Re-combination and re-ionization; 21 cm astronomy

- Ionization equilibrium equations
- Re-combination ($z \sim 1100$)
- Re-ionization (H: $z > 6$, He: $z \sim 3$)
- C.M.B. and HI interaction

Ionization equilibrium

$$\frac{dn_{II}}{dt} = \dot{N}_{ion} - \alpha n_{II} n_e - 3\frac{\dot{a}}{a} n_{II}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{n_{II}}{n_0}\right) = \frac{1}{n_0}\frac{dn_{II}}{dt} - \frac{n_{II}}{n_0}\left(-3\frac{\dot{a}}{a}\right) = \frac{\dot{N}}{n_0} - \alpha\frac{n_{II}^2}{n_0^2} n_0$$

$$Q \equiv \left\langle \frac{n_{II}}{n_0} \right\rangle \qquad C \equiv \frac{\langle n^2 \rangle}{\langle n \rangle^2} \qquad n_0 = \langle n \rangle (z)$$

$$\dot{N}_{ion} = \int_{\nu_{ion}}^{\infty} \frac{j_\nu}{h\nu} d\nu$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\dot{N}_{ion}}{n_0} - \alpha C Q^2 n_0$$

$$\tau_e = \int_0^{z_{rec}} Q(z) n_0(0) (1+z)^3 \sigma_T \left|\frac{dct}{dz}\right| dz$$

Hydrogen recombination

$$p + e \leftrightarrow H + \gamma \qquad E_B = 13.6\text{eV}$$

Konkurencja pomiedzy rekombinacja ($\rightarrow$) a jonizacja ($\leftarrow$) powoduje, ze neutralny wodor powstaje w temperaturze $T \approx 4000$K - duzo ponizej temperatury odpowiadajacej energii jonizacji ($\approx 157\,000$K). (Obecnosc duzo wiekszej liczby fotonow znowu odgrywa tu role.)

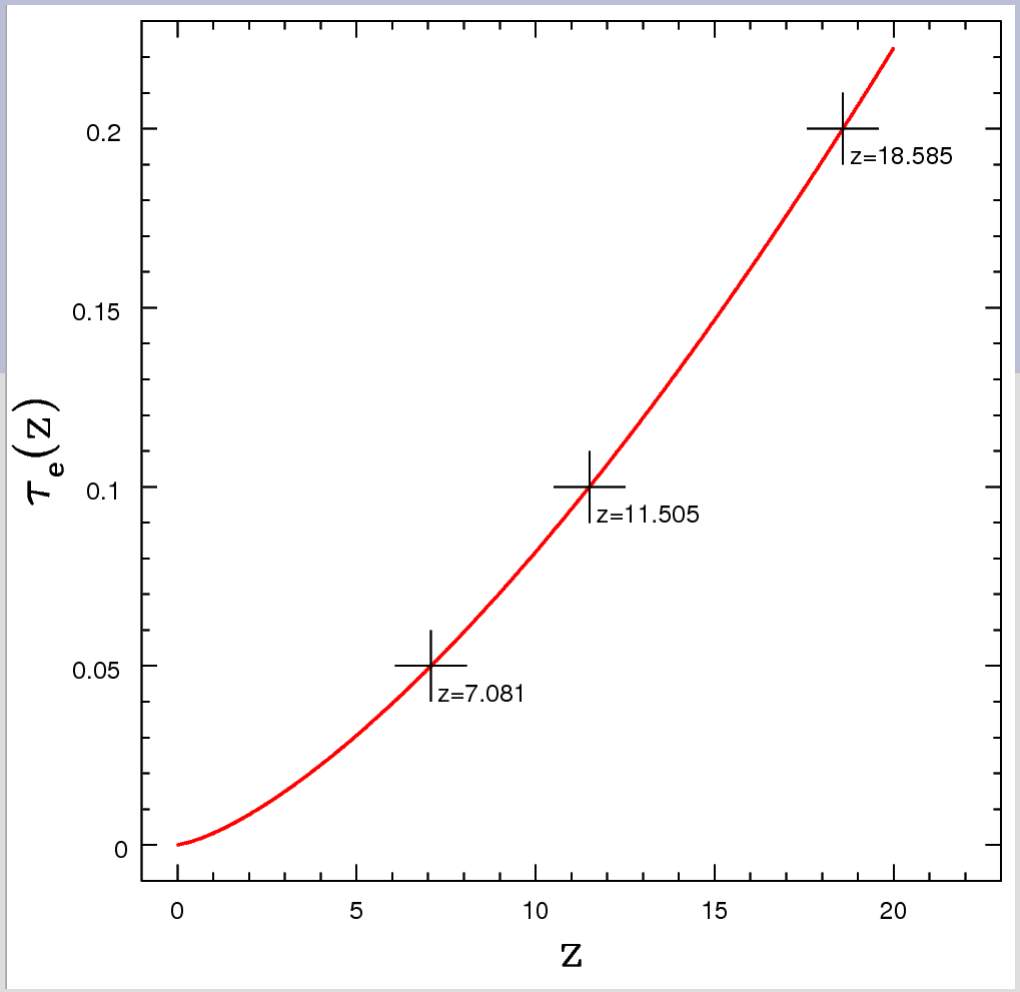
,,Ostatnie" fotony z rekombinacji sa ,,spoznione" - w momencie emisji ich energie odpowiadaja 20 - 30 kT dla mikrofalowego promieniowania ta. Ta czesc widma nie moze byc obserwowana.

After the recombination CMB photons and gas practically do not interact (but see below for more subtle effects).

Recombination (convention: Q=0.50) took place at 1+z ~ 1100 (4000 K at the beginning: 4000K/2.73K=1465). Recombination is neither instantaneous nor complete. (→ Thermal contact between CMB and plasma for some time decreasing due to the Universe expansion).

Electron scattering

Under full ionization (Q=1) electron scattering optical depth to LSS would be huge. Measurents gave ~0.2 (early WMAP), ~0.1 (early Planck) and ~0.05 (late Planck). Thus the gas must have been ionized instantaneously at z~7 or gradually starting earlier
→ UV sources needed at z>7 (used to be >11, > 18)



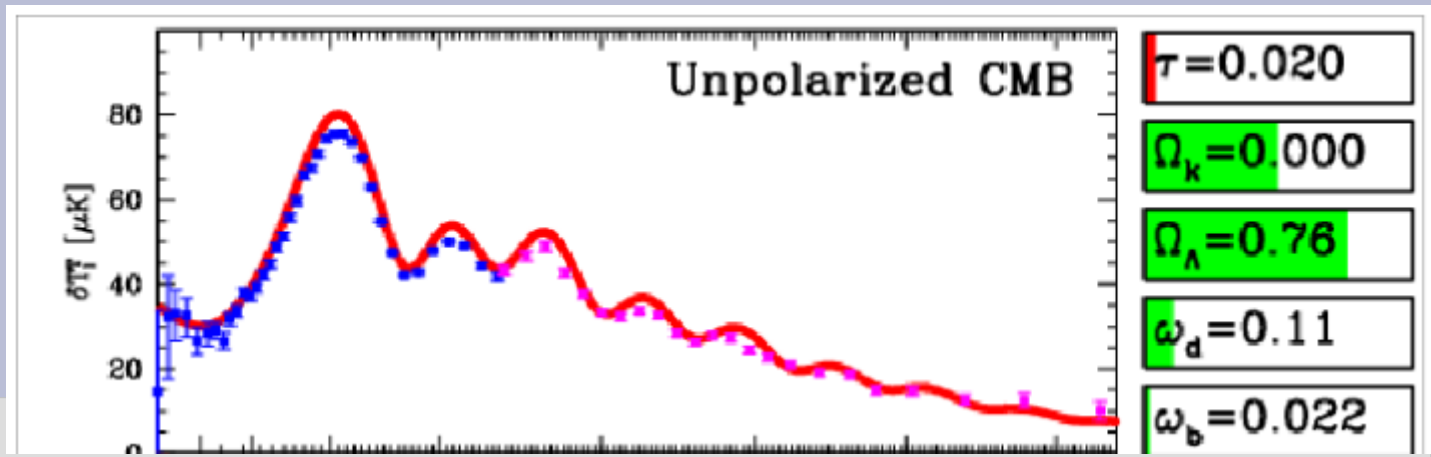
Assuming complete ionization, 75% of hydrogen by mass ($X = 0.75$, $Y = 0.25$, $Z = 0$) one has at $z = 0$:

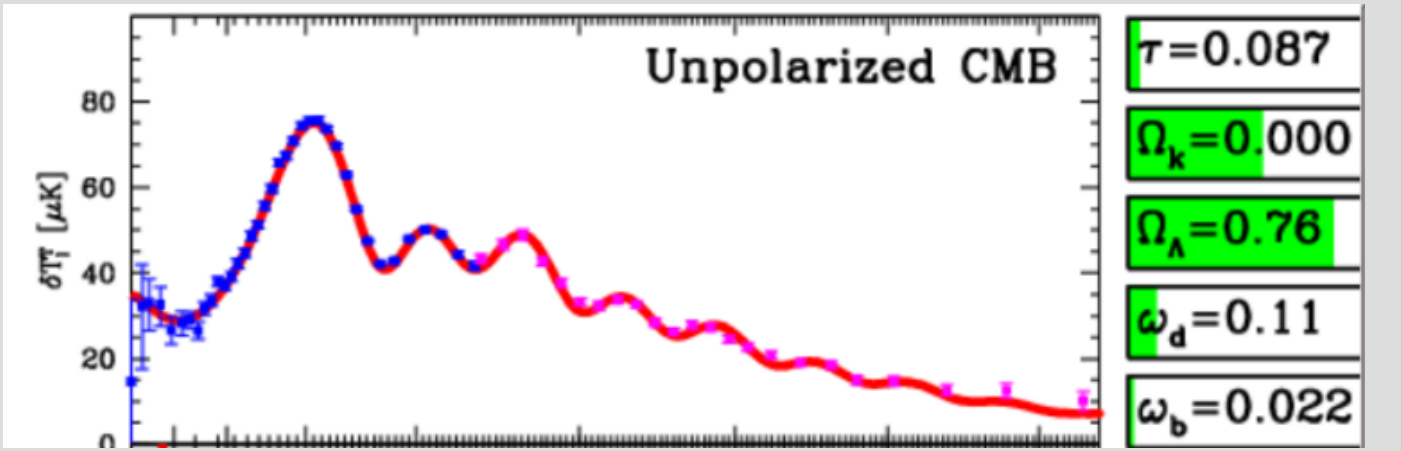
$$n_e = \Omega_B(X + 0.5Y)\frac{\rho_c}{m_p} = 0.22\frac{\text{el}}{\text{m}^3}$$

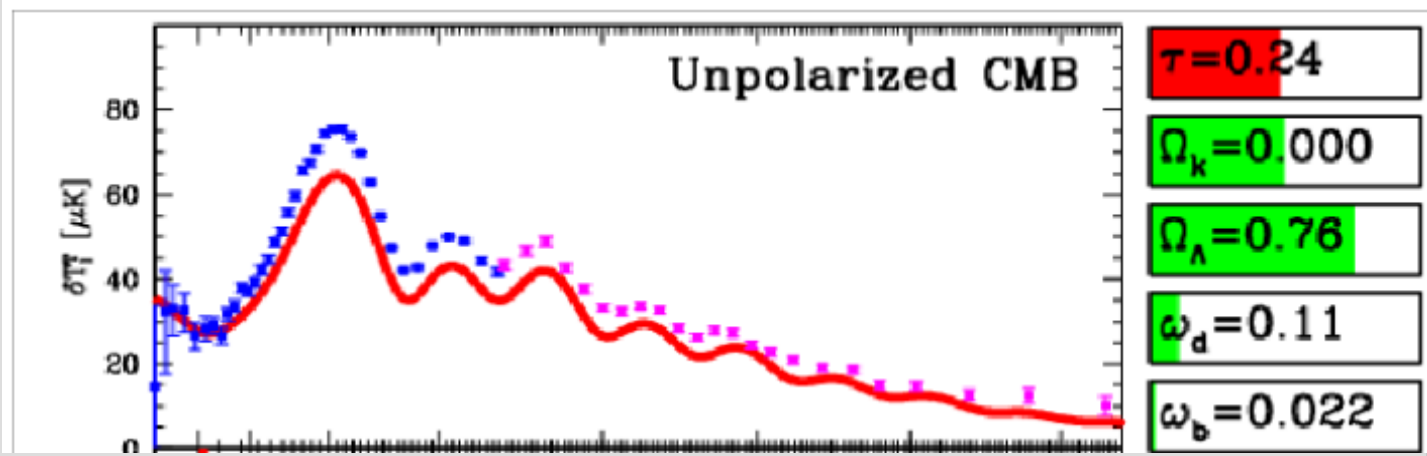
for $\Omega_B = 0.0486$, $h = 0.6774$. Again, for the complete ionization the optical depth up to sources at z is:

$$\tau_e(z) = \int_0^z \frac{\sigma_e n_e (1+z)^3 \, dz}{(1+z)\sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

CMB – fits to the anizotropy power spectrum







Keeping all else constant and changing tau one can find its best fitting value (0.087 at this obsolete illustration).

