geq 10$ км. В принципе, для проведения наблюдений достаточно минимальной конфигурации интерферометра с двумя антеннами, расположенными в узлах базы. При этом наиболее экономичный режим антенн может включать дипольные приемники, расположенные на расстоянии в длину волны с общей площадью, определяемой шумовой температурой приемников T_{NR} : $S_a = \lambda^2 T_{NR} / (T_b \Delta\Omega_g)$, $\Delta\Omega_g$ – видимый телесный угол галактики. По порядку величины шумовая температура современных радиотелескопов составляет около 100 К (ссылка на шумовую температуру радиотелескопов), поэтому, если говорить о приведенных выше яркостных температурах источников $T_b \approx 0.1$ К, то требуемый размер одной антенны может быть оценен величиной 1 км с общим числом дипольных приемников $N_d = 10 \times 10 = 100$ для галактик, расположенных в пределах Местной группы галактик, то есть на расстояниях в несколько Мпк. Возможность наблюдения более удаленных галактик требует увеличения размеров антенн в узлах интерферометра пропорционально расстоянию до галактик.

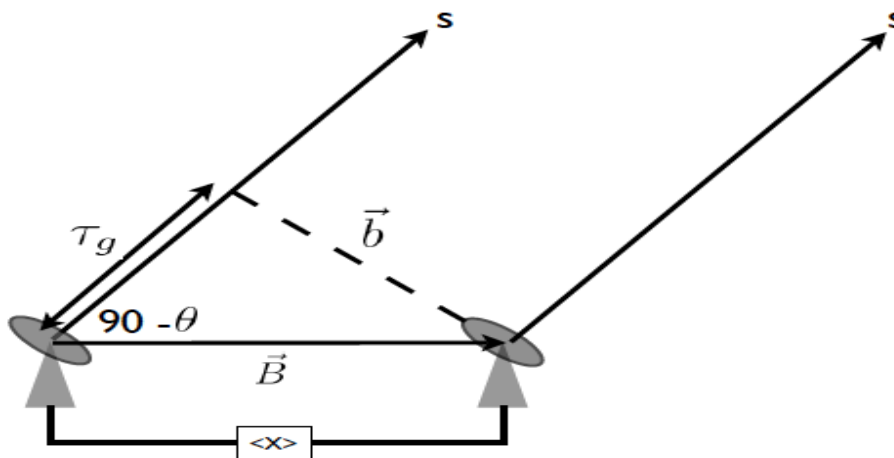


Рис. 2. – Схематический вид интерферометра: В – база интерферометра, С – коррелятор, синхронизирующий сигналы от двух антенн.

2.2. Возможность диагностики протяженных газовых дисков с помощью пульсаров

Другая возможность диагностики электронной плотности в протяженных дисках галактик может быть связана с измерениями меры дисперсии переменных сигналов от пульсаров, находящихся в галактических дисках. Идея измерения параметров космической плазмы с помощью переменных радиосигналов от пульсаров связана с тем, что распространение низкочастотных радиоволн в ионизованной среде испытывает дисперсию, то есть зависимость фазовой скорости от длины волны [21]

$$v_p = \frac{1}{2\pi} \frac{v}{k} = c\sqrt{1-(v_p/v)^2}, \quad v_g = \frac{1}{2\pi} \frac{dv}{dk} = c\sqrt{1-(v_p/v)^2}, \quad v_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\pi m_e}}, \quad (4)$$

здесь v_p – плазменная частота в окружающей межзвездной среде, n_e – концентрация электронов, m_e – масса электрона, e – его заряд. Легко видеть

из (2.2), что с уменьшением частоты фазовая скорость уменьшается, вследствие чего вклады от различных частот единичных (почти дельта-образных) импульсов излучения пульсара будут приходить к наблюдателю со все большим запаздыванием и сигнал в целом будет деформироваться, то есть растягиваться во времени. Легко видеть, что мера деформации дельта-образного сигнала определяется мерой дисперсии $\int n_e^2 dl$ – где интегрирование ведется вдоль луча зрения от источника S до приемника R . В самом деле, время прихода сигнала с частотой ν (см., например, [22])

$$t_\nu = \int_S^R \frac{dl}{v_p(\nu)}, \quad (5)$$

или в условиях реальной межзвездной среды, где в большинстве случаев выполняется условие $\nu \gg \nu_e$, интеграл представляется в виде

$$t_\nu = \int_S^R \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v_p^2}{\nu^2} \right) dl, \quad (6)$$

что дает величину запаздывания сигналов различной частоты на приемнике равную

$$\Delta t_\nu = \frac{e^2}{\pi m_e} DM \left(\frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2} \right), \quad (7)$$

где $\nu_1 > \nu_2$, $DM = \int_S^R n_e dl$ мера дисперсии.

