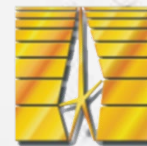




Конференция
“Физика и астрофизика – от фундаментальных констант до
гамма-всплесков и космологии”

памяти Е.П. Мазеца и Д.А. Варшаловича



Ioffe
Institute

**Вселенная в линии 21 см:
от тёмных веков до нашей Галактики**

Балашев С.А.¹, +MALS team

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе



19-20 ноября 2024. ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Санкт-Петербург

Введение. Линия 21 см

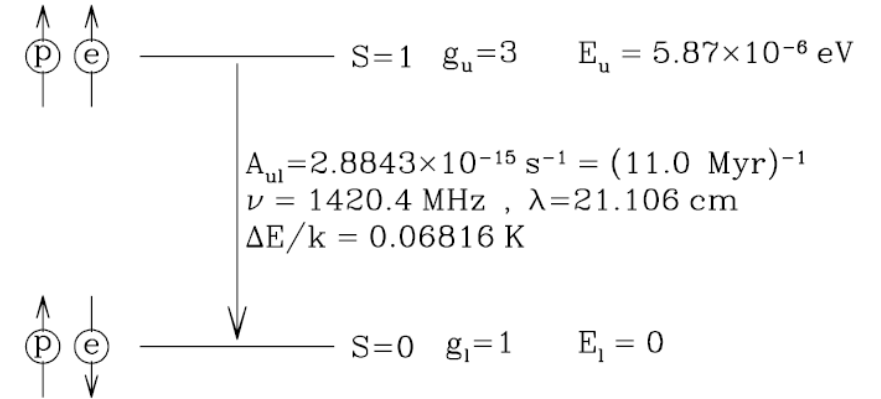
Линия 21 см – перехода между уровням сверхтонкого расщепления основного уровня атомарного водорода, имеет большое значение в астрофизике и открывает широкие перспективы в наблюдательной космологии.

$$T_{\text{spin}} \equiv T_{\text{exc}} = \frac{0.0682\text{K}}{\ln(n_0 g_1 / n_1 g_0)} \quad T_{\text{spin}} > 2.7\text{K} \gg 0.0682\text{K}$$

Для характерных плотностей нейтральной МЗС T_{spin} соответствует T_{kin}

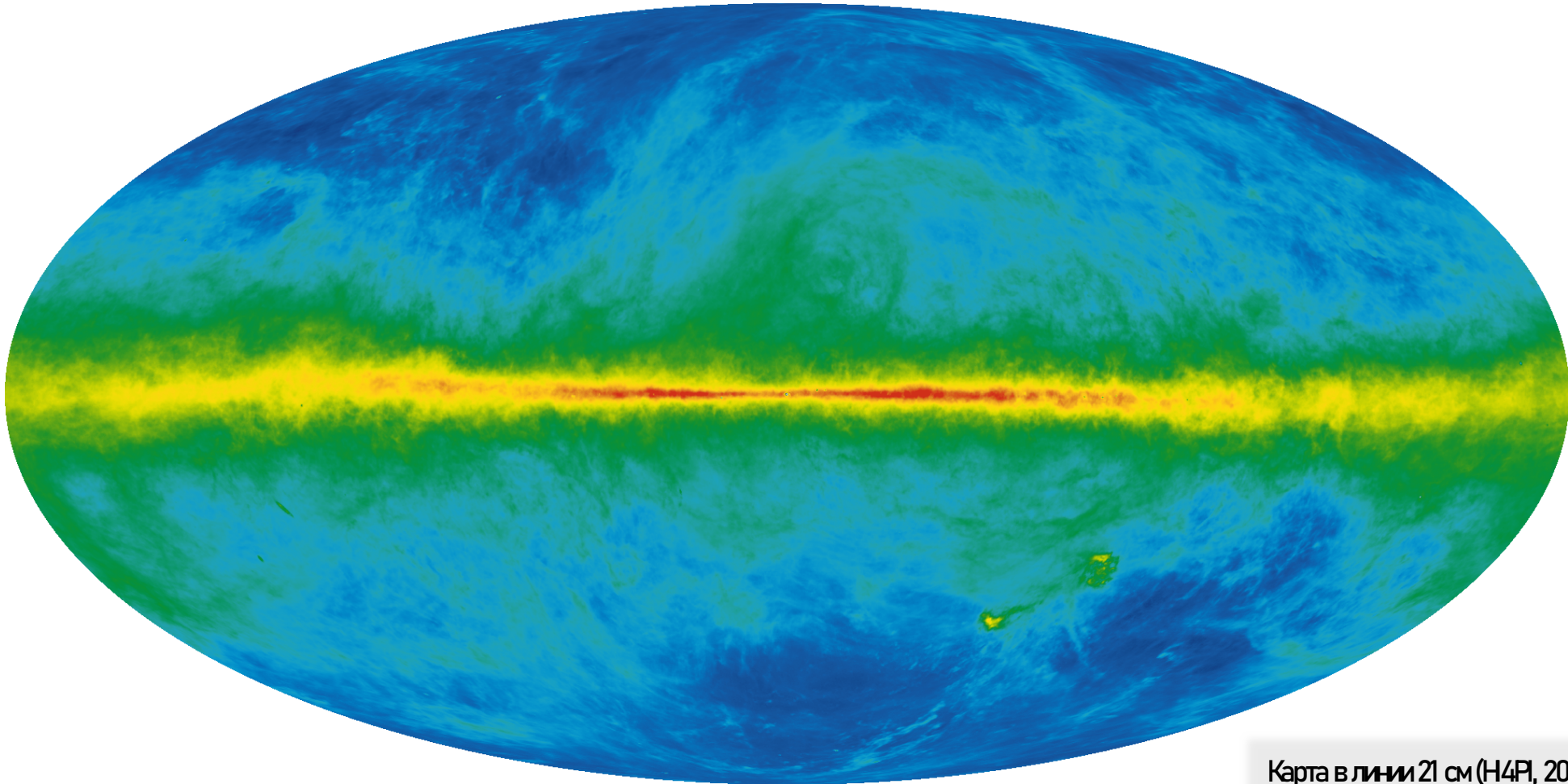
Некоторые факты:

1. была предсказана Van de Hulst в 1944 г (также 1949 г. Шкловским)
2. открыта Ewen и Purcell в 1951 г.
3. Линия достаточно слабая – наблюдается в эмиссии в основном только в локальной Вселенной
4. Wouthuysen 1952 и Field 1957, 1959 описали физику взаимодействия линии 21 см с атомами и излучением в МЗС.



Введение. Линия 21 см. Наша Галактика

Наша галактика почти полностью прозрачна в линии 21 см – это позволяет понять структуру Галактики



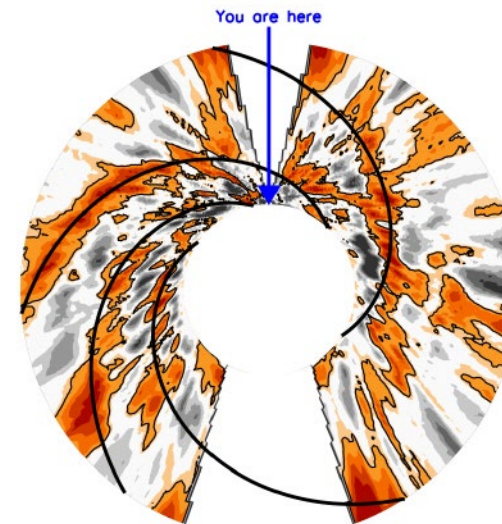
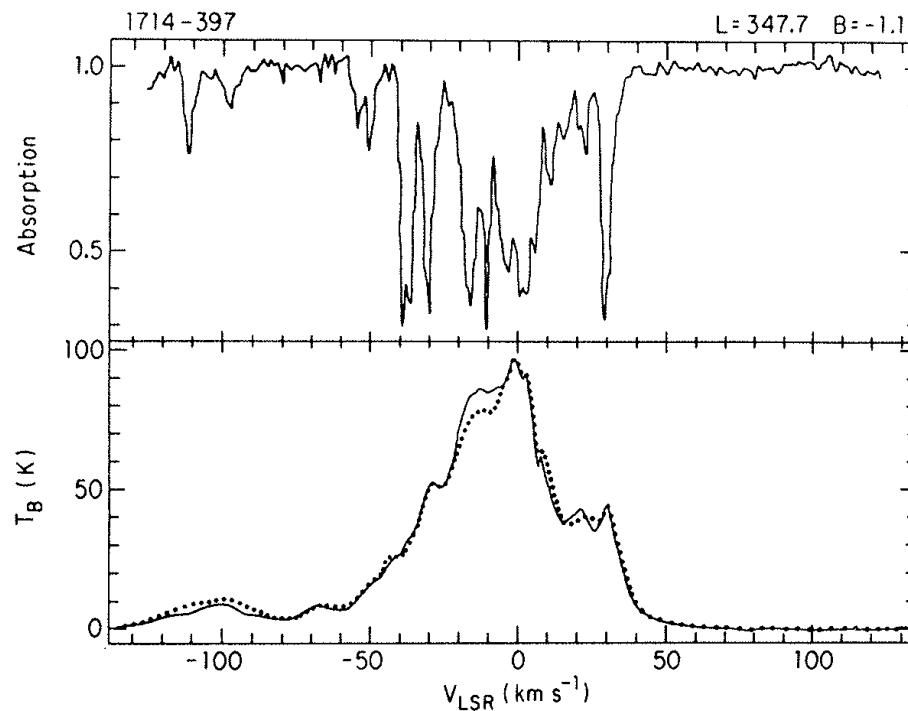
Карта в линии 21 см (H4PI, 2016)