Max Tegmark http://space.mit.edu/home/tegmark/movies.html

QSO: Gunn-Peterson effect

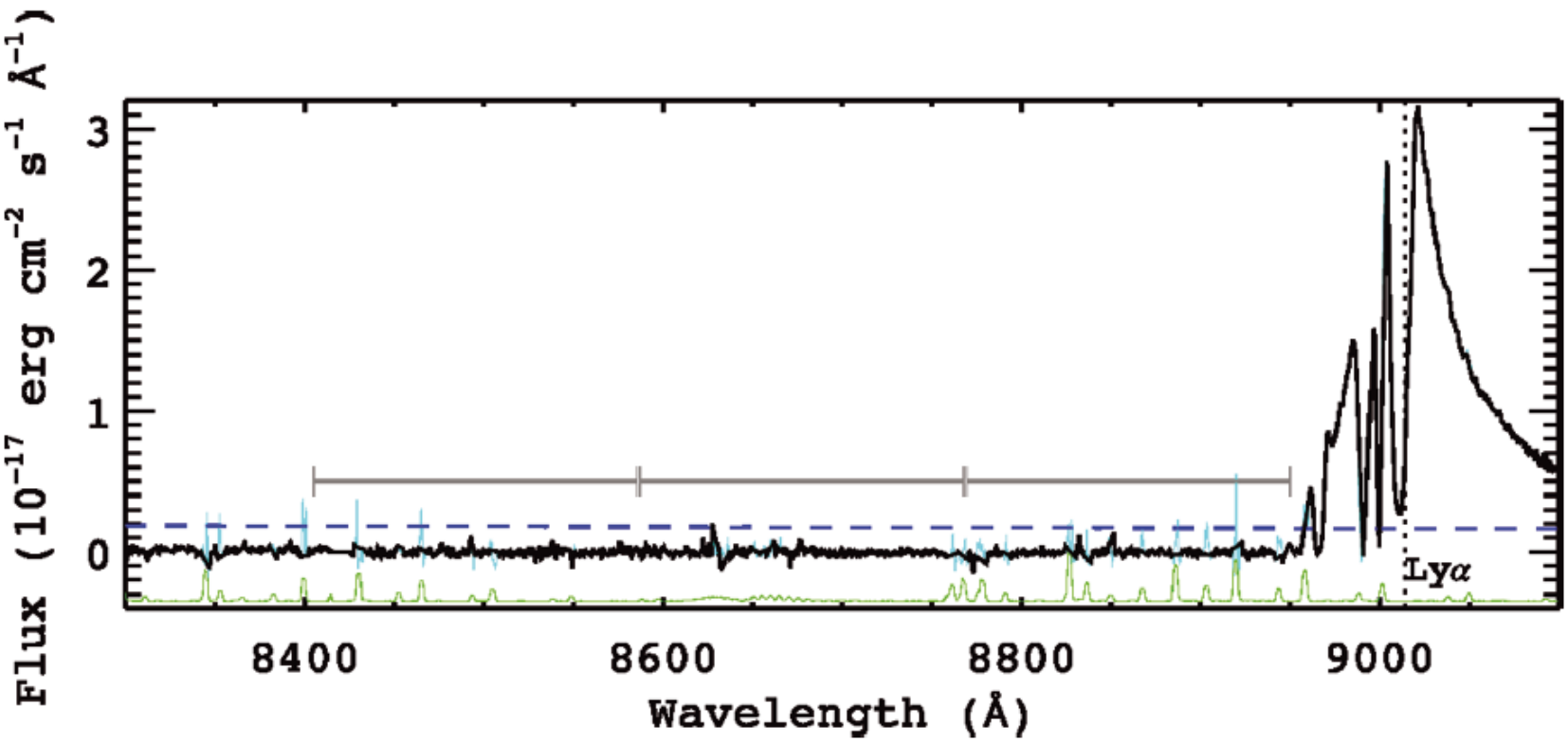


Figure 2. One-dimensional spectra of CFHQS J2329−0301. The blue dashed line shows the best-fitting continuum level, assuming a power law of $f_\nu \propto \nu^{-0.5}$. The cyan lines show the wavelengths masked out due to the strong sky emissions. The green lines show the sky spectrum in arbitrary units. The grey lines show the first three wavelength regions where the flux was consistent with zero. The corresponding two-dimensional spectrum is shown in Fig. 1.

[Goto et al (2011) MNRAS, 415, L1]

Even a very small fraction of neutral hydrogen (H I) or helium (He I, He II) can absorb photons of resonant frequencies. H I in ground state absorbs at 1216 A (Ly-alpha) and He II at 304 A (He II Ly-alpha). H I (if present at z<z_em) may absorb practically all photons at wavelengths <1216 A*(1+z_em). Similarly, when H I is absent, He II may do it for waves <304 A*(1+z_em)

QSO: Gunn-Peterson effect

[Goto et al (2011) MNRAS, 415, L1]

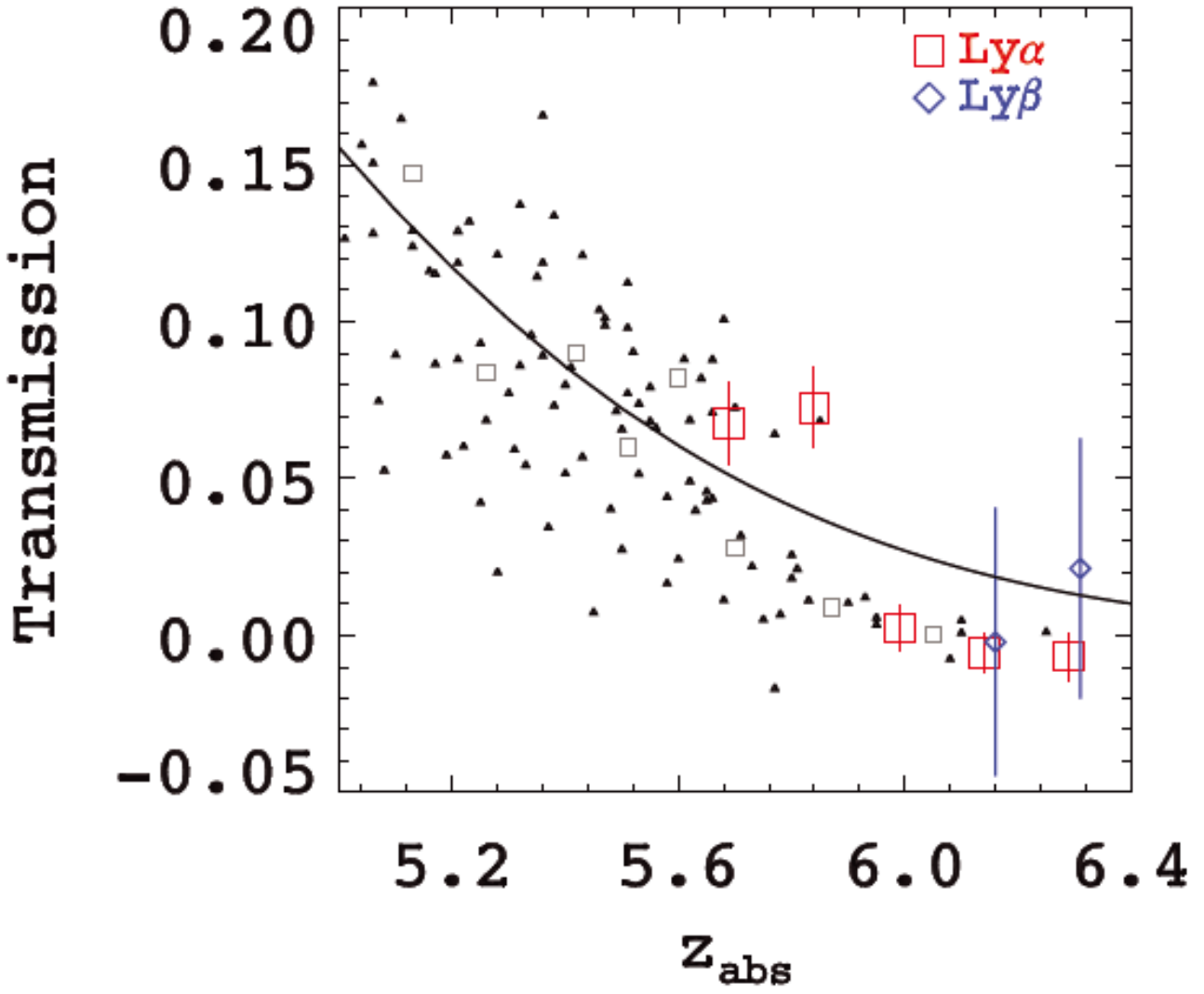


Figure 3. Lyman transmission in the spectrum of CFHQS J2329−0301 (red, filled circles). The black triangles are from F06 and the grey squares are from Songaila (2004).

Reionization

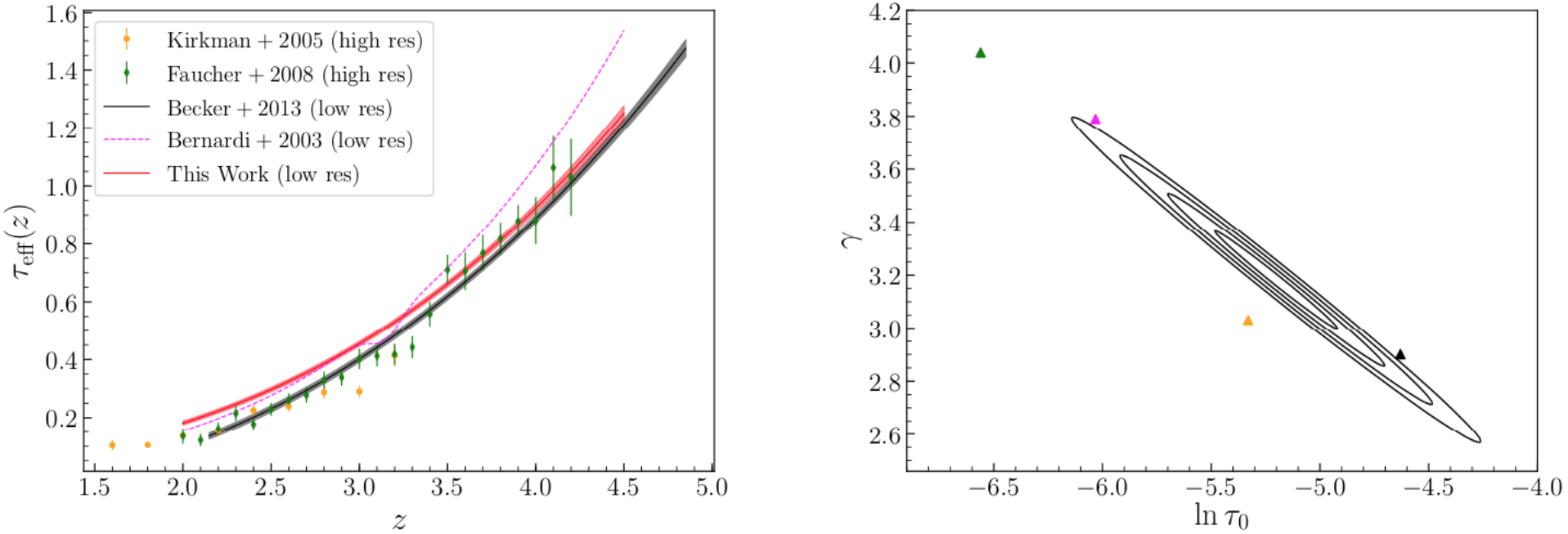


Figure 8. Comparison of our measurements with published results. **Left:** The evolution of the effective optical depth using the global best-fit parameters given by Equation 13 is shown in red. The shaded region, also in red, is the 1σ uncertainty in our best-fit model, after taking the covariance between the model parameters into account. **Right:** The 2, 4, 6 and 8σ confidence intervals for our measurements in the $\tau_0 - \gamma$ plane are displayed in black. A Gaussian form of the likelihood to these high σ confidence levels has been assumed. The central values of the other studies are represented in solid triangles with the same color scheme as in the left panel.