Обычно для анализа дисперсии сигнала от пульсара используется импульс, занимающий полосу частот от ν_L до ν_U [19,20]. Приемник сдвигает спектр в область нулевых частот, так что спектр его выходного напряжения занимает полосу частот от 0 до ω_H : то есть сигнал имеет вид $G(\omega) = a$ в интервале частот $0 < \omega < \omega_H$, и $G(\omega) = 0$ за пределами интервала $\omega > \omega_H$.
Временная зависимость напряжения имеет в таком случае следующий вид:

$$u(t_k) = a \sum_{n=0}^{N-1} \cos(n\omega t_k + \phi_n), \quad (8)$$

$\omega = 2\pi f$, f – количество гармоник, ϕ_n – фазовый сдвиг, приобретаемый отдельной n -й гармоникой за счет дисперсионной задержки сигнала: $\phi_n = n\omega\tau_n$, при $\phi_n = 0$ получаем исходный сигнал $\sin X/X$. Зависимость задержки от частоты может быть получена из приведенной выше формулы для задержки сигнала, а именно

$$\tau(f) = \frac{\alpha}{f^2}, \quad \alpha = 4.15 \cdot 10^{15} \text{ DM s Hz}^2. \quad (9)$$

Задержку на верхней частоте приема можно принять равной нулю. Текущую частоту в полосе приема можно принять равной разности верхней частоты приема и низкой частоты nF . Тогда выражение для фазового сдвига выглядит

$$\phi_n = 2\pi(f_H - nF)(\tau(f_H - nF) - \tau(f_H)) = 2\pi\alpha(F - f_H) \left[\frac{1}{(f_H - nF)^2} - \frac{1}{f_H^2} \right]. \quad (10)$$

На рис. 3 приведен пример расчета сигнала, испытавшего дисперсию при прохождении по межзвездной среде с заданной мерой дисперсии. Таким образом, в рамках этого подхода, используемого для измерения параметров в межзвездной среде нашей Галактики, можно осуществлять аналогичные измерения параметров удаленной галактики. При этом однако следует иметь в виду, что в настоящее время сигналы от пульсаров далеких галактик принимаются в исключительно редких случаях. Недавно был проведен обзор пульсаров в нескольких карликовых галактиках Местной группы. Шесть из них показали сигналы от пульсаров с мерой дисперсии $DM \approx 100 \text{ см}^{-3} \text{ пк}$ [23]. Есть таким образом надежда, что в скором времени будут проведены наблюдения пульсаров в более удаленных галактиках, что сделает возможным определение протяженности галактических дисков ионизованного водорода.