Цветом лучевая концентрация HI: синий – $\log N(\text{HI})=19$... красный – $\log N(\text{HI})=22.3$

Введение. Линия 21 см. Наша Галактика

Наша галактика почти полностью прозрачна в линии 21 см – это позволяет понять структуру Галактики

Это позволило восстановить спиральную структура нашей Галактики:



карта ВЛИВИТИ СМ (1441, 2016)

Цветом лучевая концентрация HI: синий – $\log N(\text{HI})=19$... красный – $\log N(\text{HI})=22.3$

Линия 21 см. Тёмные века

Distortion of the primordial radiation spectrum by the 21-cm hydrogen line at epochs $z=150-15$

D. A. Varshalovich and V. K. Khersonskii

Ioffe Physics and Technology Institute, USSR Academy of Sciences, Leningrad

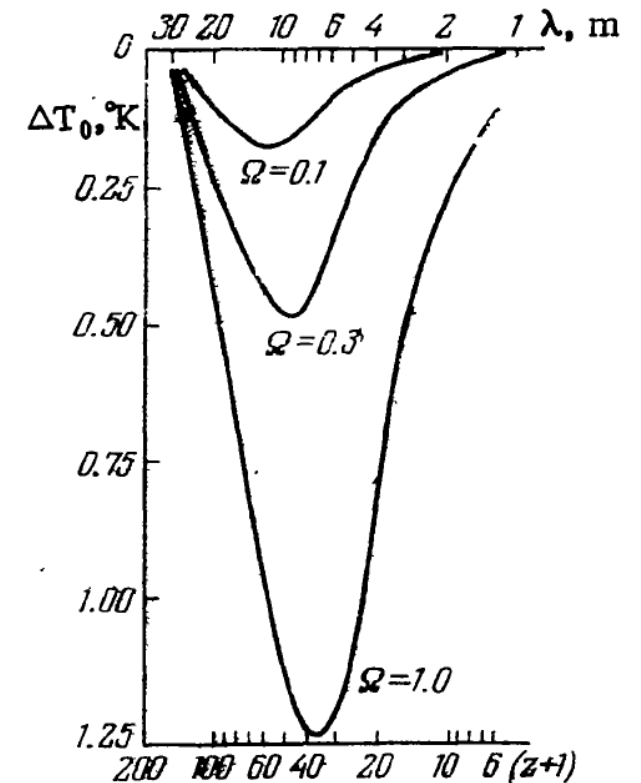
(Submitted March 9, 1977)

Pis'ma Astron. Zh. 3, 291-294 (July 1977)

As Zel'dovich, Kurt, and Syunyaev¹ have shown, the temperature $T_z^{(M)}$ of matter was maintained equal to the temperature $T_z^{(R)}$ of radiation until $z_e \approx 150$ because of the presence of additional Lyman- α photons generated by the recombination of hydrogen. During the next phase of adiabatic expansion the kinetic temperature $T_z^{(M)}$ would have dropped more rapidly than the radiation temperature $T_z^{(R)}$ because of the difference in adiabatic indices:

$$T_z^{(R)} = T_{z_e} \left(\frac{1+z}{1+z_e} \right) = T_0^{(R)} (1+z), \quad (1)$$

$$T_z^{(M)} = T_{z_e} \left(\frac{1+z}{1+z_e} \right)^2 = \frac{T_0^{(R)}}{1+z_e} (1+z)^2, \quad (2)$$



$$\Delta T_0^{(R)}(\lambda) = T_{10} \frac{a\Omega}{\sqrt{1+\Omega z}} \left(\frac{z_e - z}{1+B_z} \right), \quad (8)$$

where the parameter $a = (3/32\pi)\zeta(A_{10}/H_0)N_0^{(cr)}\lambda_0^3 = 1.20(H_0/55)$, with the quantity B_z given by Eq. (4).

Линия 21 см. Тёмные века

Distortion of the primordial radiation spectrum by the 21-cm hydrogen line at epochs $z=150-15$

D. A. Varshalovich and V. K. Khersonskii

Ioffe Physics and Technology

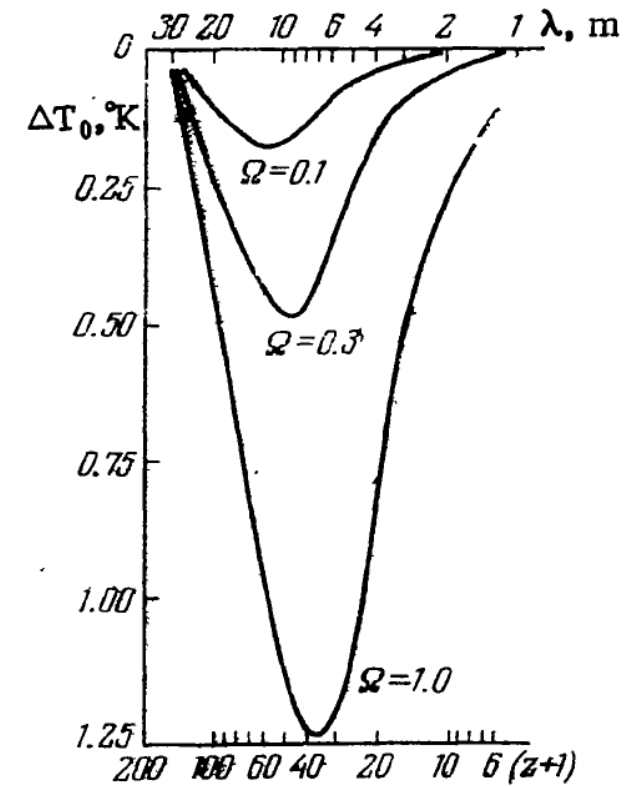
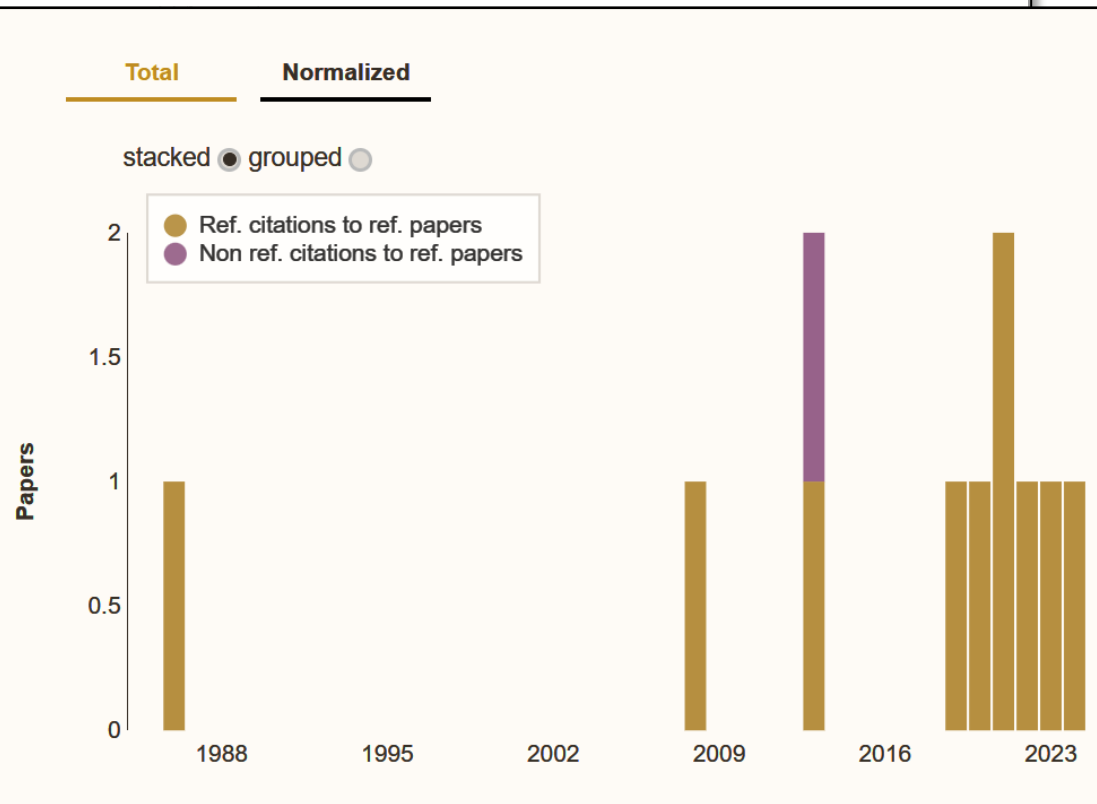
(Submitted March 9, 1977)