Based on observations of ~ 40 000 QSO from BOOS SDSS IV, DR12

Fit: \tau=\tau_0*(1+z)^\gamma

Kamble et al. (2019) arXiv:1904.01110

Reionization

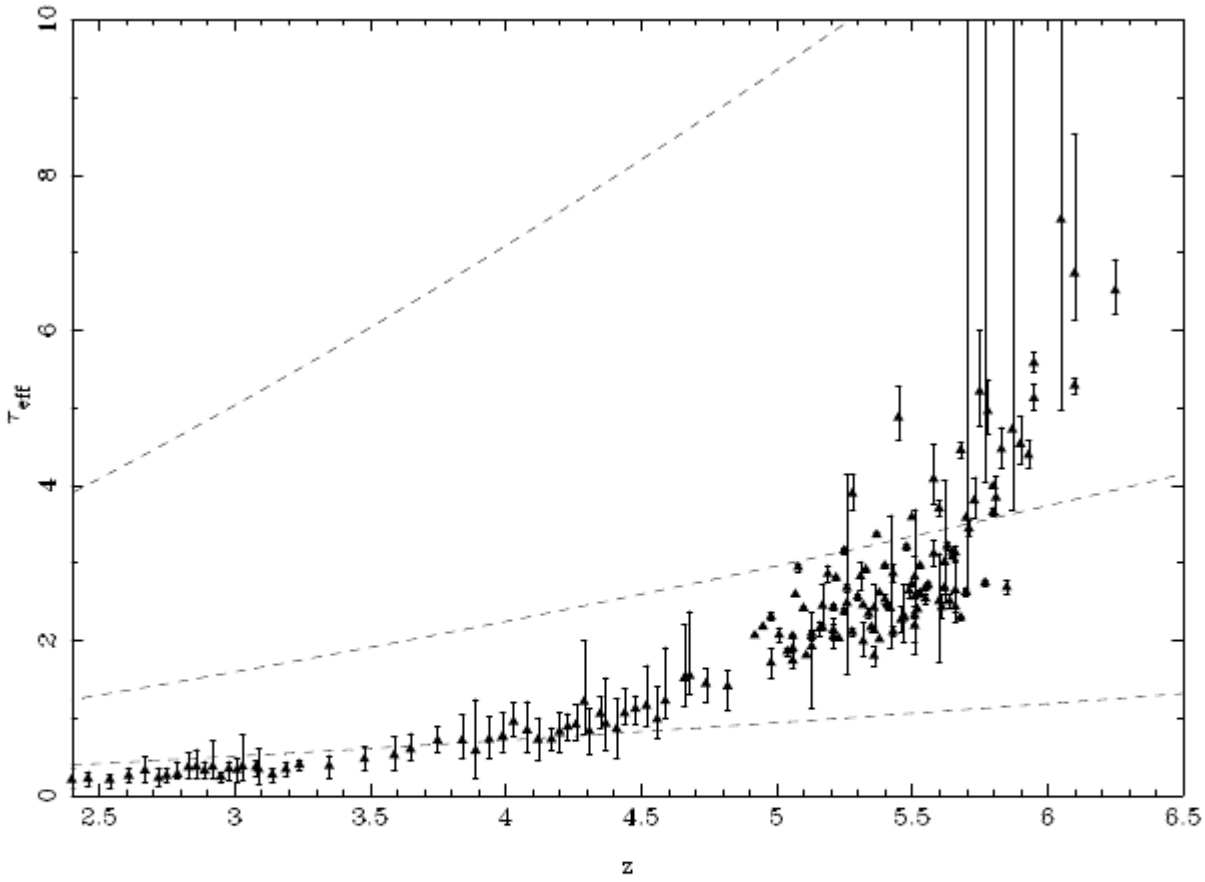


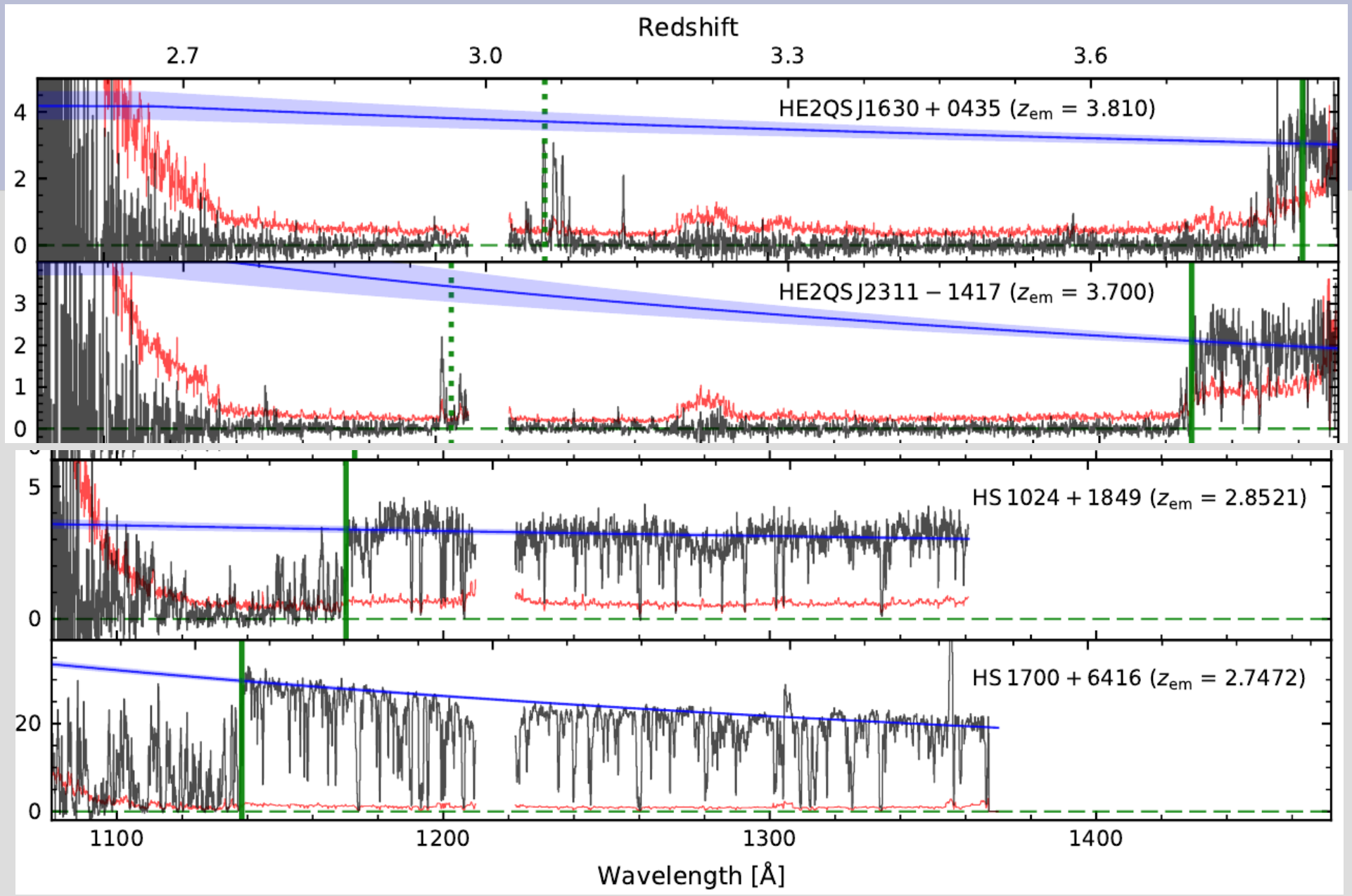
FIG. 1: The effective optical depth of Lyα absorption as function of redshift z. The points with errorbars represent the observational data. The dashed curves, from top to bottom, represent the predictions for a uniform IGM with neutral hydrogen fraction $x_{\rm HI} = (3, 1, 0.3) \times 10^{-5}$, respectively.

Choudhury (2009) CurrSci, 97, 841

Ok z>6 absorpcja fotonów Ly-alfa gwałtownie wzrasta ==> jest tam znacząca frakcja HI ==>powtorna jonizacja WODORU zakonczyła się przy z~6

Reionization: helium

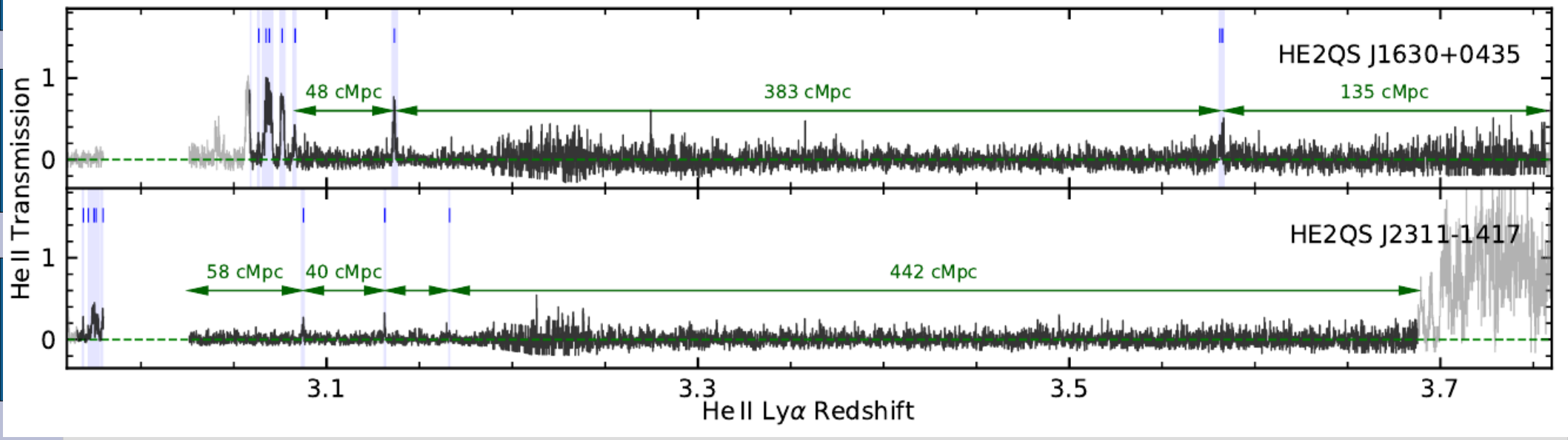
[Makan et al. arXiv:2112.07691]

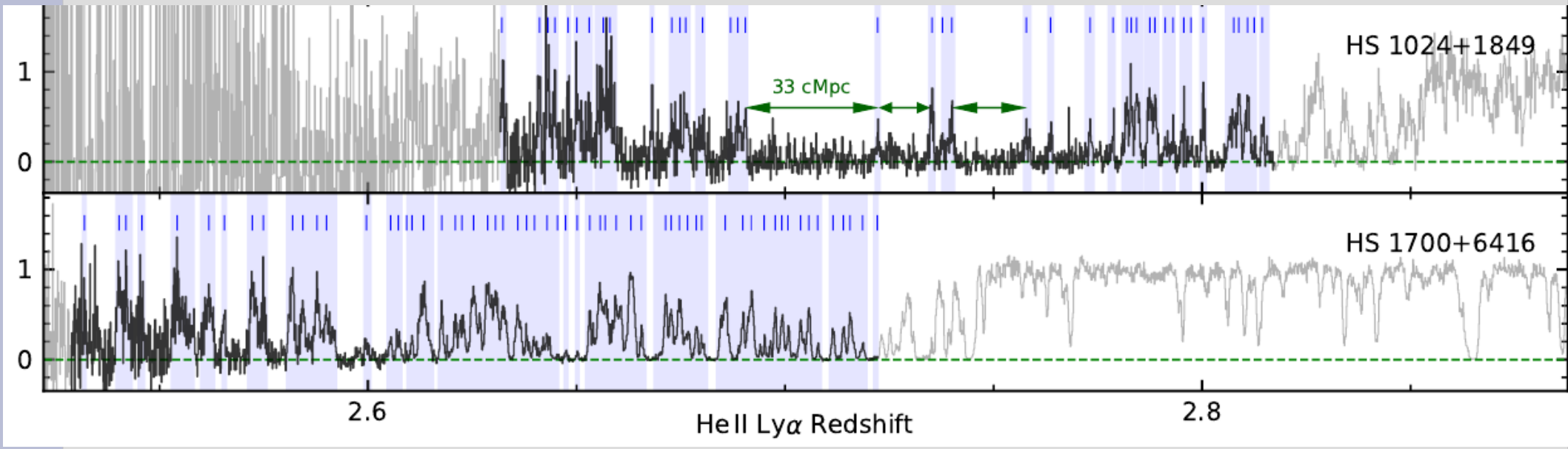


Solid green lines: 304 A*(1+z_em) He II Ly-alpha; dotted: He II Ly-beta

Reionization: helium

[Makan et al. arXiv:2112.07691]