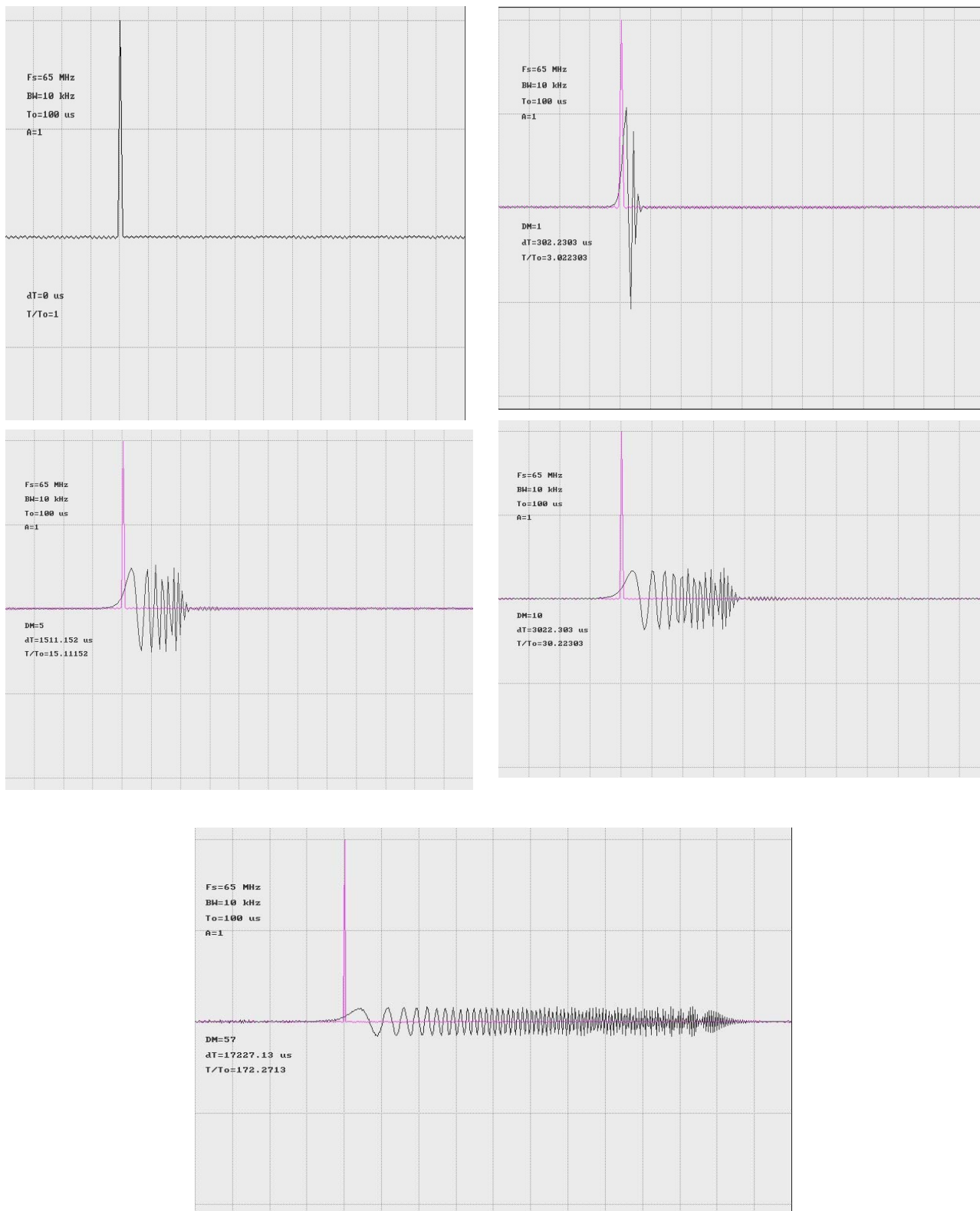


Рис. 3.– Схематическое представление временной развертки дельта-образного сигнала, прошедшего через среду с мерой дисперсии $DM = 0, 1, 5, 10, 57 \text{ см}^{-3} \text{ ПК}$.

Это вселяет надежду в возможность детектирования излучения от пульсаров из внешних галактик и измерять в них параметры протяженных дисков ионизованного газа. Одна из особенностей наблюдения переменных сигналов, таких как периодические сигналы от пульсаров, состоит в том, что в силу их периодичности, их можно выделять даже при большом фоне помех и слабом сигнале, то есть при малом отношении сигнала к шуму. Как показано в нашей работе [1] толщина такого диска может достигать по меньшей мере 1 кпк на периферии галактики, если при этом концентрация ионизованного водорода в плоскости диска не слишком мала, например $n_0 \approx 0.03 \text{ см}^{-3}$, то мера дисперсии может достаточно большой, чтобы вызвать наблюдаемую дисперсию $DM \approx 30 \text{ см}^{-3} \text{ пк}$.

Выводы

- Мы показали, что наблюдения синхротронного излучения от протяженных галактических дисков возможны на предельно низких частотах в декаметровой области длин волн с помощью методом радиоинтерферометрии с базой всего в 30 км. Приведены оценки минимальных требований для антенн в узлах такого интерферометра, необходимые для наблюдений синхротронной эмиссии от галактик Местной группы для параметров, ожидаемых для протяженных ионизованных дисков. Синхротронное излучение от протяженных газовых дисков, находящихся в сравнительно близкой окрестности – в пределах до 100 Мпк, – может детектироваться в полосе частот $8 < \nu < 30$ МГц на украинском декаметровом интерферометре, включающим радиотелескоп УТР-2 и комплекс радиотелескопов Уран, разнесенных на большие расстояния.

- Другой метод определения параметров газа в таких протяженных дисках может быть основан на измерениях меры дисперсии радиоимпульсов от источников периодического излучения, таких как пульсаров. Приведены расчеты формы принимаемых сигналов для ожидаемых параметров протяженных ионизованных дисков.

Благодарности

Автор благодарен Ю.А. Щекинову (АКЦ ФИАН), обратившему внимание на возможность наблюдательной диагностики протяженных гало и А.А. Сальникову (ПРАО ФИАН) за консультации по вопросам радиоинтерферометрии. Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и научных исследований Ирака (TheMinistryofHigherEducationandScientificResearchinIraq).