Pis'ma Astron. Zh. 3, 291

As Zel'dovich, Kurt, temperature $T_z^{(M)}$ of matter, temperature $T_z^{(R)}$ of radiation, the presence of additional by the recombination of of adiabatic expansion that have dropped more rapidly $T_z^{(M)}$ because of the difference

$$T_z^{(R)} = T_{ze} \left(\frac{1+z}{1+z_e} \right) = T_0^{(R)}$$

$$T_z^{(M)} = T_{ze} \left(\frac{1+z}{1+z_e} \right)^2 =$$



$$\left(\frac{z_e - z}{1 + B_z} \right), \quad (8)$$

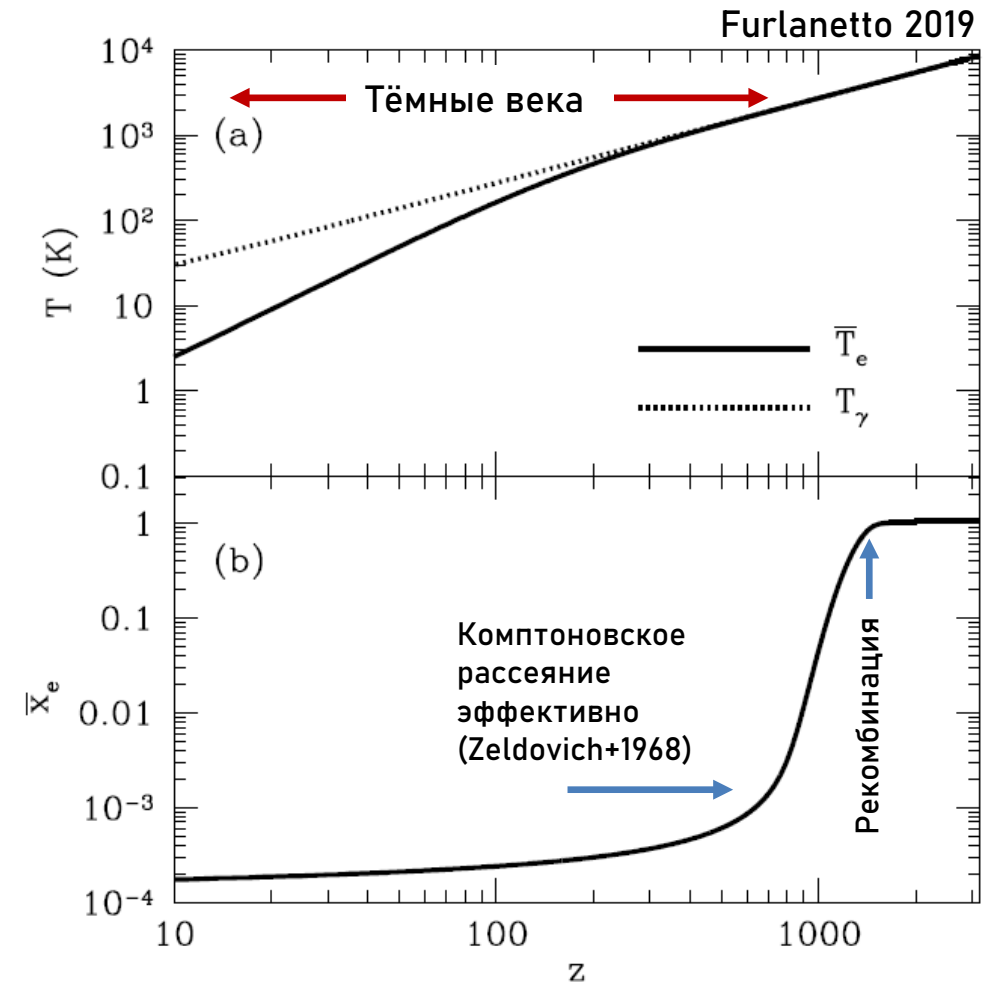
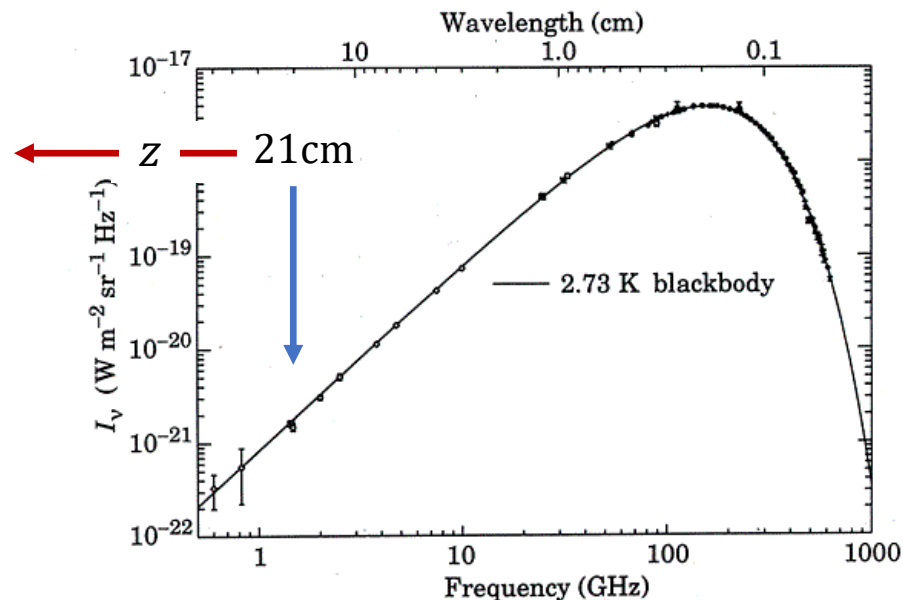
where the parameter $a = (3/32\pi)\zeta(A_{10}/H_0)N_0^{(cr)}\lambda_0^3 = 1.20(H_0/55)$, with the quantity B_z given by Eq. (4).

Линия 21 см. Тёмные века

Позже этот эффект заново открывается рядом авторов Scoot & Rees 1990, Loeb & Zaldriagga 2004, ...

Идея очень простая: тепловая эволюция барионного вещества в тёмные века определяется конкуренцией адиабатического расширения и нагрева за счёт комптоновского рассеяния.

$$T_{\text{CMB}} \propto (1 + z) \quad \text{vs} \quad T_{\text{adiabatic}} \propto (1 + z)^2$$



Линия 21 см. Космический рассвет

Помимо этого был предложен эффект появления линии абсорбции в 21 см за счёт взаимодействия с Ly α излучением от первых звёзд:

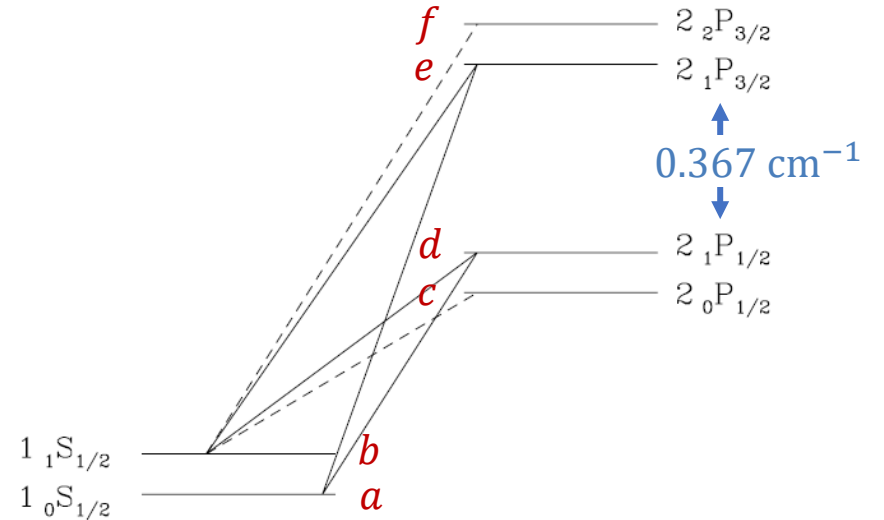
1. температура излучения $T_c = T_K$ (за счёт большой оптической толщи в линии Ly α)
2. При радиативных переходах лаймановской серии появляется возможность “перевернуть” спин ядра, то есть радиативная накачка

$$\frac{\delta T}{T} = 1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_s} = \frac{x_c + x_\alpha}{1 + x_c + x_\alpha} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_K} \right)$$

где x_c и x_α параметры связи для столкновений и УФ излучения:

$$x_c^i \equiv \frac{C_{10}^i}{A_{10}} \frac{T_\star}{T_{\text{CMB}}} = \frac{n_i k_{10}^i}{A_{10}} \frac{T_\star}{T_{\text{CMB}}}$$

$$x_\alpha = \frac{P_{10}}{A_{10}} \frac{T_\star}{T_{\text{CMB}}}, \quad P_{01} \propto B_{ad} J_{ad} \frac{A_{db}}{A_{da} + A_{db}} + B_{ae} J_{ae} \frac{A_{eb}}{A_{ea} + A_{eb}}$$