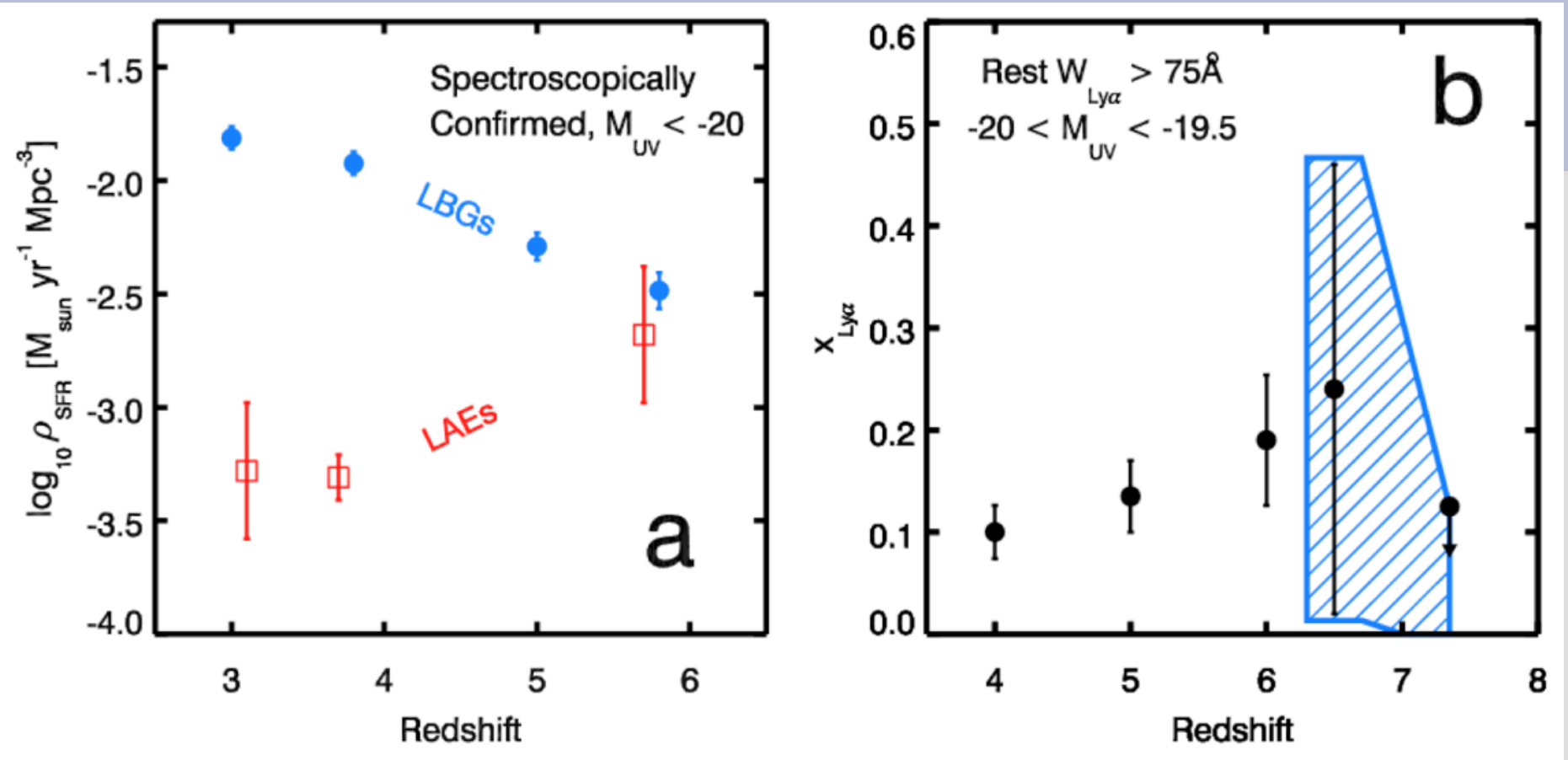




Solid green double arrows: complete absorption by He II Ly-alpha

→ **He fully ionized at z~ 3**

Koniec jonizacji



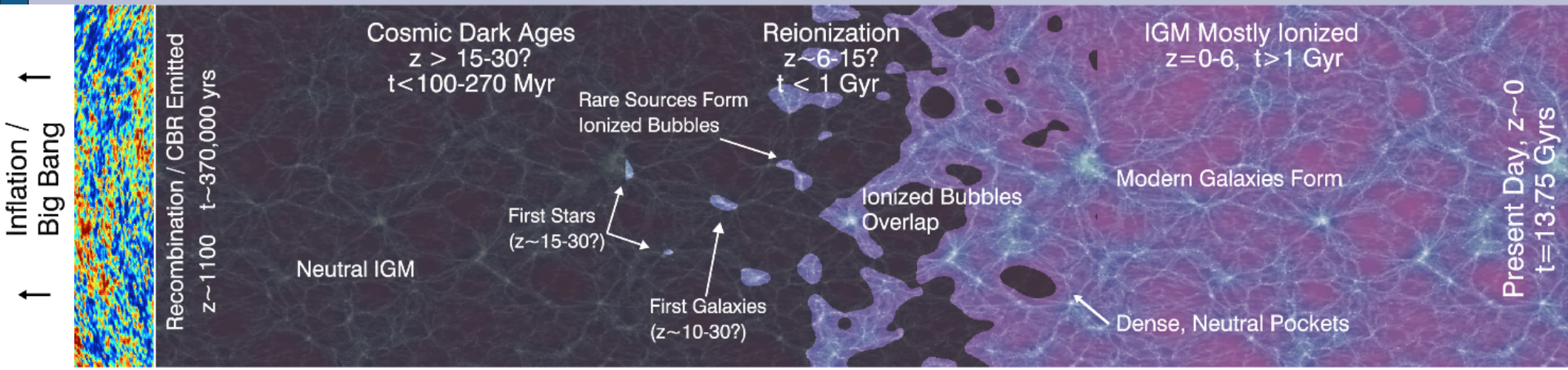
LAE [Lyman Alpha Emitters] mogą być wykrywane z pomocą wąskich filtrów. Gęstość takich obiektów rośnie z przesunięciem ku czerwieni. (Młode gwiazdy + gaz → emisja Ly-a; jeśli pyłu mało, duża szansa na wydostanie się tego promieniowania na zewnątrz; jeśli nie ma neutralnego gazu w otoczeniu źródła → duża szansa na obserwacje. Spadek liczby LAE przy z~7 może być skutkiem niepełnej jonizacji IGM

Robertson, B. E., Ellis, R. S., Dunlop, J. S., McLure, R. J. and Stark, D. P., *Nature* **468,** 55 (2010)

Reionization

- Neutralny wodór powstał przy z ~ 1100, wskutek tzw rekombinacji. Uwolnione wówczas fotony stanowią CMB
- Obserwacje CMB wymagają, by gaz zjonizowany miał \tau~0.05
- Efektu Gunna - Petersona nie obserwuje się przy z<6-7, czyli wtedy proces jonizacji powinien się był zakończyć
- Jonizacja musiała się rozpocząć dostatecznie wcześnie by otrzymać wymagane przez obserwacje \tau (Całkowicie zjonizowany gaz pomiędzy z=0 a z=6 daje \tau=0.04)
- Skokowa, całkowita jonizacja przy z=7 dawałaby \tau=0.05. Tę samą grubość optyczną (na wiele sposobów) można otrzymać przy stopniowej jonizacji, ale początek procesu musi mieć miejsce przy z>7
- “old” WMAP: \tau ~ 0.2
- Planck 2015: \tau=0.078+/-0.014; Planck 2016: \tau=0.078+/-0.019 (all TT+low P) ale 0.053+/-0.019 (high TE+low P); 0.079+/-0.017 (TT+TE+EE+low P)
- Planck 2018: \tau ~ 0.05

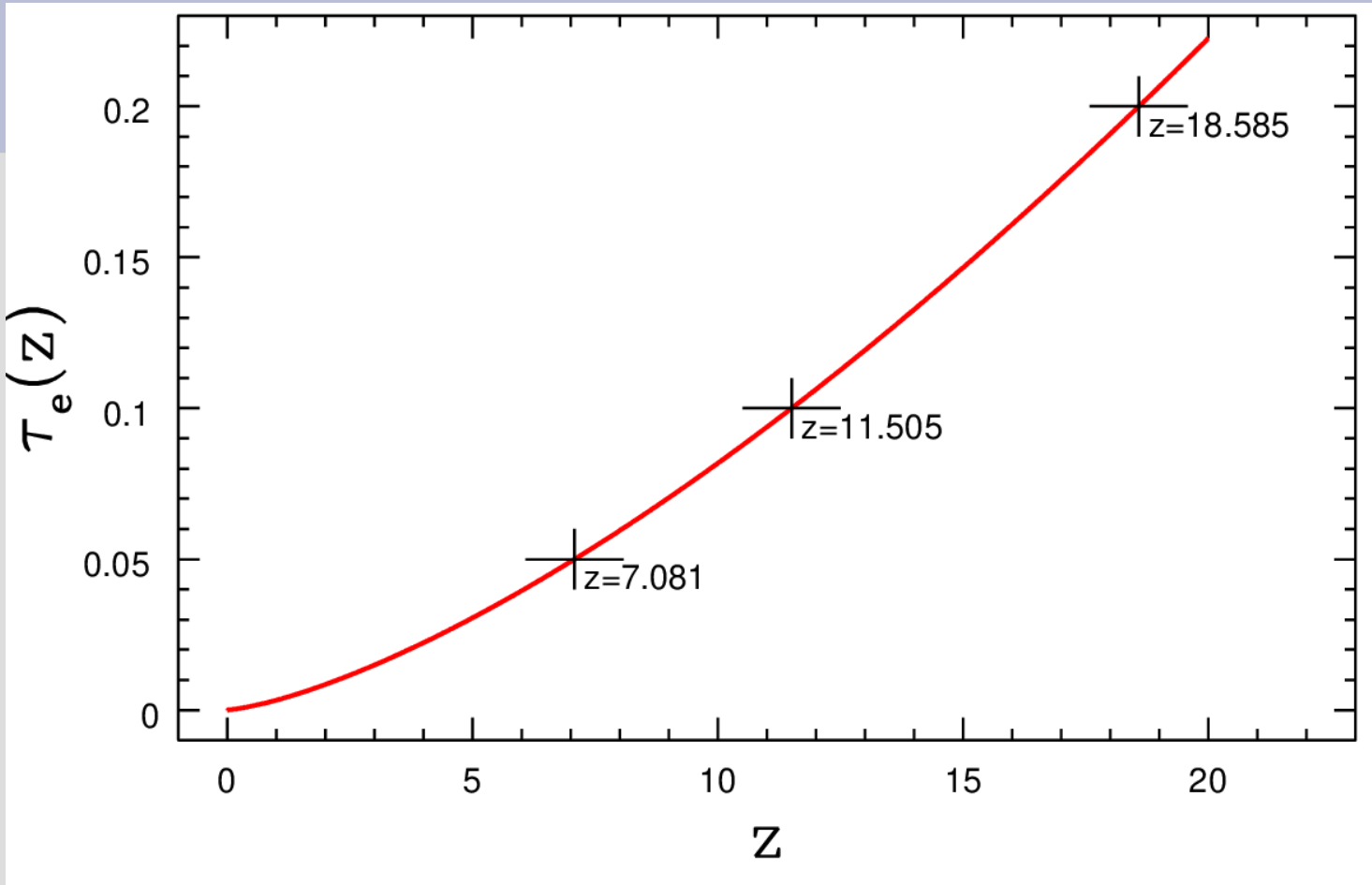
Powtórna jonizacja



Robertson, B. E., Ellis, R. S., Dunlop, J. S., McLure, R. J. and Stark, D. P., *Nature* **468,** 55 (2010)

Schemat: po rekombinacji (z~1100) IGM staje się neutralny. Brakuje źródeł promieniowania (wieki ciemne). Pierwsze gwiazdy/galaktyki zaczynają jonizować gaz wokół siebie. Obszary zjonizowane łączą się a neutralne stanowią oddzielne “wyspy”. W końcu cała przestrzeń wypełniona jest zjonizowanym gazem, a gaz neutralny pozostaje tylko w niewielkich objętościowo obszarach wysokiej gęstości, trudnych do zjonizowania przez tło UV (obłoki Ly-alfa).

Scattering optical depth



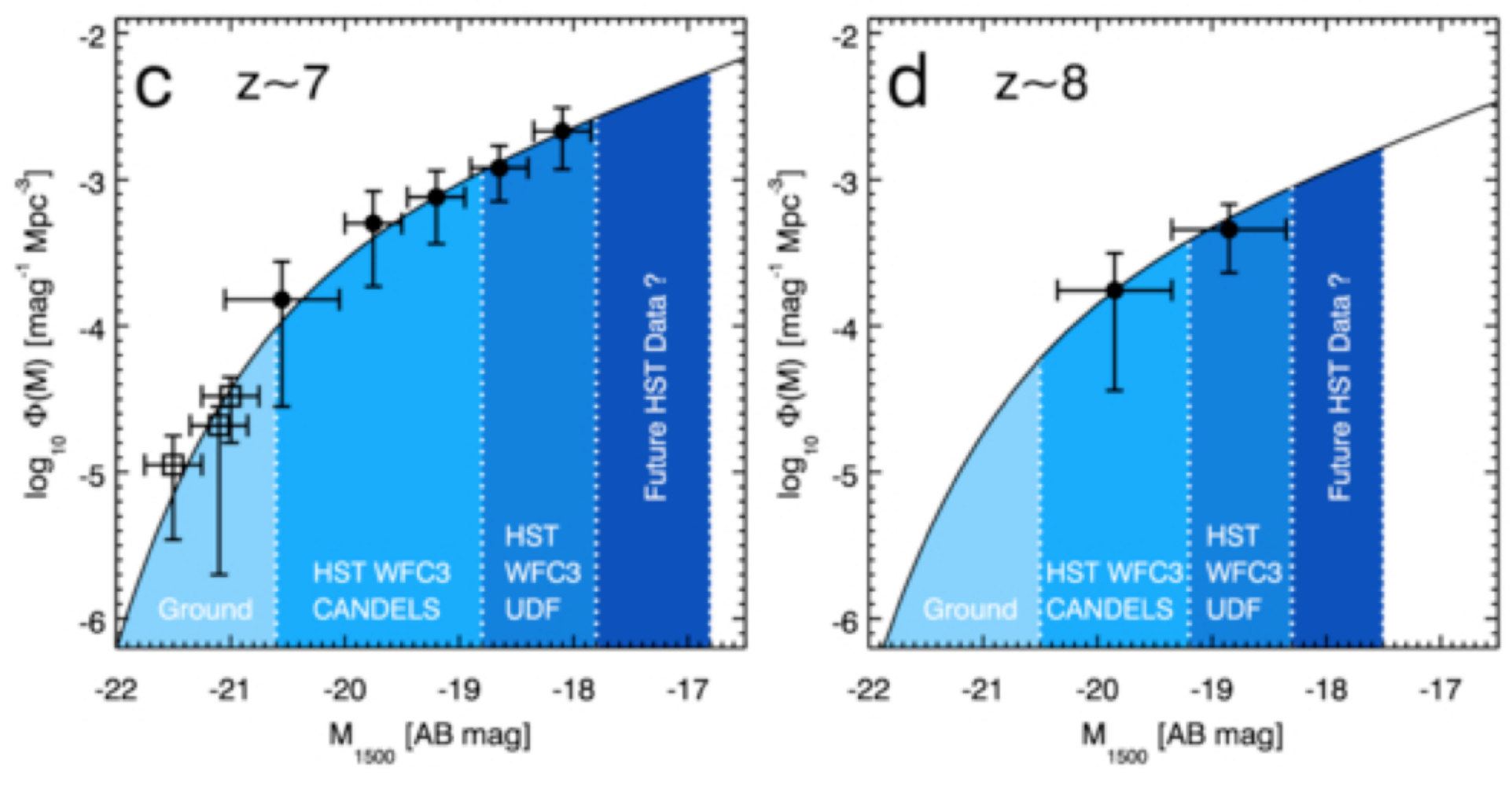
Assuming complete ionization of hydrogen and helium at < *z* and zero ionization for > *z* one can calculate the optical depth as a function of this parameter (above). CMB requires some value of *tau* which corresponds to a required redshift of an instantaneous reionization. (In other scenarios it serves as a characteristic redshift of reionization.) For tau=0.05 the reionization should end by z=7.