Литература

1. Аль Наджм М.Н., Поликарпова О.Л., Щекинов Ю.А. Ионизованный газ в околוגалактическом пространстве в группе галактик М81 // *Астрономический Журнал*, 2015.
2. Аль Наджм М. Н. О нетепловом радиоизлучении от протяженных галактических дисков // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*, 2015, № 3., С. 6–14 .
3. Wang J. Fu. J., Aumer M., Kauffmann G., Józsa G.I.G., Serra P., Huang M.-L., Brinchmann J., van der Hulst T. and Bigiel F. An observational and theoretical view of the radial distribution of H I gas in galaxies // *Month. Not. Astron. Soc.*, 2014. vol. 441. pp. 2159-2172.
4. Сюняев Р. А. Взаимодействие ионизирующего фонового излучения с галактиками, ограничения на плотность межгалактического газа // *Астрономический Журнал*, 1969. Т. 46. С. 929-934.
5. Tumilson J., Thom C., Werk J. K., Prochaska J. X., et al, The Large, Oxygen-Rich Halos of Star-Forming Galaxies Are A Major Reservoir of Galactic Metals // *Science*, 2011. vol. 334. pp. 948-952.
6. Mikhailov E. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs / E. Mikhailov, A. Kasparova, D. Moss, R. Beck, D. Sokoloff, and A. Zasov // *Astron. and Astrophys.*, 2014. vol. 568. pp. A66-A73.
7. Muller S., Beelen A., Black J. H., Curran S. J., Horellou C., Aalto S. Combes F.,

- Guélin M., Henkel C. A precise and accurate determination of the cosmic microwave background temperature at $z = 0.89$ // *Astron. and Astrophys.*, 2013. vol. 551. pp. 109–122.
8. Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1975. С. 75–102.
9. Longaire M. High energy astrophysics, Cambridge, CUP, New York, 2011. pp. 274–302.
10. Wang J., Kauffmann G., Józsa G. I. G., et al. The Bluedisks project, a study of unusually H I-rich galaxies - I. H I sizes and morphology // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2013. vol. 433. pp. 270–294.
11. Брауде С.Я. Мень А.В. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 и задачи декаметровой радиоастрономии // *Успехи физических наук*, 1973. № 109. С. 769-771.
12. Konovalenko A., Lecacheux A., Rosolen C., in: *Perspectives on Radio Astronomy – Technologies for Large Antennae Arrays*, A.B. Smolders & M.P. van Haarlem, eds., Netherlands, 1999. 115 p.
13. Есепкина А., Корольков Д.И., Парийский Ю.Н., Радиотелескопы и радиометры, М.: Наука, 1973. 242 с.
14. Конникова В.К., Лехт Е.Е., Силантьев Н.А. Практическая радиоастрономия. Изд.: МГУ, 2011. 48 с.
15. Bruk Yu.M., Goncharov N. Yu., Men A. V., Sodin L. G., Sharykin N. K. A T-shaped radiotelescope with electrical beam scanning in the 10–25 Mc band // *Izvestiya VUZ, Radiofizika*, 1967. vol. 10. pp. 608–619.
16. Bruk Yu.M., Goncharov N. Yu., Zhuk I. N., Inyutin G. A., Men A. V., Sodin L. G., Sharykin N. K. Experimental study of the multielement antenna arrays of the UTR-1 radio telescope // *Izvestiya VUZ, Radiofizika*, 1968. vol. 11. pp. 28–43.
17. Boishot A., Rosolen C., Aubier M.G., et al, A new high-grain, broadband, steerable array to study Jovian decametric emission // *Icarus*, 1980. vol.43, pp.399–407.
-

18. van Haarlem M.P., et al, LOFAR: The LOw-Frequency ARray // *Astron. & Astrophys.*, 2013 .vol. 556. A2, 53 pp.
19. Томпсон Р.А., Моран Дж.М., Свенсон Дж.У., Интерферометрия и синтез в радиоастрономии, Москва, Мир, 1989. С. 274-278.
20. Манжула В.Г., Крутччинский С.Г., Савенко А.В., Воронин В.В. Интерферометрический интерфейс системы определения относительных координат радиоизлучающих объектов // *Инженерный вестник Дона*, 2012, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1027.
21. Гинзбург В.Л., Теория распространения радиоволн в ионосфере // *Успехи физических наук*, 1946. Т. XXVIII. Вып 2-3. С. 155-202.
22. Draine B.T, *Physics of the interstellar and the intergalactic medium*. United Kingdom: Oxford, Princeton series in astrophysics, 2011. pp.101-105.
23. Kondratiev V., McLaughlin M., Lorimer D., Burgay M., Possenti A., Turolla R., Popov S. B. and Zane S. New Limits on Radio Emission from X-ray Dim Isolated Neutron Stars // *Astroph. J.*, 2009. vol. 702. pp. 692–706.