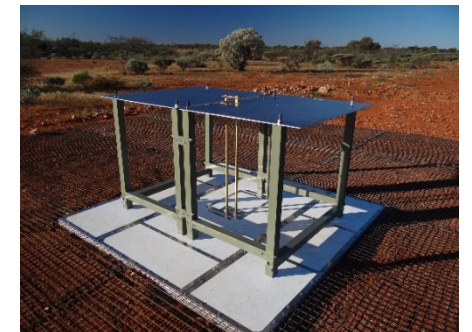
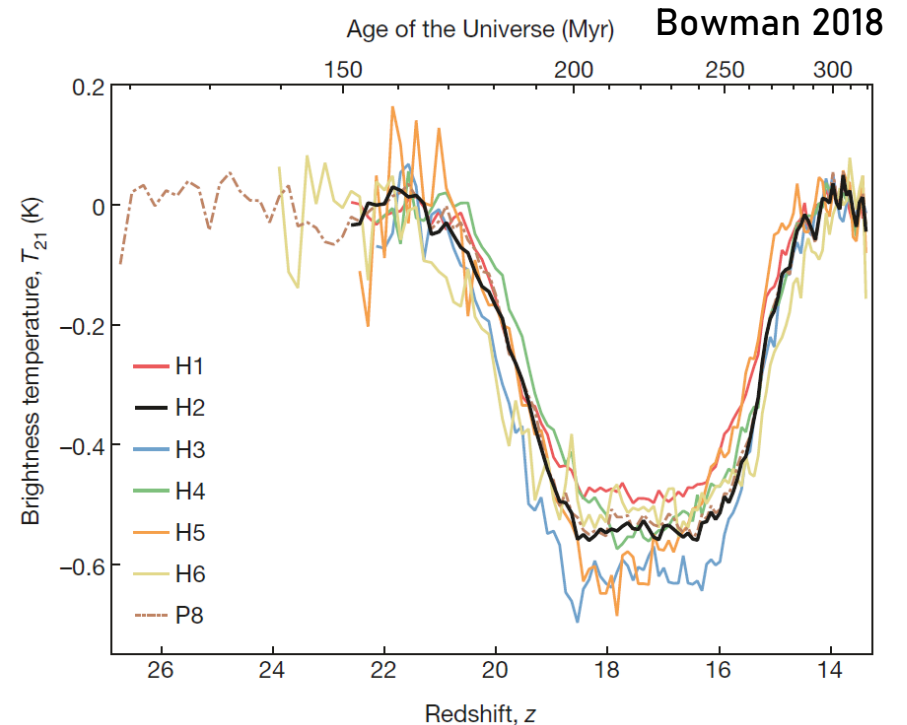
Линия 21 см. Космический рассвет

Помимо этого был предложен эффект появления линии абсорбции в 21 см за счёт взаимодействия с Ly α излучением от первых звёзд:

1. температура излучения $T_c = T_K$ (за счёт большой оптической толщи в линии Ly α)
2. При радиативных переходах лаймановской серии появляется возможность “перевернуть” спин ядра, то есть радиативная накачка

$$\frac{\delta T}{T} = 1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_s} = \frac{x_c + x_\alpha}{1 + x_c + x_\alpha} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_K} \right)$$

где x_c и x_α параметры связи для столкновений и УФ излучения



Линия 21 см. Космический рассвет

Помимо этого был предложен эффект появления линии абсорбции в 21 см за счёт взаимодействия с Ly α излучением от первых звёзд:

1. температура излучения $T_c = T_K$ (за счёт большой оптической толщи в линии Ly α)
2. При радиативных переходах лаймановской серии появляется возможность “перевернуть” спин ядра, то есть радиативная накачка

$$\frac{\delta T}{T} = 1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_s} = \frac{x_c + x_\alpha}{1 + x_c + x_\alpha} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_K} \right)$$

где x_c и x_α параметры связи для столкновений и УФ излучения:

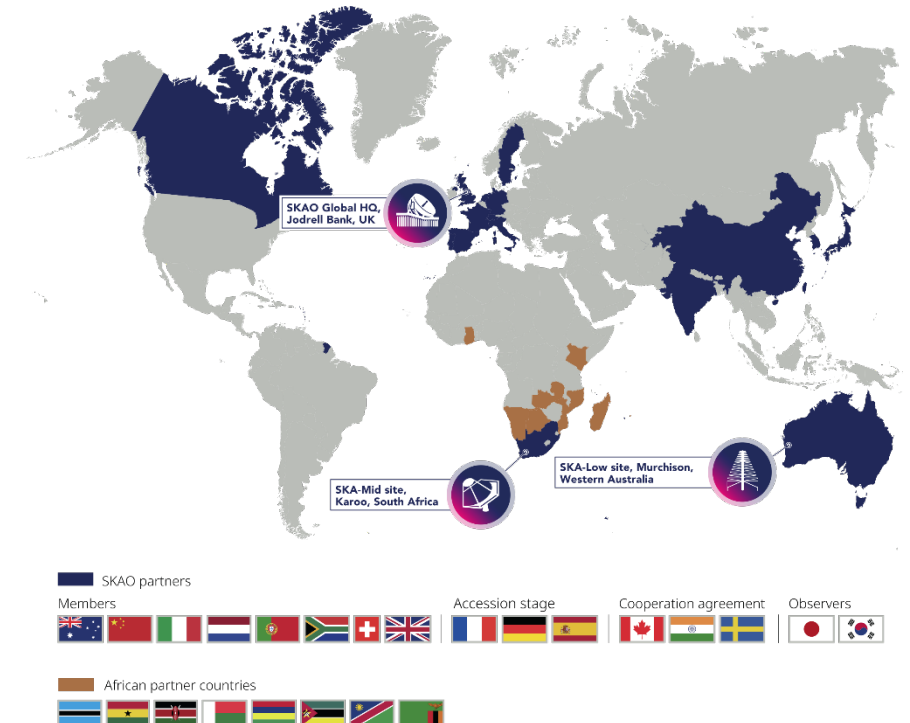
Не подтверждается:

1. Независимым анализом другими авторами (важность моделей фонов и атмосферы)
2. свежими результатами SARAS 3 (Singh+2022)



Square Kilometer Array

Наибольший прогресс в наблюдениях линии 21 см связывают со строительством телескопов картографирования линий (HERA) интерферометра Square Kilometer Array (SKA):



Предшественники SKA

Однако, уже сейчас работают предшественники SKA:



Телескоп MeerKAT



Телескоп ASKAP



Телескоп FAST

MALS – MeerKAT absorption line survey



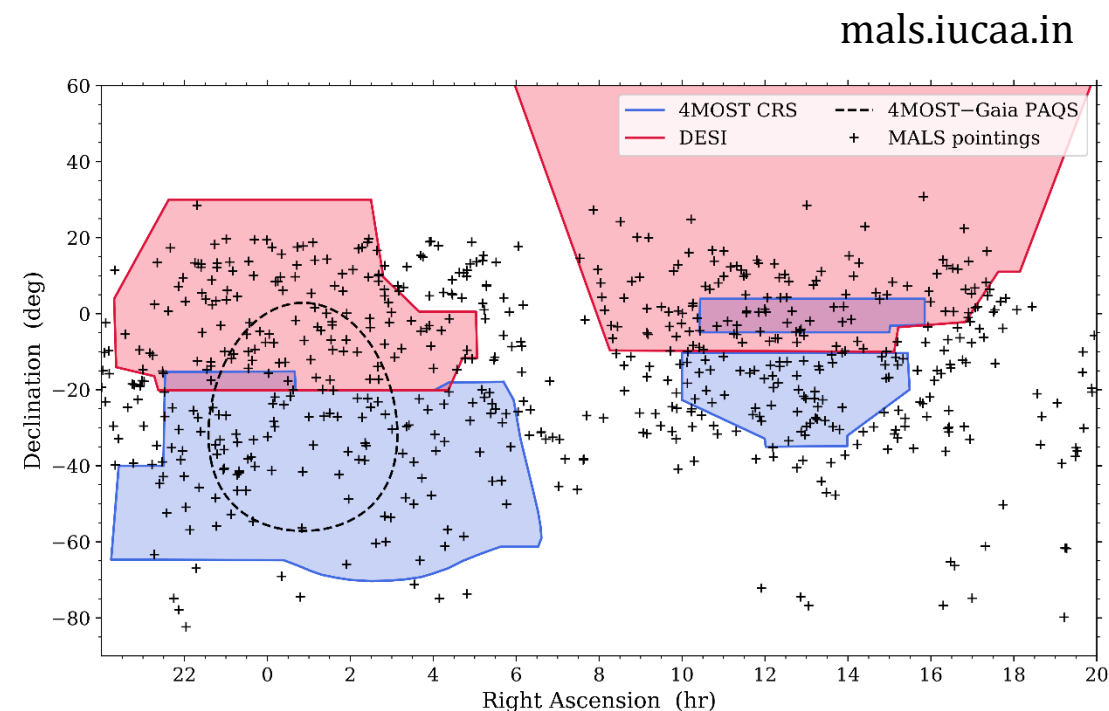
Одна из больших программ на телескопе MeerKAT – MALS:

Основная задача этой программы – слепой поиск абсорбционных линий HI и OH на больших z .