Powtórna jonizacja

Bilans energii (warunek konieczny)

- Reakcje termojądrowe H-->He: 8MeV/nukleon; jonizacja 13.6eV ===>zamiana 0.000 008 masy H w He to minimalne wymaganie
- Podobnie akrecja (o 10 -20 razy większej wydajności) na BH wymaga zamiany 10^{-7} – 10^{-6} masy w BH
- Powyższe bardzo uproszczone, bo w istocie liczy się tylko promieniowanie jonizujące (fotony o energiach > 13.6eV)
- Z drugiej strony możliwa jest rekombinacja i niektóre atomy trzeba jonizować jeszcze raz
- Nie wszystkie fotony dotrą do neutralnego gazu, zwłaszcza gdy będzie on silnie niejednorodny

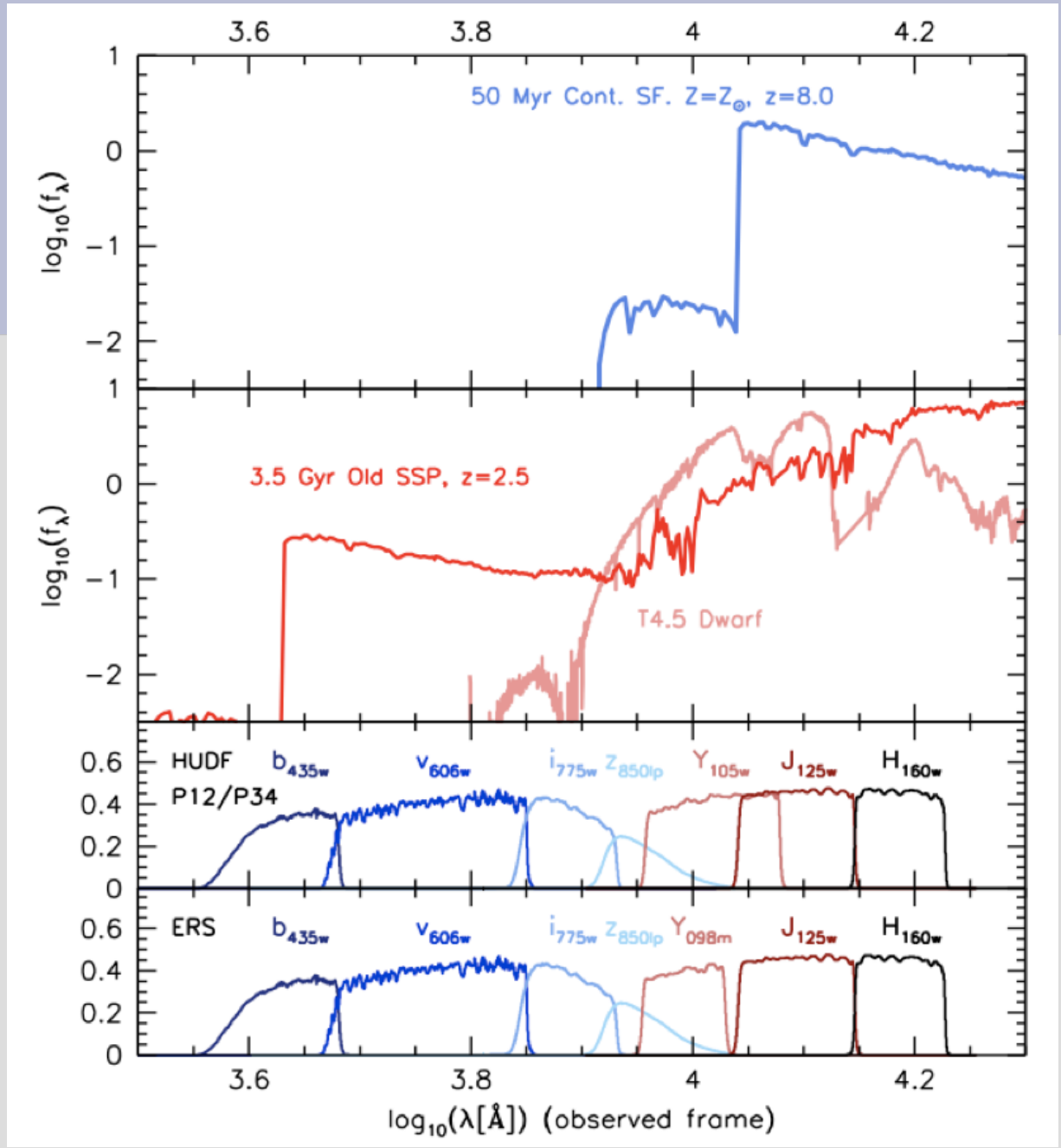
Obserwacje “pierwszych dużych” galaktyk



Nowa (>2009) kamera WFC3/IR teleskopu Hubble'a pozwala szybko wyszukiwać *Lyman-break galaxies*, wśród nich też te o z>6. Ocena mocy źródeł UV zyskuje realne podstawy

Robertson, B. E., Ellis, R. S., Dunlop, J. S., McLure, R. J. and Stark, D. P., *Nature* **468,** 55 (2010)

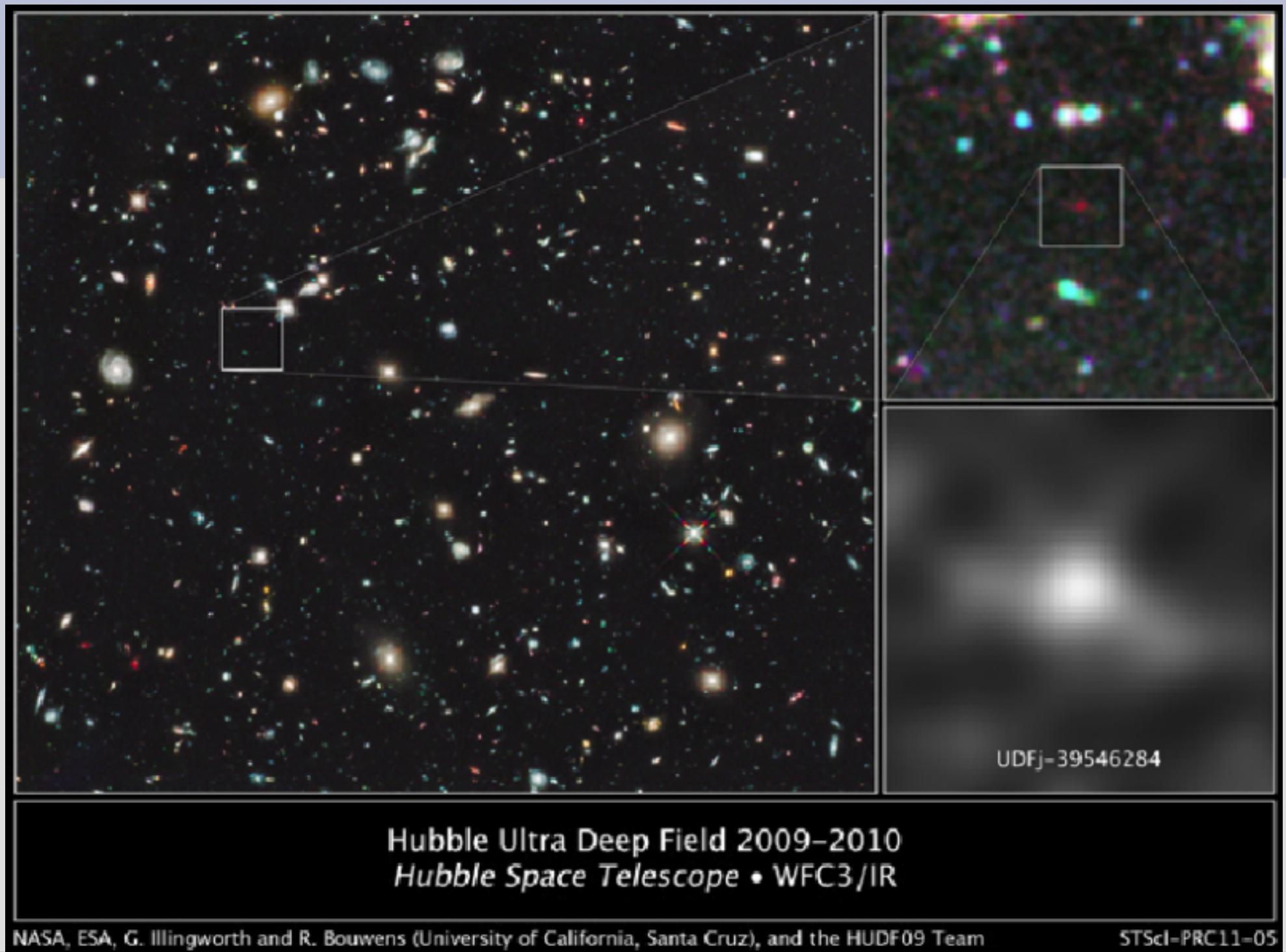
Metoda “Lyman break”



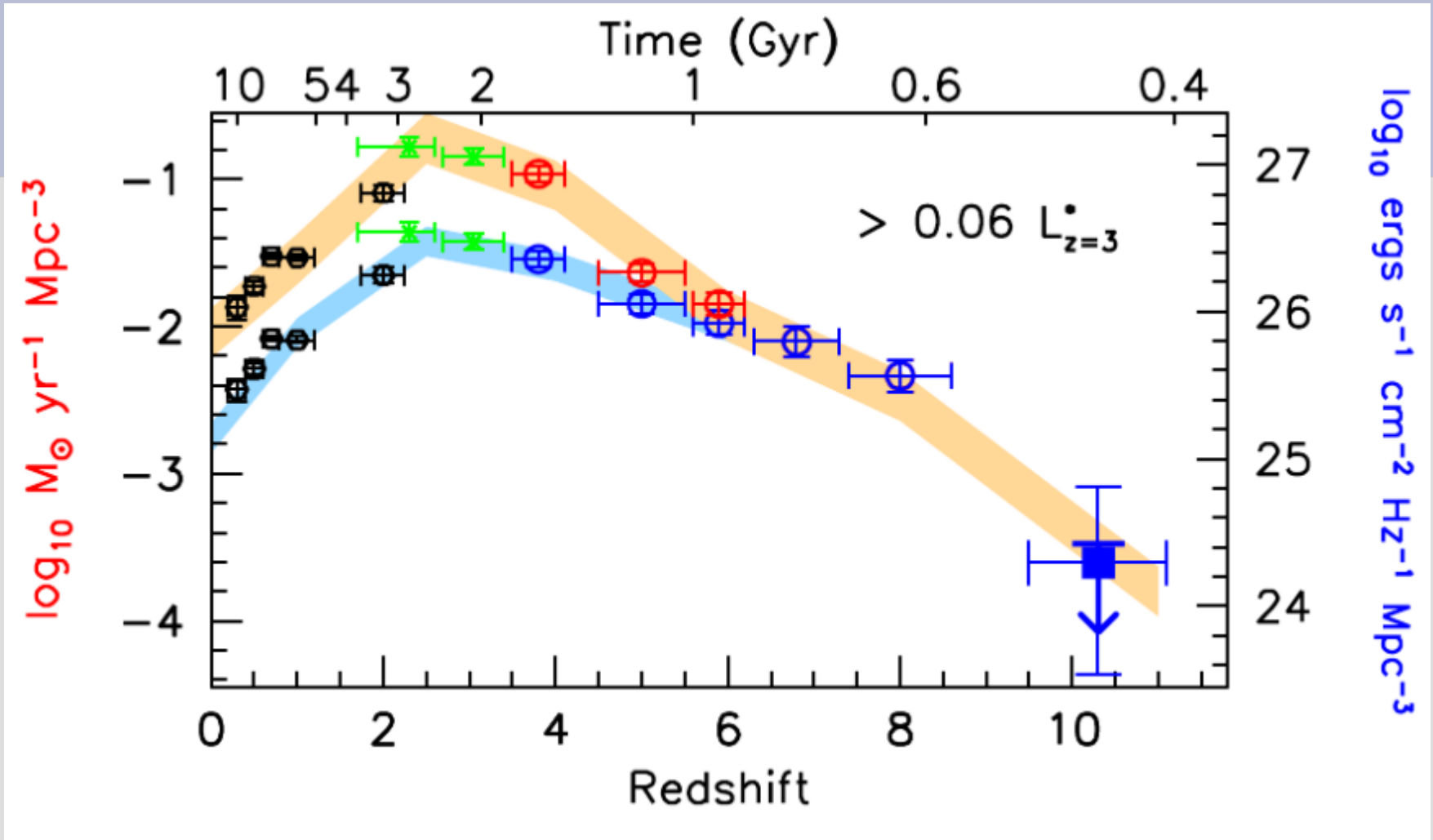
Filtry HUDF i przykładowe widma obiektów o z=8, z=2.5

[Lorenzoni et al. (2011) MNRAS, 414,1455]

Najdalsza galaktyka (z~10)



Najdalsza galaktyka (z~10)