References

1. Al' Nadzhm M.N., Polikarpova O.L., Shhekinov Ju.A. *Astronomicheskij Zhurnal*, 2015.
2. Al' Nadzhm M. N. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki*, 2015, № 3., pp. 6–14 .
3. Wang J. Fu. J., Aumer M., Kauffmann G., Józsa G.I.G., Serra P., Huang M.-L., Brinchmann J., van der Hulst T. and Bigiel F. An observational and theoretical view of the radial distribution of H I gas in galaxies. *Month. Not. Astron. Soc.*, 2014. vol. 441. pp. 2159-2172.
4. Sjunjaev R. A. *Astronomicheskij Zhurnal*, 1969. Т. 46. pp. 929-934.
5. Tumilson J., Thom C., Werk J. K., Prochaska J. X., et al, *The Large, Oxygen-Rich Halos of Star-Forming Galaxies Are A Major Reservoir of Galactic Metals*.



- Science, 2011. vol. 334. pp. 948-952.
6. E. Mikhailov, A. Kasparova, D. Moss, R. Beck, D. Sokoloff, and A. Zasov. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs. *Astron. and Astrophys.*, 2014. vol. 568. pp. A66-A73.
7. Muller S., Beelen A., Black J. H., Curran S. J., Horellou C., Aalto S., Combes F., Guélin M., Henkel C. A precise and accurate determination of the cosmic microwave background temperature at $z = 0.89$. *Astron. and Astrophys.*, 2013. vol. 551. pp. 109–122.
8. Ginzburg V.L. *Teoreticheskaja fizika i astrofizika [Theoretical Physics and Astrophysics]*. M.: Nauka, 1975. pp. 75–102.
9. Longaire M. *High energy astrophysics*, Cambridge, CUP, New York, 2011. pp. 274–302.
10. Wang J., Kauffmann G., Józsa G. I. G., et al. The Bluedisks project, a study of unusually H I-rich galaxies - I. H I sizes and morphology. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2013. vol. 433. pp. 270–294.
11. Braude S. Ja. Men' A. V. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1973. № 109. pp. 769-771.
12. Konovalenko A., Lecacheux A., Rosolen C., in: *Perspectives on Radio Astronomy. Technologies for Large Antennae Arrays*, A.B. Smolders & M.P. van Haarlem, eds., Netherlands, 1999. 115 p.
13. Esepkina A., Korol'kov D. I., Parijskij Ju. N., *Radioteleskopy i radiometry [Radio telescopes and radiometers]*. M.: Nauka, 1973. 242 p.
14. Konnikova V. K., Leht E. E., Silant'ev N. A. *Prakticheskaja radioastronomija. [Practical radio astronomy]*. Izd.: MGU, 2011. 48 p.
15. Bruk Yu. M., Goncharov N. Yu., Men A. V., Sodin L. G., Sharykin N. K. A T-shaped radiotelescope with electrical beam scanning in the 10–25 Mc band. *Izvestiya VUZ, Radiofizika*, 1967. vol. 10. pp. 608–619.
16. Bruk Yu. M., Goncharov N. Yu., Zhuk I. N., Inyutin G. A., Men A. V., Sodin L. G., Sharykin N. K. *Izvestiya VUZ, Radiofizika*, 1968. vol. 11. pp. 28–43.
17. Boishot A., Rosolen C., Aubier M. G., et al. *Icarus*, 1980. vol. 43, pp. 399–407.
-



18. Van Haarlem M.P., et al, LOFAR: The LOw-Frequency Array. *Astron. & Astrophys.*, 2013 .vol. 556. A2, 53 pp.
19. Tompson R.A., Moran Dzh.M., Svenson Dzh.U., *Interferometrija i sintez v radioastronomii [Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy]*. Moskva, Mir, 1989. pp. 274-278.
20. Manzhula V.G., Krutchinskij S.G., Savenko A.V., Voronin V.V. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2012, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1027.
21. Ginzburg V.L. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1946. T. XXVIII. Vyp 2-3. pp. 155-202.
22. Draine B.T, *Physics of the interstellar and the intergalactic medium*. United Kingdom: Oxford, Princeton series in astrophysics, 2011. pp.101-105.
23. Kondratiev V., McLaughlin M., Lorimer D., Burgay M., Possenti A., Turolla R., Popov S. B. and Zane S. New Limits on Radio Emission from X-ray Dim Isolated Neutron Stars. *Astrophys. J.*, 2009. vol. 702. pp. 692–706.