Table 2: MALS Survey Design

MALS phase	Number of pointings	Time per pointing (mins)	Spectral rms [†] (mJy beam ⁻¹)	Continuum rms (μJy beam ⁻¹)	Total on-source time (hrs)
L-band (900-1670 MHz)	740	56	0.5	3	691
UHF-band (580-1015 MHz)	370	121	0.6	3	746

Однако есть ещё много интересных задач (поле ≈ 3 кв градуса при разрешении $\sim 15''$) ...



Карта выборки ярких радиоисточников обзора MALS (> 200 mJy на ~ 1 GHz)

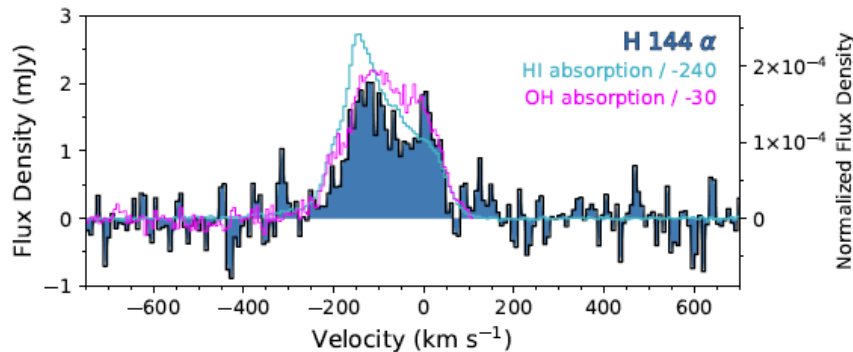
MALS – MeerKAT absorption line survey



Одна из больших программ на телескопе MeerKAT – MALS:

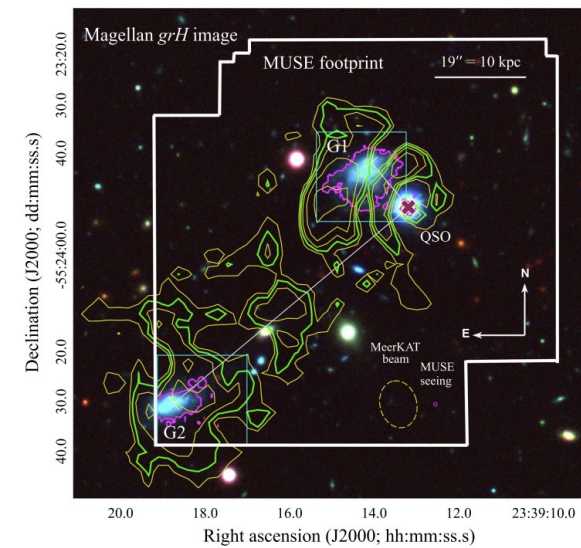
Однако есть ещё много интересных задач:

1. Наблюдения PKS 1830-211. Рекомбинационные линии H I в спектре квазара от галактики на $z=0.89$:



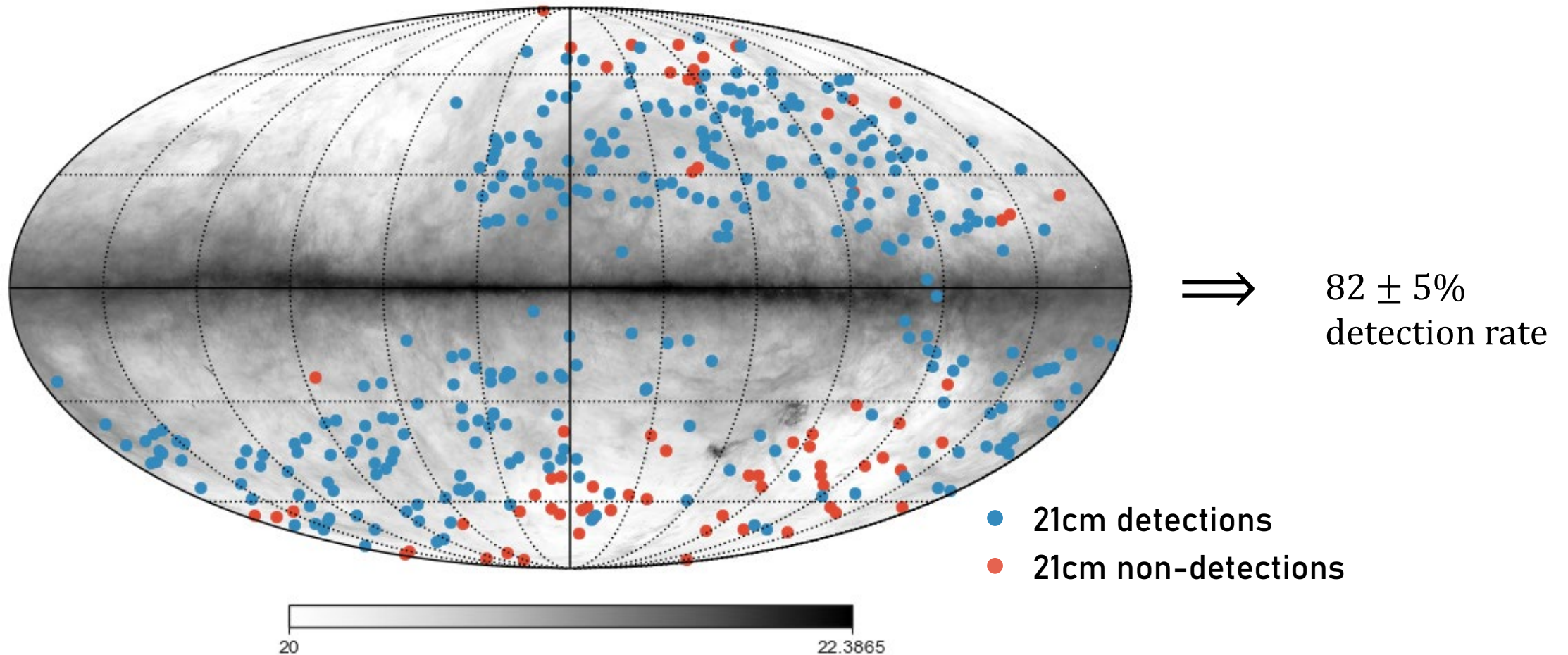
2. Каталоги радиогалактик. Радиодиполь
3. Отдельные источники (абсорбции), ассоциируемые с галактиками на промежуточных красных смещениях:

Gupta et al., ApJ, 907, 11, 2021
Combes et al., A&A, 648, 116, 2021
Balashev et al. MNRAS, 504, 3787, 2021
Boettcher et al., ApJ, 926, 33, 2022
Srianand et al., MNRAS, 516,1339, 2022
Maina et al., MNRAS, 516, 2050, 2022
Emig et al., Apj, 944, 93,2023
Combes et al., A&A, 671, 43, 2023
Wavenveld et al., A&A, 673, 113, 2023
Deka et al., ApJS, 270, 33, 2024
Deka et al., A&A, 687, 50, 2024
Wavenveld et al., A&A, 690, 163, 2024



MALS – MeerKAT absorption line survey

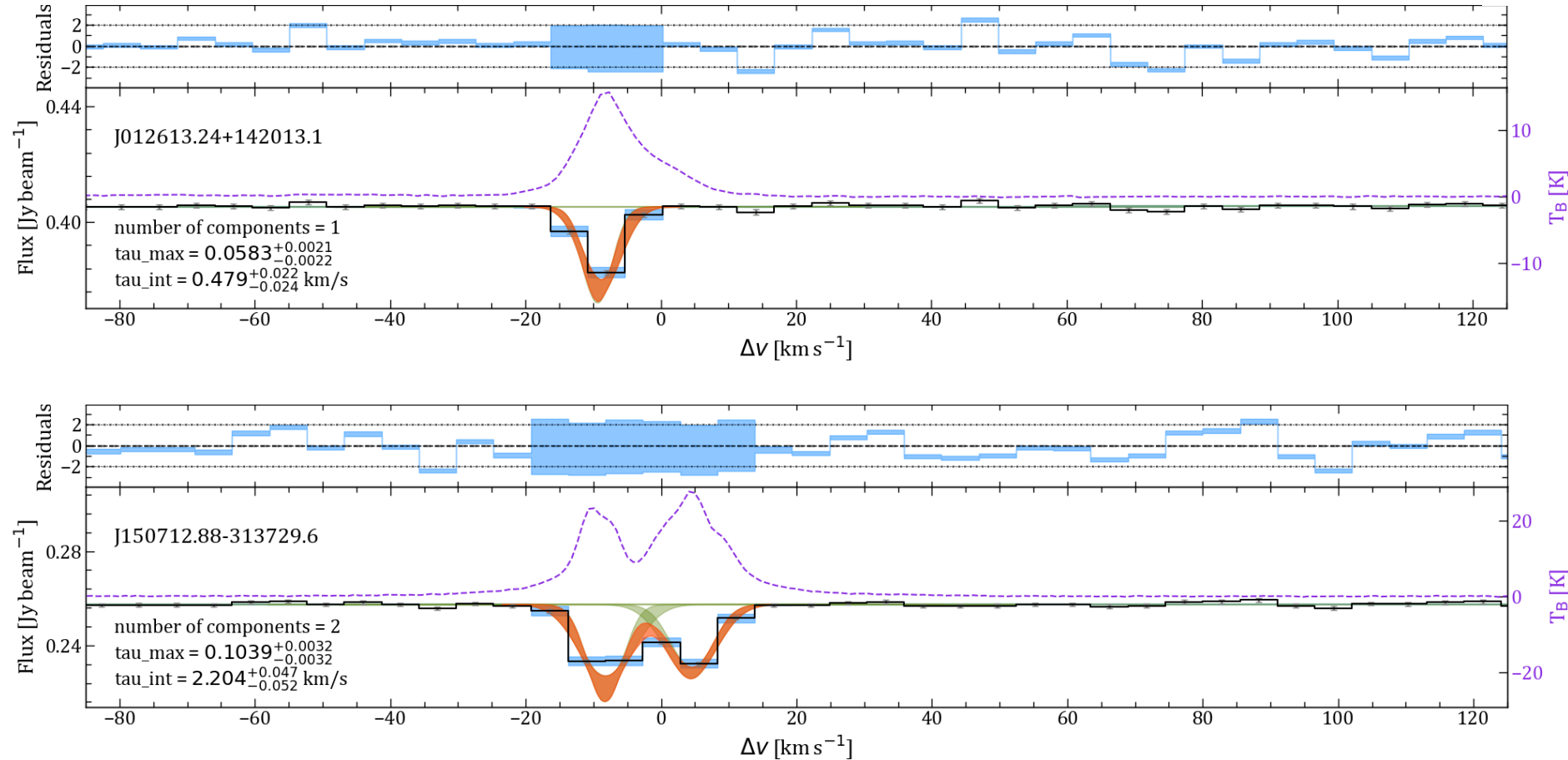
Помимо этого, выбранный диапазон MALS включает нашу Галактику:



MALS – MeerKAT absorption line survey



Помимо этого, выбранный диапазон MALS включает нашу Галактику:

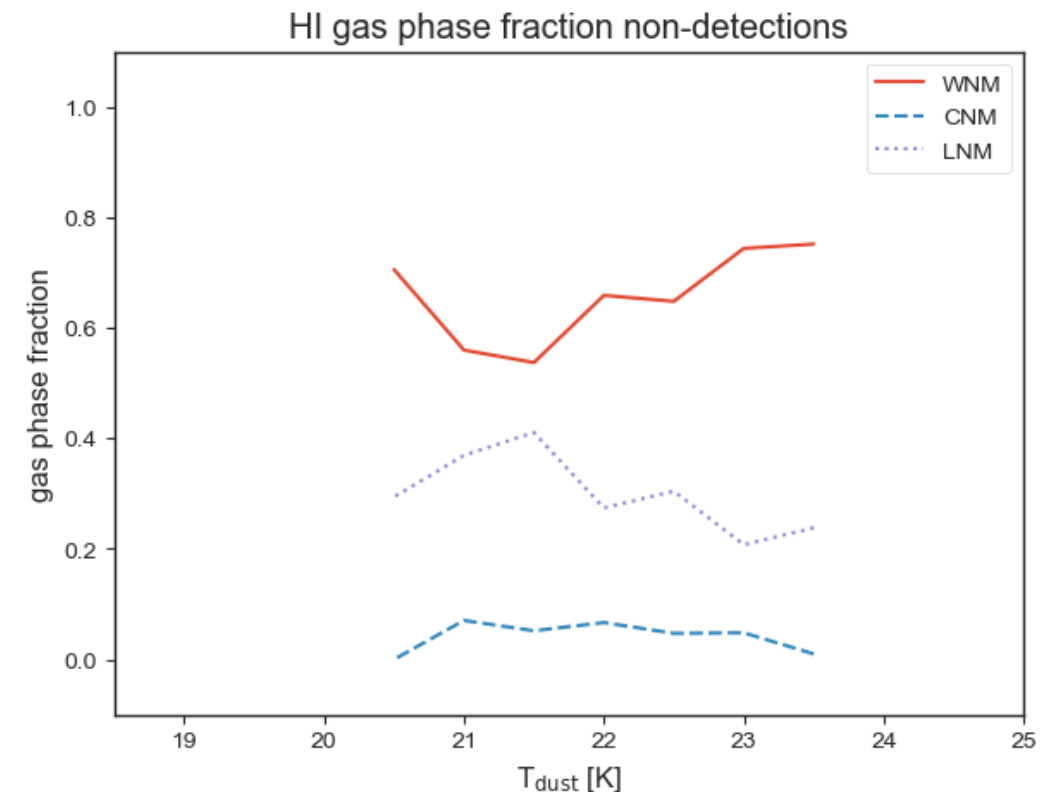
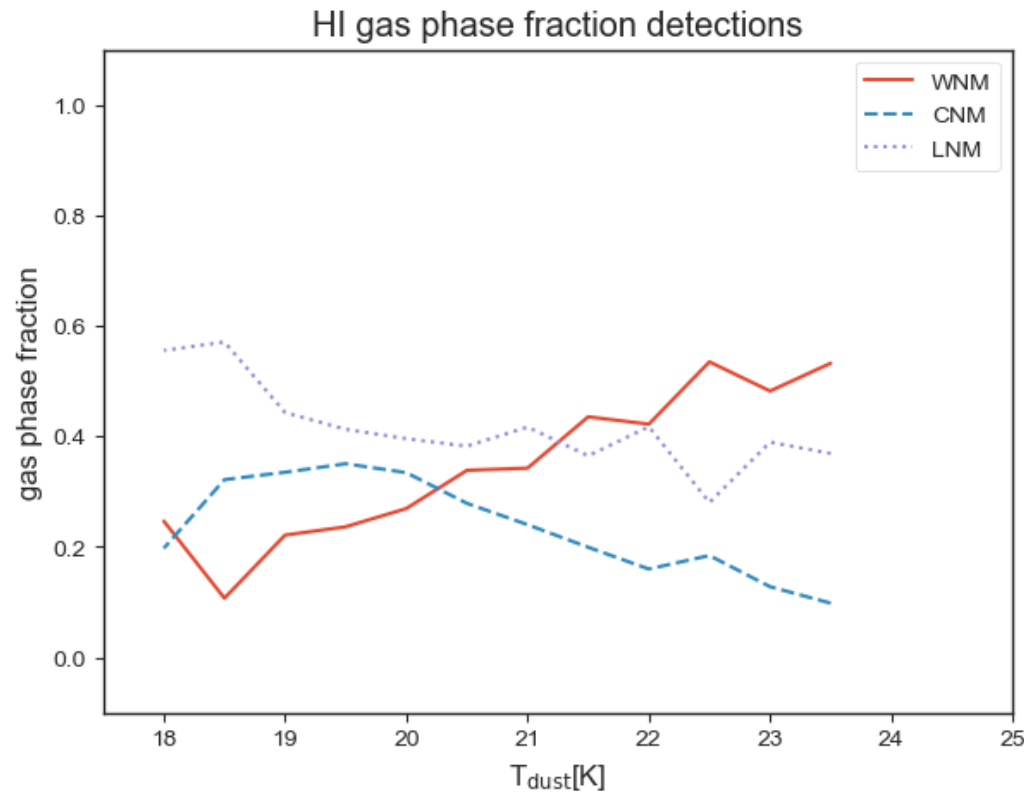


Хорошее соответствие между профилями линий 21см в эмиссии и абсорбции говорит о том, что холодная и тёплая фаза МЗВ хорошо перемешаны в локальном объёме

MALS – MeerKAT absorption line survey



Помимо этого, выбранный диапазон MALS включает нашу Галактику:

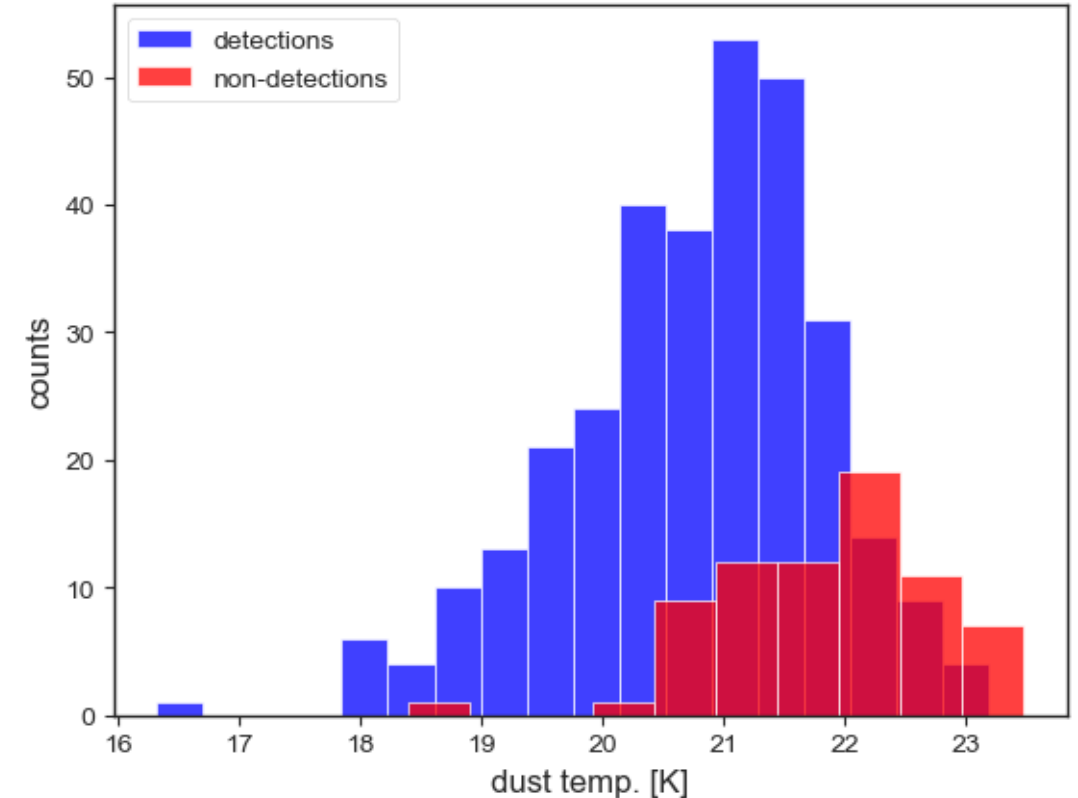
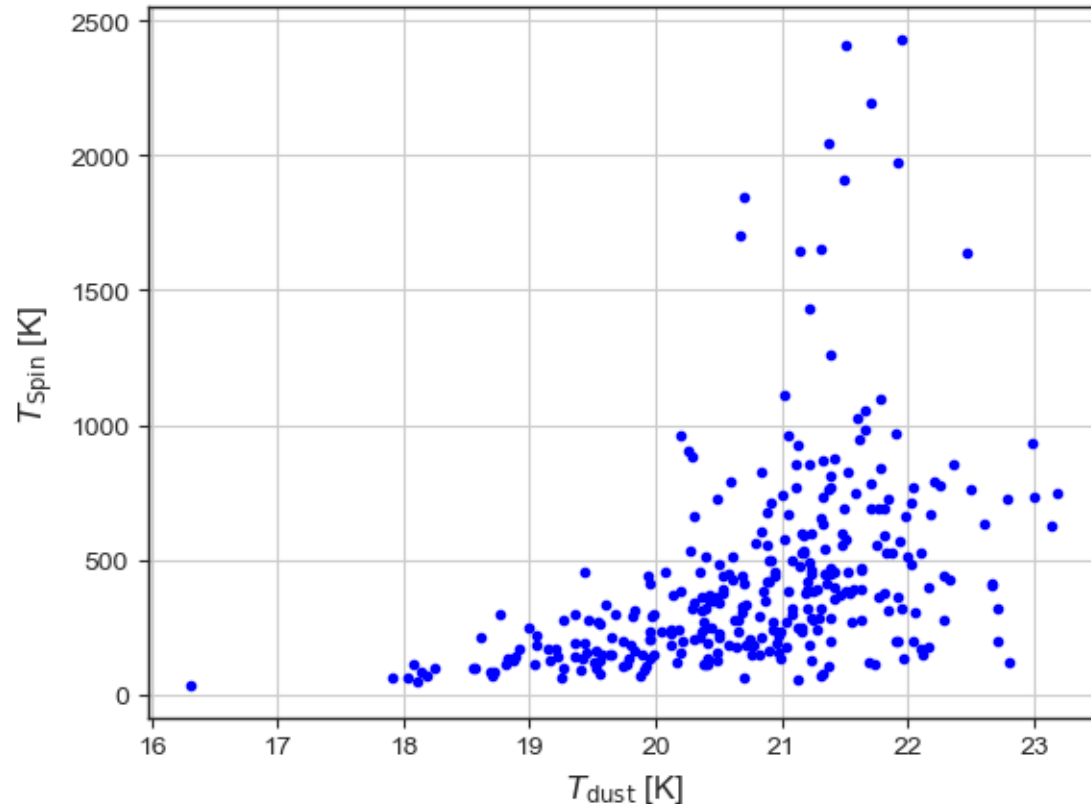


Частота идентификации абсорбции 21см выше, там где больше **фракция холодной фазы**

MALS – MeerKAT absorption line survey



Помимо этого, выбранный диапазон MALS включает нашу Галактику:



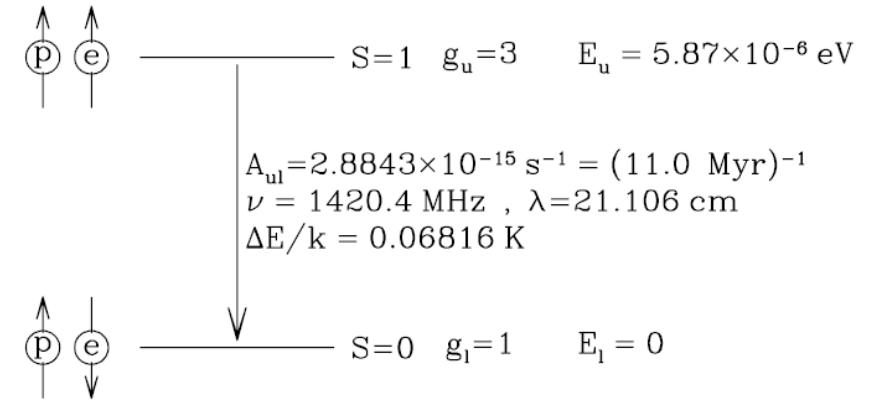
Частота идентификации абсорбции 21см выше, там где больше фракция холодной фазы и **ниже температура пыли** (по данным Planck)

Заключение

1. Линия 21 см – это мощный инструмент исследования барионного вещества в астрофизике и космологии: от тёмных веков до локальной межзвёздной среды нашей Галактики.
2. В работе 1977 Д.А. Варшалович и В.К. Херсонский первыми показали возможность идентификации абсорбционной линии 21 см на фоне реликтового излучения от эпохи тёмных веков, за счёт рассогласования температур барионного вещества и реликтового излучения.
3. В данный момент нет наблюдательных идентификаций этого сигнала и даже сигнал от более поздней эпохи – космического рассвета, который был заявлен в эксперименте EDGES – подвергнут сомнениям.
4. Строящиеся проекты (HERA) и планируемые (SKA) в ближайшем будущем должны позволить нам заглянуть в эти ранние эпохи.
5. В данный момент работающие предшественники SKA (MeerKAT и ASKAP) уже позволяют нам заглянуть чуть дальше (особенно это касается абсорбции) и шире в линии 21 см в окружающую Вселенную. Одним из ведущихся в данный момент проектов является MALS, результаты которого были частично представлены в докладе

Введение. Линия 21 см

Линия 21 см – перехода между уровням сверхтонкого расщепления основного уровня атомарного водорода, имеет большое значение в астрофизике и открывает широкие перспективы в наблюдательной космологии.



$$T_{\text{spin}} \equiv T_{\text{exc}} = \frac{0.0682\text{K}}{\ln(n_0 g_1 / n_1 g_0)}$$

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + \int_0^{\tau_\nu} e^{-(\tau_\nu - \tau'_\nu)} \frac{j_\nu}{\alpha_\nu} d\tau'_\nu$$

В силу $h\nu_{ul} \ll kT_{\text{spin}}$ излучающая способность в линии 21 см не зависит от спиновой температуры:

$$j_\nu = n_u \frac{A_{ul}}{4\pi} h\nu_{ul} \phi_\nu \approx \frac{3}{16\pi} A_{ul} h\nu_{ul} n(\text{H I}) \phi_\nu \quad \leftarrow \text{нормализованный профиль линии (определяемый распр. частиц по скоростям)}$$

А оптическая толща: $\tau_\nu = \int ds \alpha_\nu = 2.19 \left(\frac{N(\text{H I})}{10^{21} \text{ cm}^{-2}} \right) \left(\frac{100\text{K}}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{\text{km s}^{-1}}{\sigma_V} \right) e^{-u^2/2\sigma_V^2}$

Линия 21 см. Тёмные века

Тепловая эволюция барионного вещества в тёмные века определяется конкуренцией адиабатического расширения и нагрева за счёт комптоновского рассеяния:

$$T_K \approx T_e$$

А для электронов:

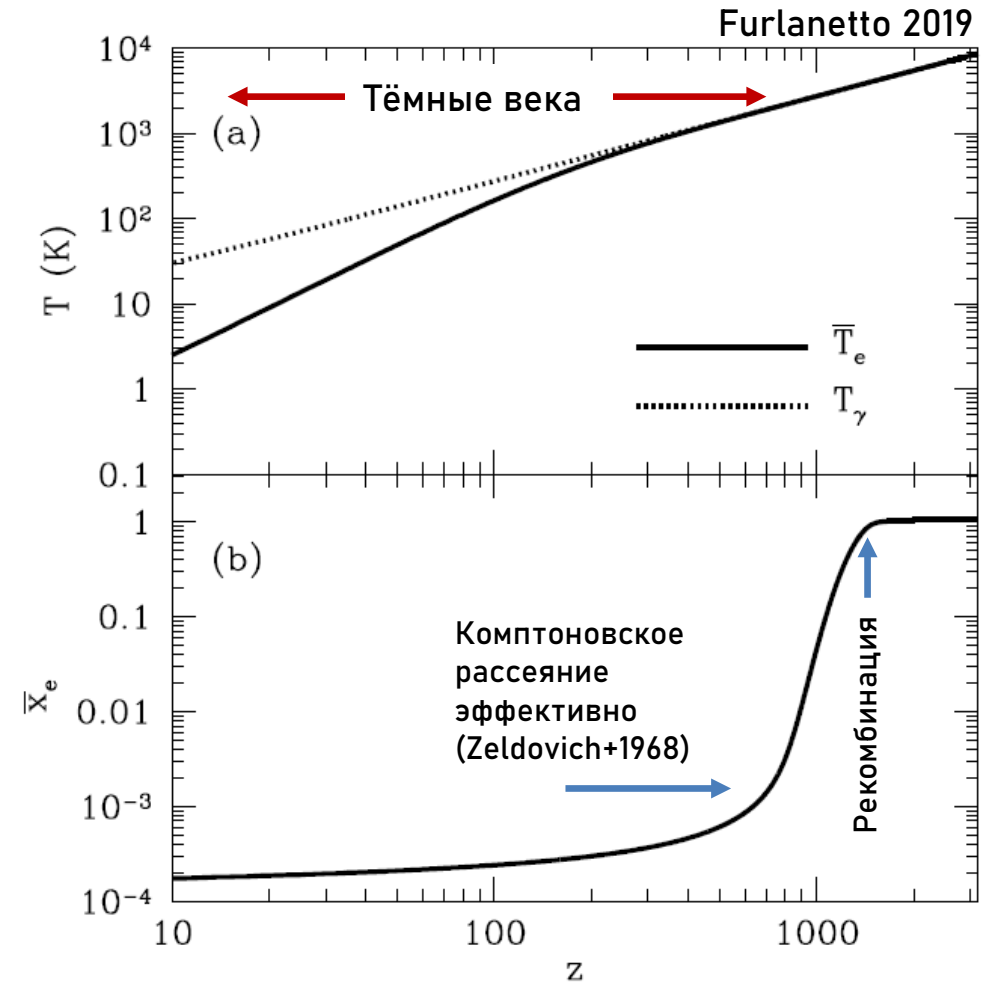
$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{x_e}{1+x_e} \left[\frac{T_{CMB} - T_e}{t_C(z)} \right] - 2HT_e$$

адиабатическое охлаждение:

$$T_e \propto (1+z)^2$$

комптоновское рассеяние

$$t_C(z) \equiv \left(\frac{8\sigma_T a_{rad} T_{CMB}^4}{3m_e c} \right)^{-1} = 1.2 \times 10^8 \left(\frac{1+z}{10} \right)^{-4} \text{ yr} < t_H \text{ при } z \gtrsim 150$$

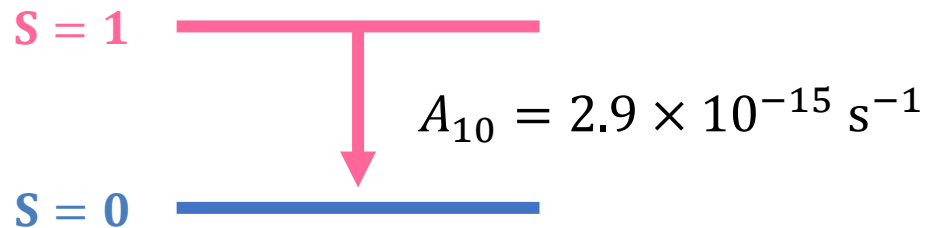


Линия 21 см. Спиновая температура

Температура возбуждения (Спиновая температура), определяет форму и величину сигнала, наравне с плотностью (δ), ионизационным состоянием (x_{HI}) и полем скоростей ($v_{\parallel}$).

Спиновая температура определяется конкуренцией процессов:

1. Спонтанный переход



Линия 21 см. Спиновая температура

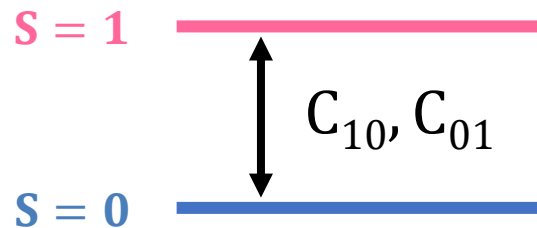
Температура возбуждения (Спиновая температура), определяет форму и величину сигнала, наравне с плотностью (δ), ионизационным состоянием (x_{HI}) и полем скоростей ($v_{\parallel}$).

Спиновая температура определяется конкуренцией процессов:

1. Спонтанный переход

2. Столкновения

плотность, температура



Линия 21 см. Спиновая температура

Температура возбуждения (Спиновая температура), определяет форму и величину сигнала, наравне с плотностью (δ), ионизационным состоянием (x_{HI}) и полем скоростей ($v_{\parallel}$).

Спиновая температура определяется конкуренцией процессов:

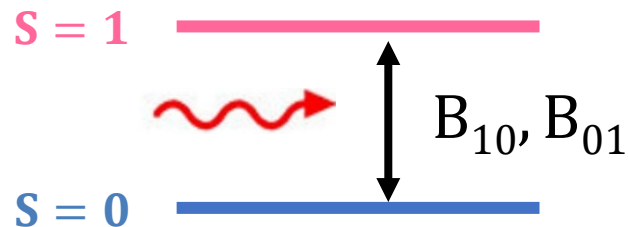
1. Спонтанный переход

2. Столкновения

плотность, температура

3. Прямые радиативные переходы

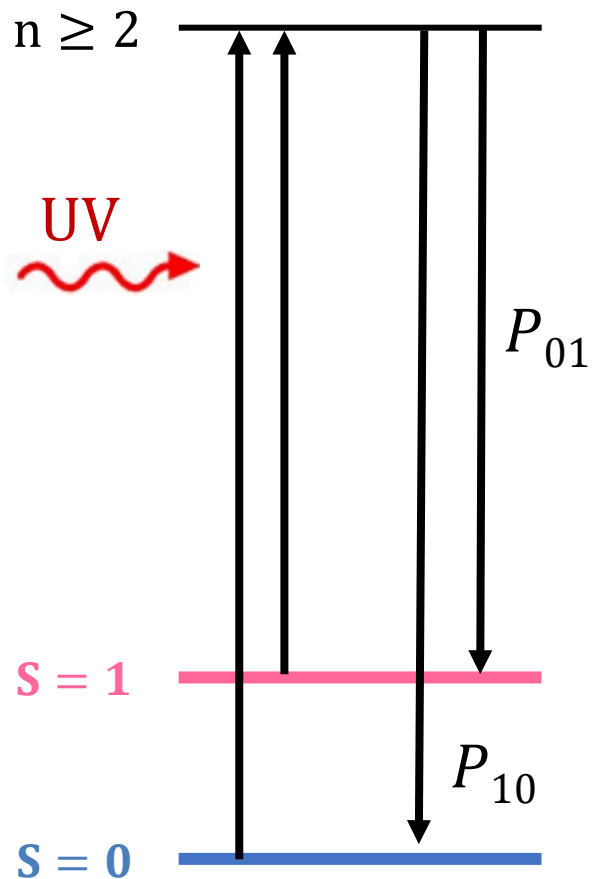
СМВ



Линия 21 см. Спиновая температура

Температура возбуждения (Спиновая температура), определяет форму и величину сигнала, наравне с плотностью (δ), ионизационным состоянием (x_{HI}) и полем скоростей ($v_{\parallel}$).

Спиновая температура определяется конкуренцией процессов:



1. Спонтанный переход

2. Столкновения

плотность, температура

3. Прямые радиативные переходы

СМВ

4. Радиативная накачка

УФ фон

Линия 21 см. Спиновая температура

Спиновая температуры определяется конкуренцией процессов:

$$n_1(C_{10} + P_{10} + A_{10} + B_{10}I_{\text{CMB}}) = n_0(C_{01} + P_{01} + B_{01}I_{\text{CMB}})$$

В пределе Релей-Джинса:

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + x_c T_K^{-1} + x_\alpha T_c^{-1}}{1 + x_c + x_\alpha},$$

где x_c и x_α параметры связи для столкновений и УФ излучения

$$T_K \text{ — кинетическая температура: } \frac{C_{01}}{C_{10}} = \frac{g_1}{g_0} e^{-T_\star/T_K} \approx 3 \left(1 - \frac{T_\star}{T_K} \right)$$

$$T_c \text{ — температура УФ излучения: } \frac{P_{01}}{P_{10}} \approx 3 \left(1 - \frac{T_\star}{T_c} \right)$$

в пределе $T_c \rightarrow T_K$ получается:

$$1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_S} = \frac{x_c + x_\alpha}{1 + x_c + x_\alpha} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_K} \right)$$