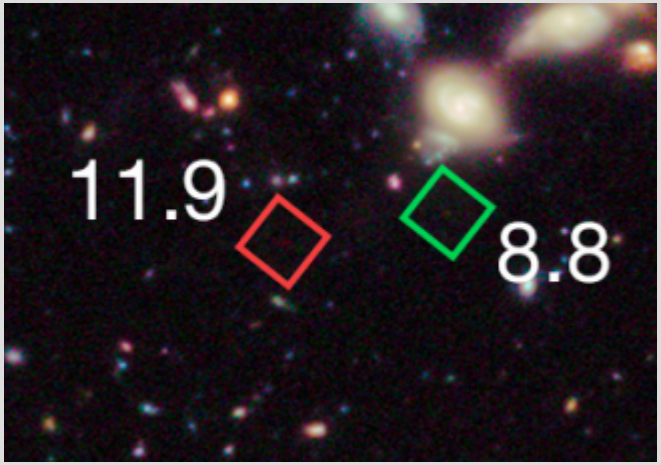


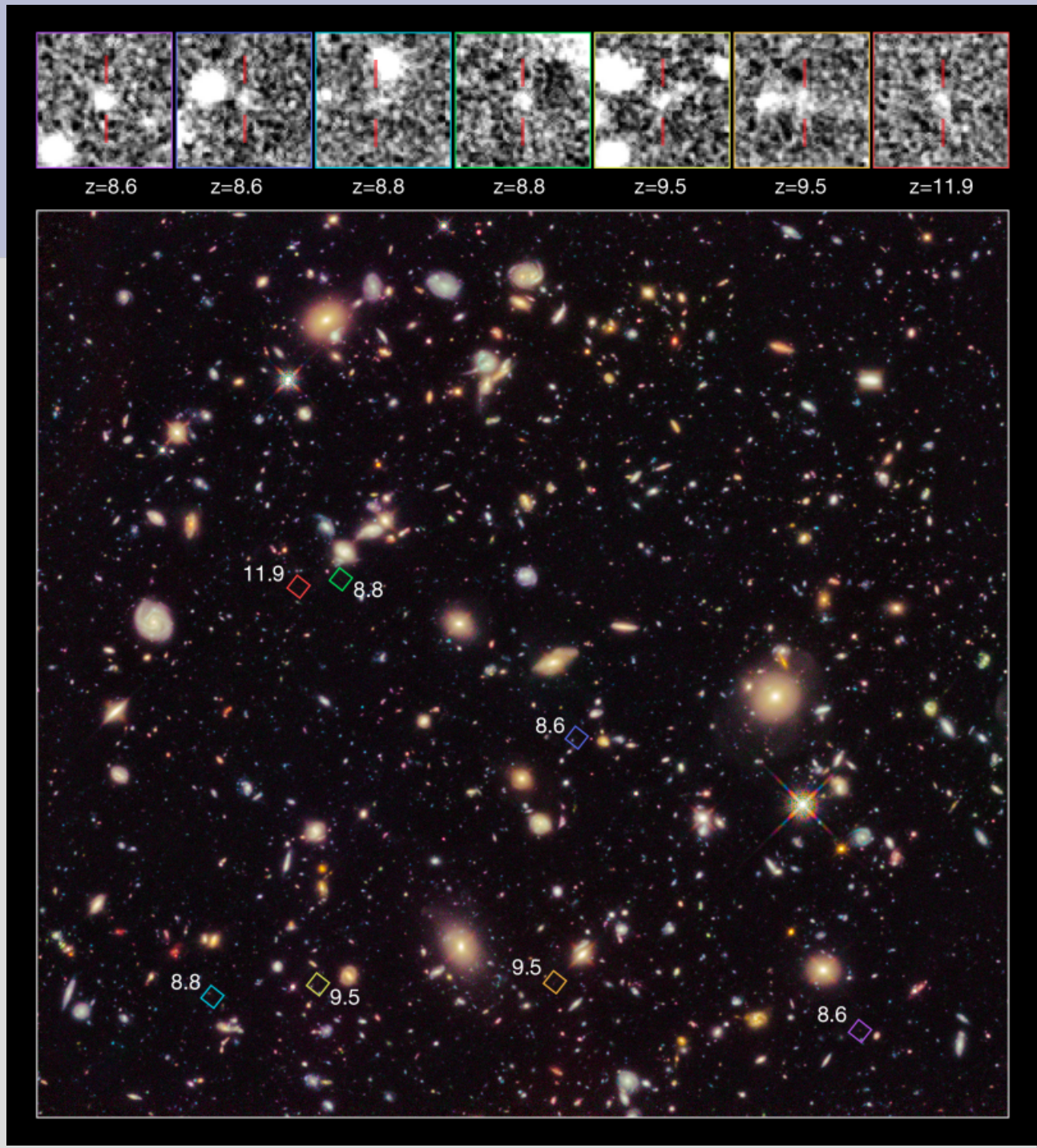
[Bouwens i in. (2011) Nature, 469, 504]

1 tylko galaktyka o z~10 wykryta w HUDF pozwala ocenić/ograniczyć tempo powstawania gwiazd w ~480 mln lat po WW. Jest ono ~10 razy mniejsze niż przy z~8, ~200 mln lat później.

HUDF 2012

(128 orbit HST, najgłębszy jak dotąd)





HUDF kampania 2012

HUDF 2012

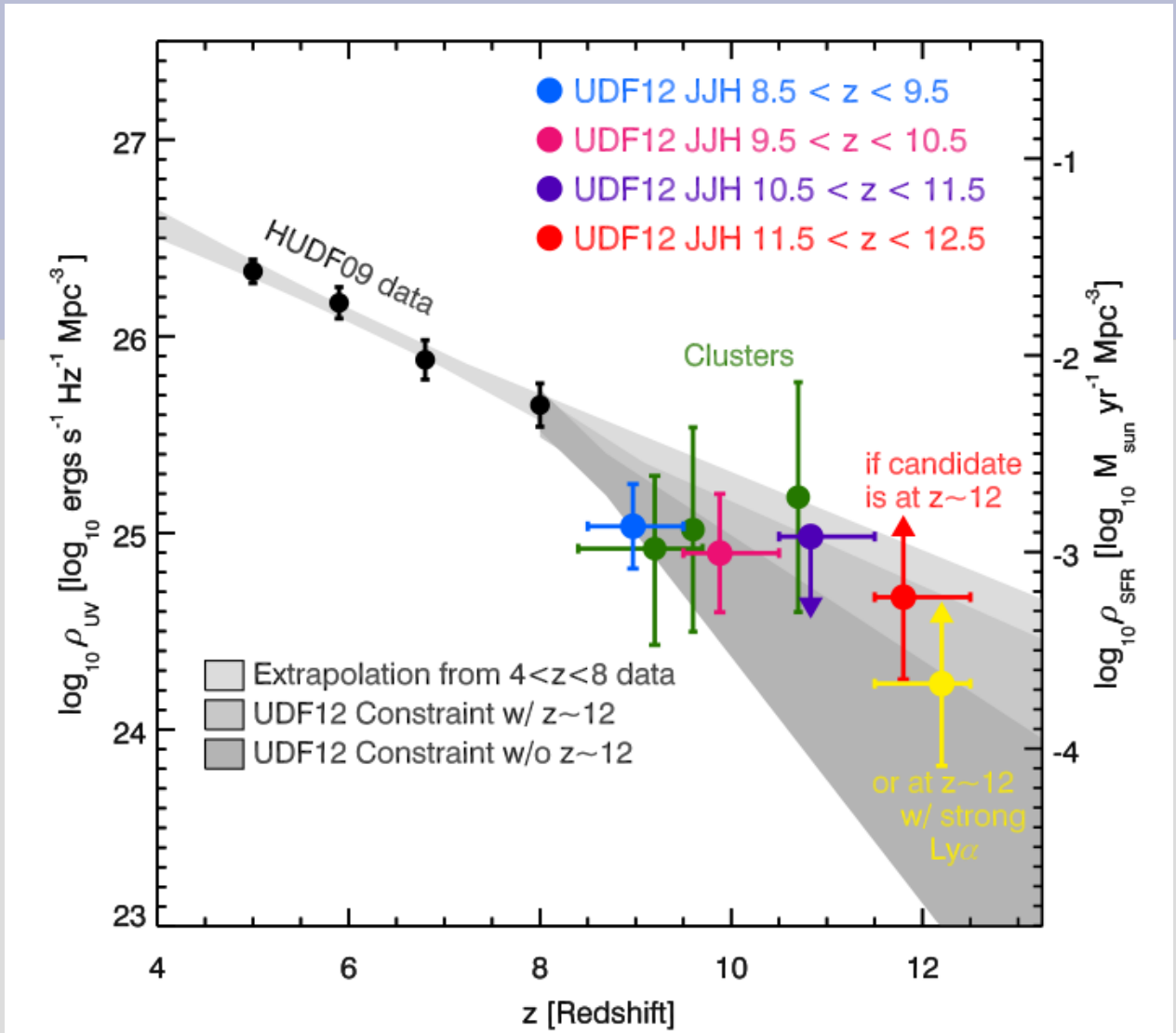


Figure 4. Luminosity and star formation rate (SFR) density vs. redshift inferred from UDF12. Reddening corrected luminosity densities are shown

[Ellis et al. (2013) ApJ, 736, L7]

HUDF kampania 2012; SFR dla 8.5<z<12. Dla z=10 ocena jest ~4 razy wyższa niż 2 lata wcześniej. Obiekt przy z=12 niepewny.

Obserwacje gal: UDFj-39546284

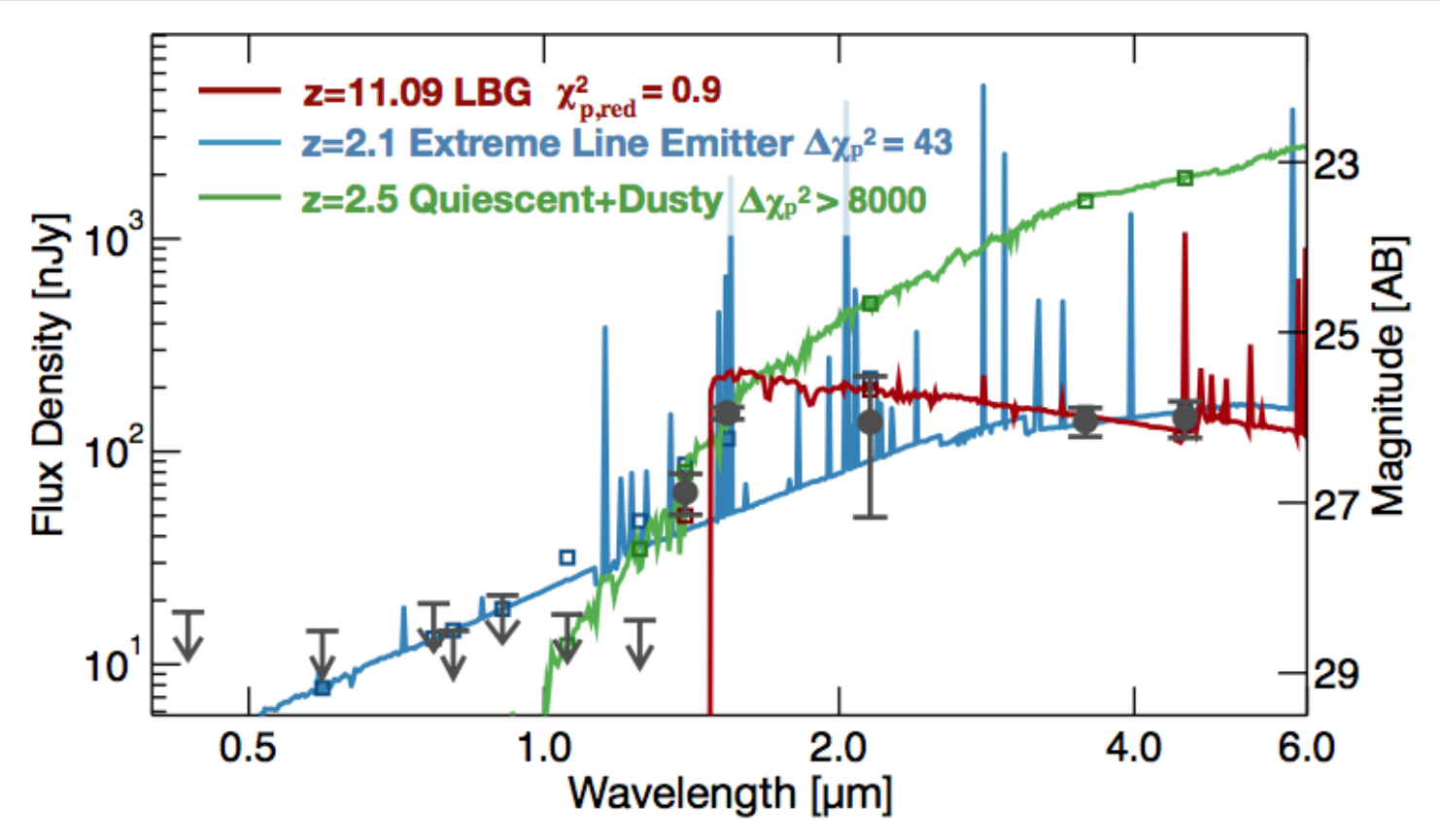
Poszukiwanie obiektów o bardzo dużym przesunięciu ku czerwieni opiera się na technice “lyman break” (“dropout”). Skok Lymana (nizszy strumien promieniowania dla \lambda<1216A w porownaniu z \lambda >1216A) powszechny w widmach powoduje, ze obserwując obiekty w wielu filtrach (trzeba porownac obserwacje przy \lambda<1216*(1+z) i \lambda >1216*(1+z)) można typowac fotometryczne przesunuięcie ku czerwieni. (Coraz skuteczniejsze!) Dla potwierdzenia potrzebne obserwacje widma!

- W 2010 przypisywano obiektowi UDFj-39546284 z~10; sugerowało to znaczące obniżenie SFR przy z=10 w stosunku do z-8
- Po kampanii HUDF 2012 pojawiła się hipoteza z~12, z przeciwną implikacją
- Obserwacje spektroskopowe (Keck; [Capak et al. 2013 arXiv:1307.4089]) nie potwierdzają wysokiego z. To może być 2<z<3.5, ale trzeba jeszcze obserwować! (Inne obiekty 7<z<10 też budzą wątpliwości spektrometrystów z Keck Observatory)
- GN-z11 to przesanka za wysokim SFR wcześnie
- **Oceny UV oparte na obserwacjach gal z>8 niepewne**

DRAFT VERSION MARCH 3, 2016
Preprint typeset using LaTeX style emulateapj v. 5/2/11

A REMARKABLY LUMINOUS GALAXY AT Z = 11.1 MEASURED WITH HUBBLE SPACE TELESCOPE GRISM SPECTROSCOPY

P. A. OESCH[1,2], G. BRAMMER[3], P. G. VAN DOKKUM[1,2], G. D. ILLINGWORTH[4], R. J. BOUWENS[5], I. LABBÉ[5], M. FRANX[5], I. MOMCHEVA[2,3], M. L. N. ASHBY[6], G. G. FAZIO[6], V. GONZALEZ[7,8], B. HOLDEN[4], D. MAGEE[4], R. E. SKELTON[9], R. SMIT[10], L. R. SPITLER[11,12], M. TRENTI[13], S. P. WILLNER[6]

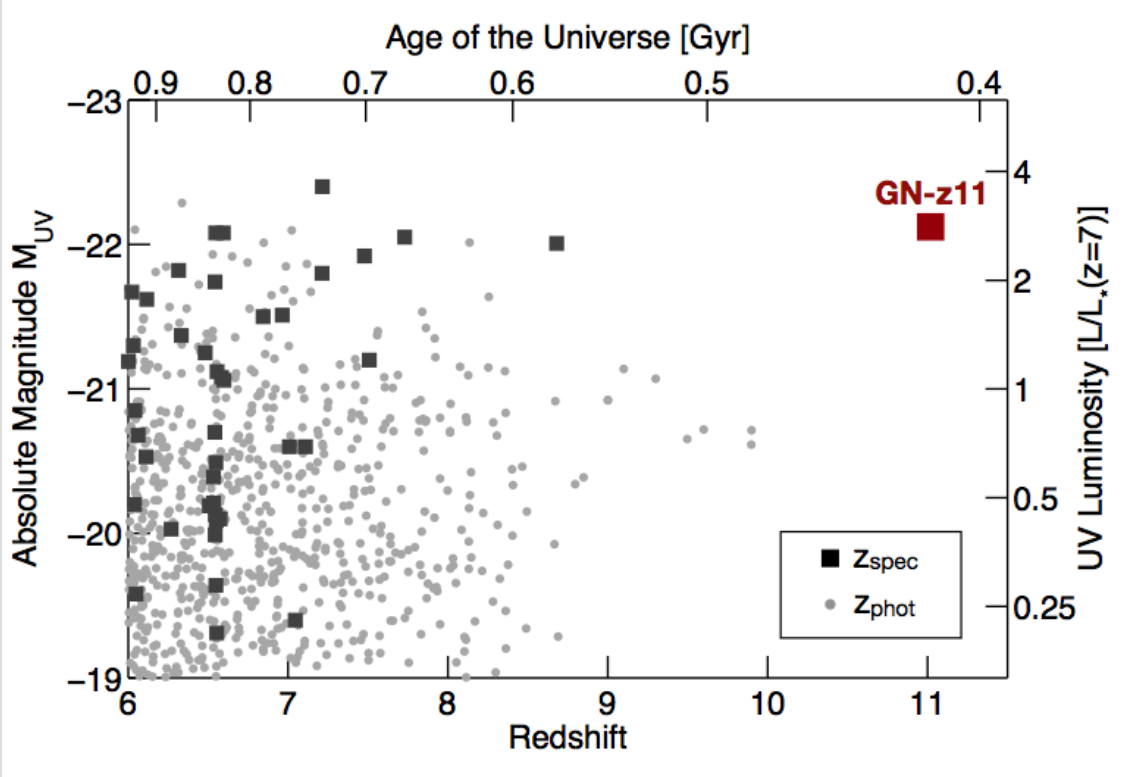


Galaktyka GN-z11 z=11.1 (grism spectroscopy, 12 orbit HST), 10^9 M_sun gwiazd, 400 mln lat od początku ewolucji

Draft version March 3, 2016
Preprint typeset using LaTeX style emulateapj v. 5/2/11

A REMARKABLY LUMINOUS GALAXY AT Z = 11.1 MEASURED WITH HUBBLE SPACE TELESCOPE GRISM SPECTROSCOPY

P. A. Oesch[1,2], G. Brammer[3], P. G. van Dokkum[1,2], G. D. Illingworth[4], R. J. Bouwens[5], I. Labbé[5], M. Franx[5], I. Momcheva[2,3], M. L. N. Ashby[6], G. G. Fazio[6], V. Gonzalez[7,8], B. Holden[4], D. Magee[4], R. E. Skelton[9], R. Smit[10], L. R. Spitler[11,12], M. Trenti[13], S. P. Willner[6]

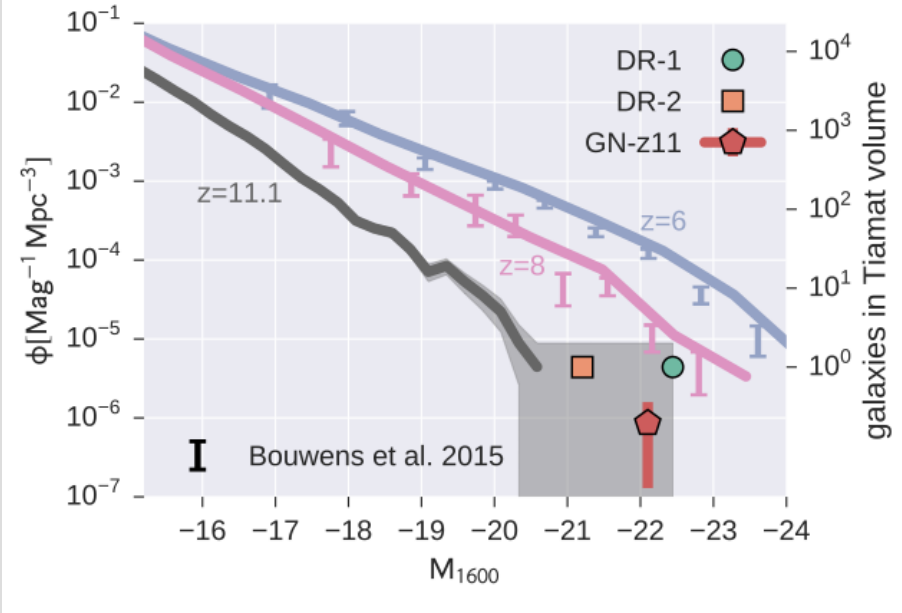


Spektroskopowo potwierdzone przesunięcia wciąż nieliczne dla z>8

MNRAS 000, 1–8 (2016) Preprint 27 May 2016 Compiled using MNRAS LATEX style file v3.0

Dark-ages reionization & galaxy formation simulation VI: The origins and fate of the highest known redshift galaxy

Simon J. Mutch,[1]⋆ Chuanwu Liu,[1] Gregory B. Poole,[1] Paul M. Geil,[1]
Alan R. Duffy,[2,1] Michele Trenti,[1] Pascal A. Oesch,[3] Garth D. Illingworth[4]
Andrei Mesinger,[5] J. Stuart B. Wyithe,[1]

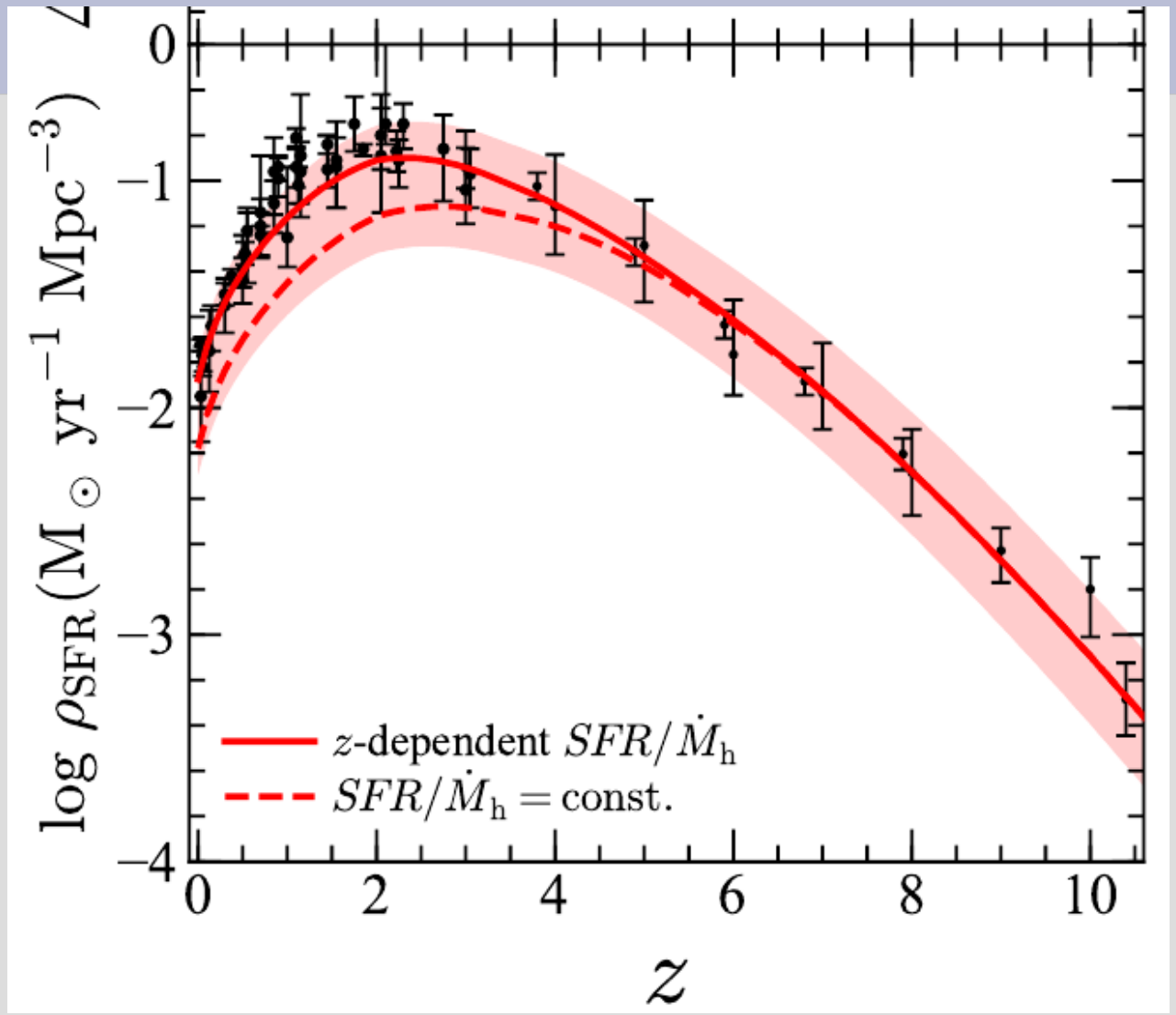


Symulacja zgodna z obserwacjami przy z=6, z=8 pozwala spekulować na temat rozkładu jasności galaktyk przy z=11 oraz ich wcześniejszej ewolucji... (Ale: tylko 1 obiekt obserwowany dla porównania)

arXiv:2108.01090v3

GOLDRUSH. IV. Luminosity Functions and Clustering Revealed with ~4,000,000 Galaxies at $z \sim 2-7$: Galaxy-AGN Transition, Star Formation Efficiency, and Implication for Evolution at $z > 10$

Yuichi Harikane[1,2], Yoshiaki Ono[1], Masami Ouchi[3,4,1,5], Chengze Liu[6], Marcin Sawicki[7,8], Takatoshi Shibuya[9],

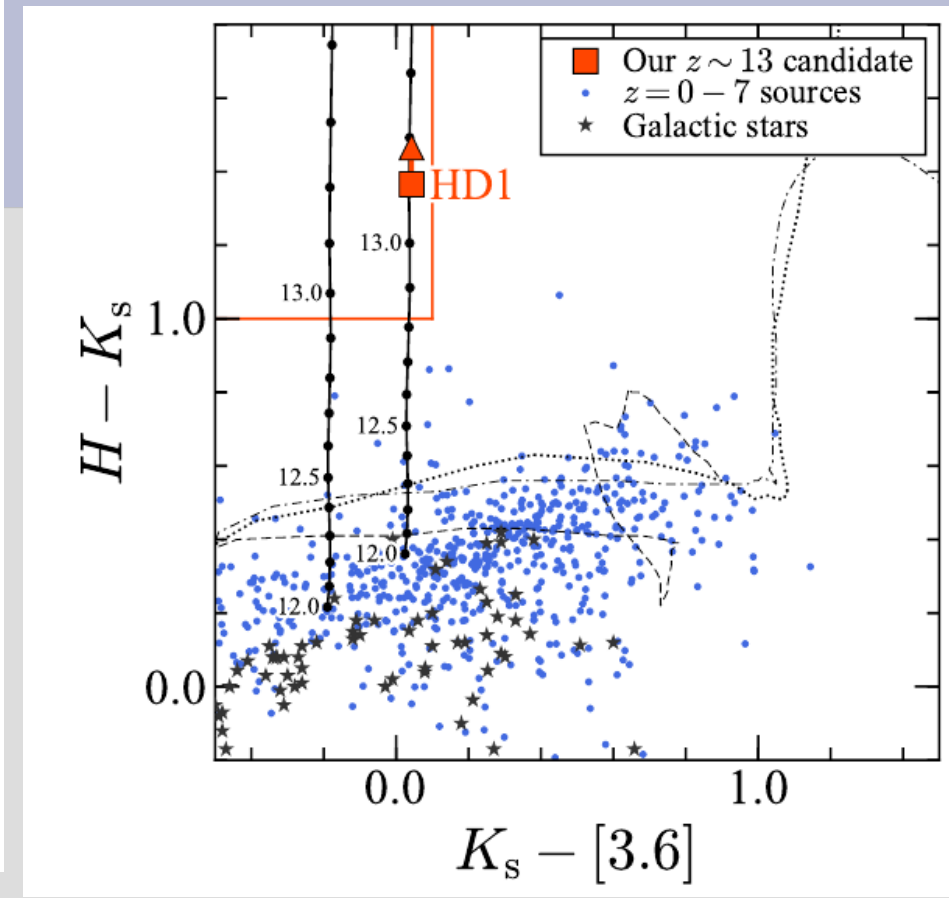


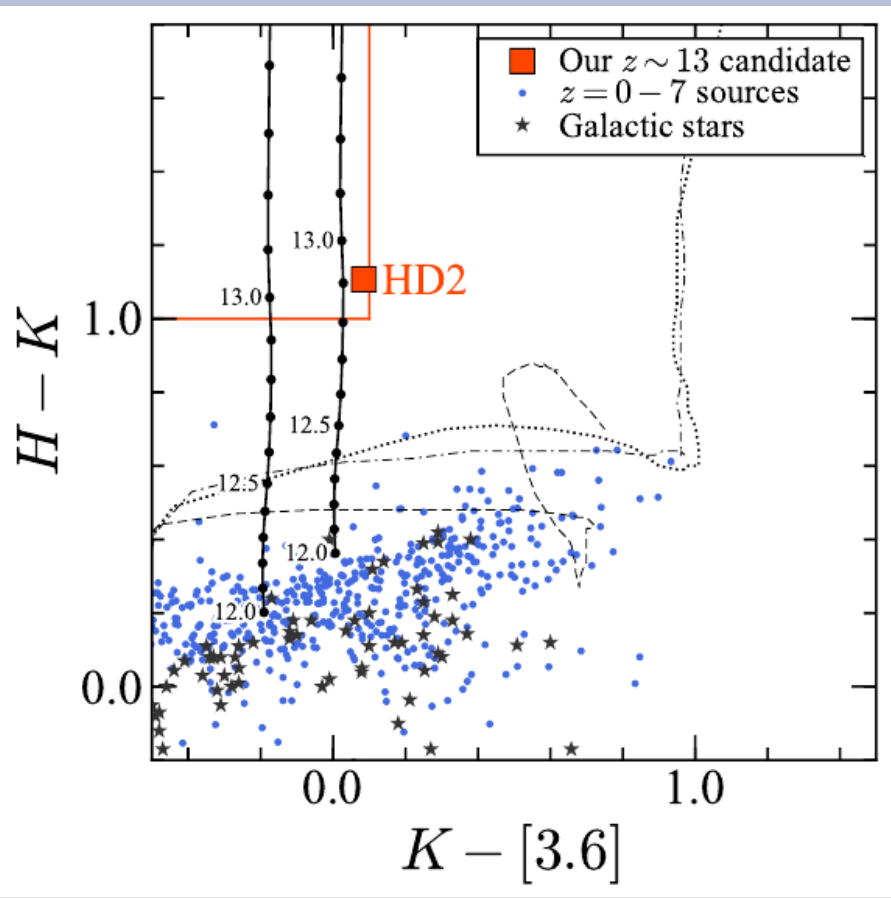
Based on observations at 2<z<7 with the extrapolation based on Madau & Dickinson (2014)

A Search for H-Dropout Lyman Break Galaxies at $z \sim 13$

Yuichi Harikane,[1,2] Akio K. Inoue,[3,4] Ken Mawatari,[5] Takuya Hashimoto,[6] Satoshi Yamanaka,[7,8,4]

arXiv:2112.09141v2



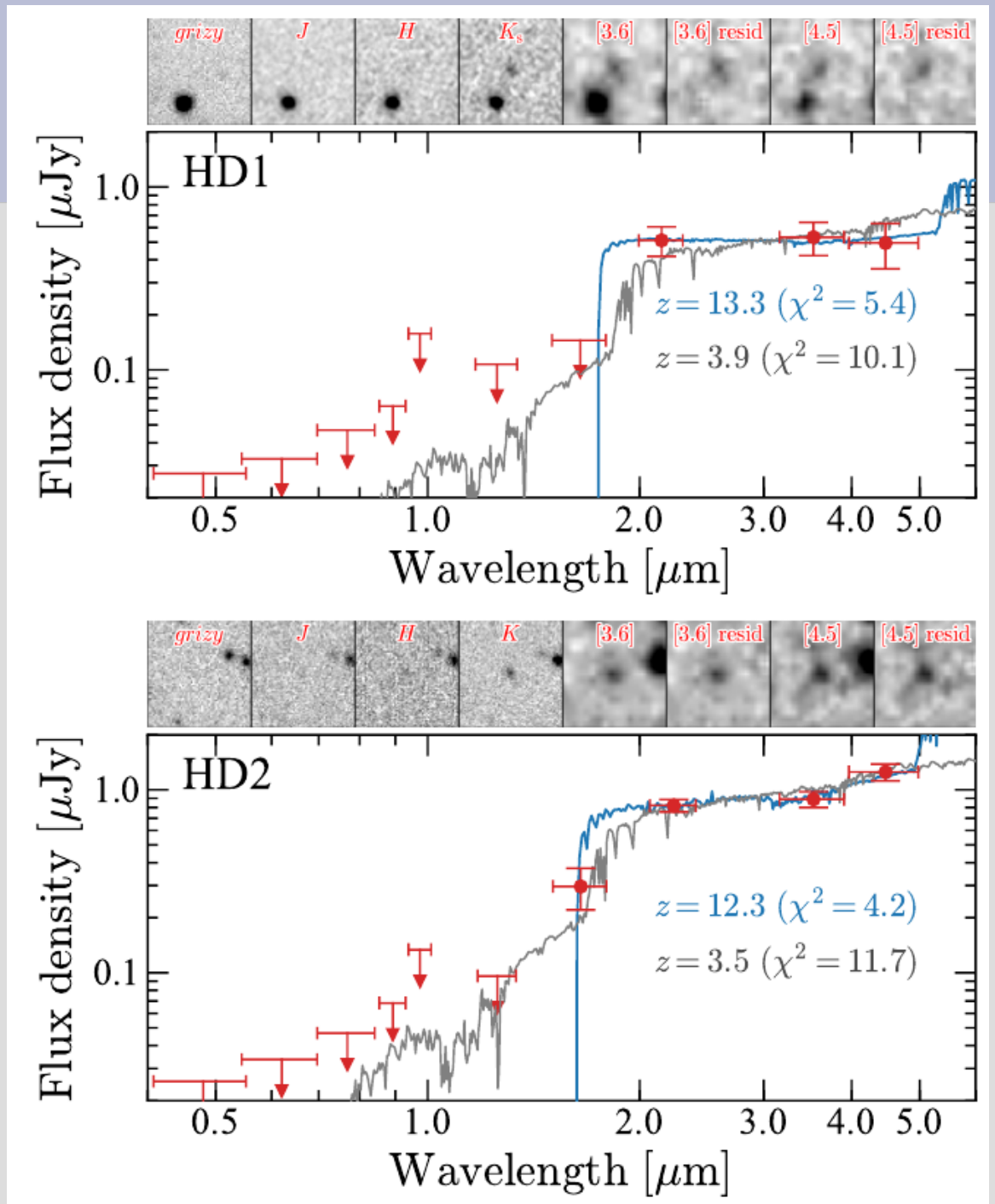


Candidate sources (starburst galaxies? AGNs?) on two color diagram.
Probably at z~13.

A Search for H-Dropout Lyman Break Galaxies at $z \sim 13$

Yuichi Harikane,[1,2] Akio K. Inoue,[3,4] Ken Mawatari,[5] Takuya Hashimoto,[6] Satoshi Yamanaka,[7,8,4]

arXiv:2112.09141v2

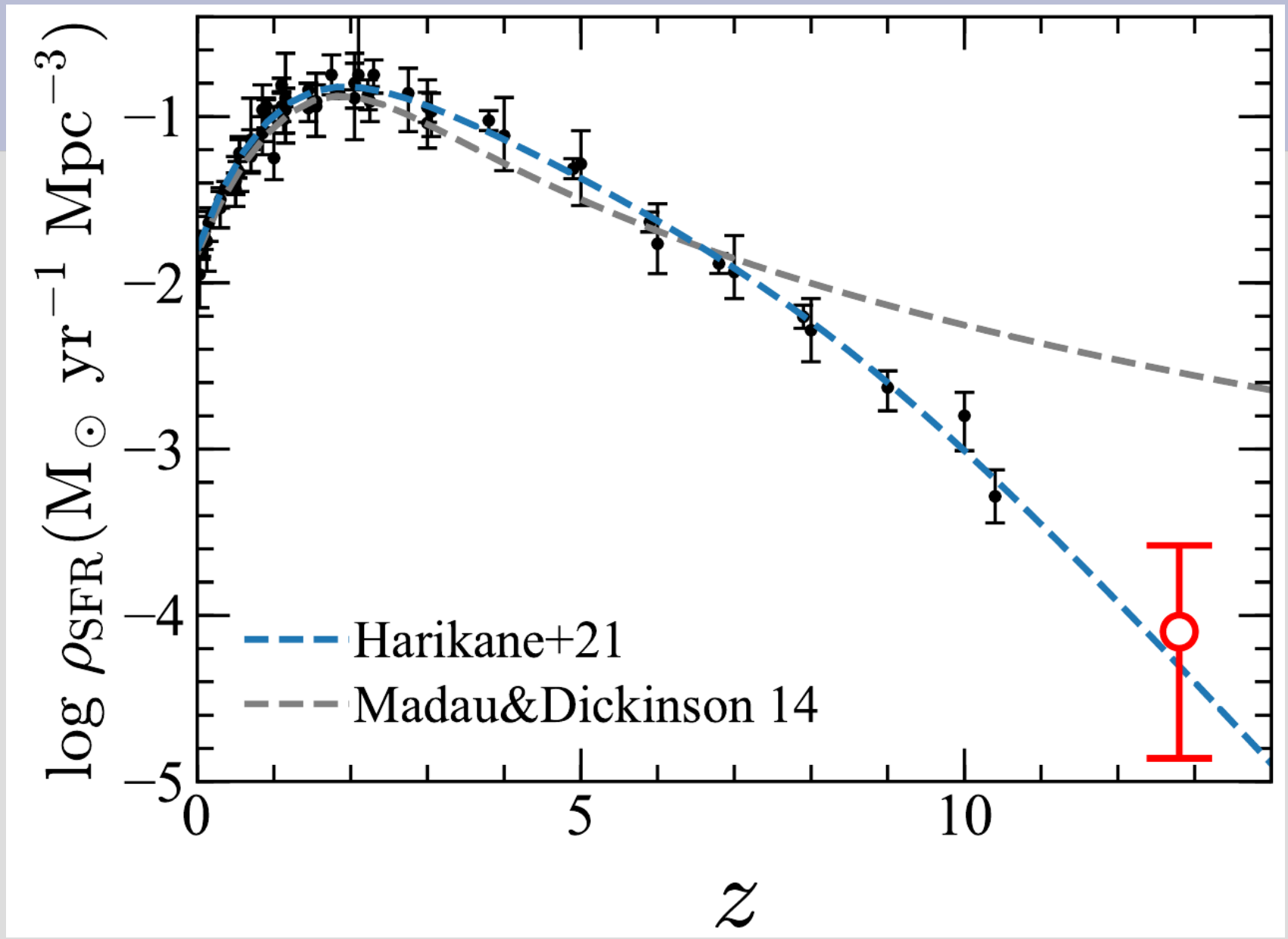


Multichannel photometry of candidate sources

A Search for H-Dropout Lyman Break Galaxies at $z \sim 13$

Yuichi Harikane,[1,2] Akio K. Inoue,[3,4] Ken Mawatari,[5] Takuya Hashimoto,[6] Satoshi Yamanaka,[7,8,4]

arXiv:2112.09141v2



Correction to Madau & Dickinson SFR based on observations of z~13 galaxies

Energy requirements

To ionize one hydrogen atom one needs 13.6 eV of energy. The fusion of hydrogen ($^1H \rightarrow ^4 He$) has the efficiency of 0.008. That may give 0.008×1 GeV $= 8$ MeV per proton. (Its rest energy is $\sim$ GeV). Thus burning of a fraction f=13.6 eV/8 MeV=1.7×10^{-6} of hydrogen gives enough energy to ionize the rest.
Approximation: we assume that converting few times f (let it be Cf for this estimate) of all baryonic matter into stars would give enough UV radiation to ionize hydrogen. (Well, low mass stars would have little influence on the process, but the high mass stars dominate the luminosity of the population and evolve fast.) In our approximation we have to check when (at what redshift) the comoving cumulative mass density of all formed stars reaches the fraction Cf of the present mean baryonic matter density.

Required star density

The present mean baryon density in the Universe is given as:

$$\rho_B = \Omega_B \rho_c = 2.7 \times 10^{11} \frac{M_\odot}{Mpc^3} \Omega_B h^2 = 6.0 \times 10^9 \frac{M_\odot}{Mpc^3}$$

where we use $\Omega_B = 0.045$ and $h = 0.7$.
The required comoving star density is $\rho_* = Cf\rho_B$. C corresponds to all effects: the fact that not all stars have burned their hydrogen, not all photons belong to UV, not all UV photons have escaped their parent galaxy, etc. For $C = 10$ one has:

$$\rho_* = 1.0 \times 10^5 \frac{M_\odot}{Mpc^3}$$

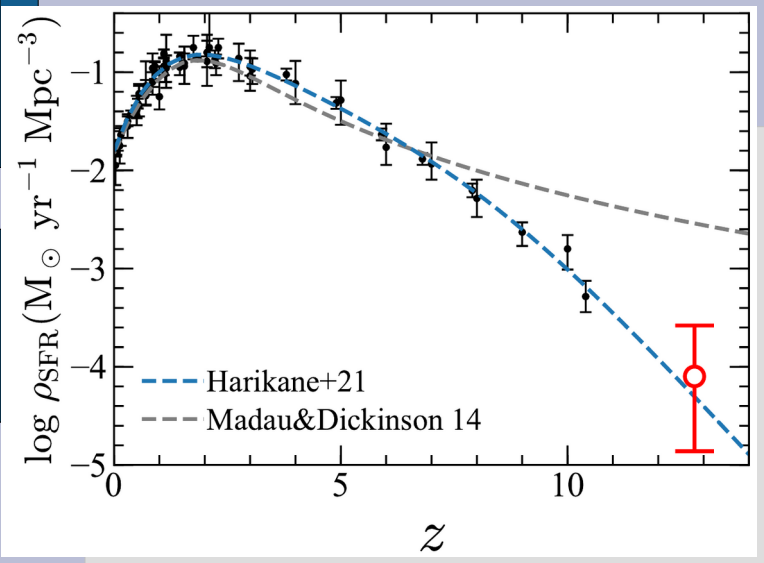
Cumulative SFR

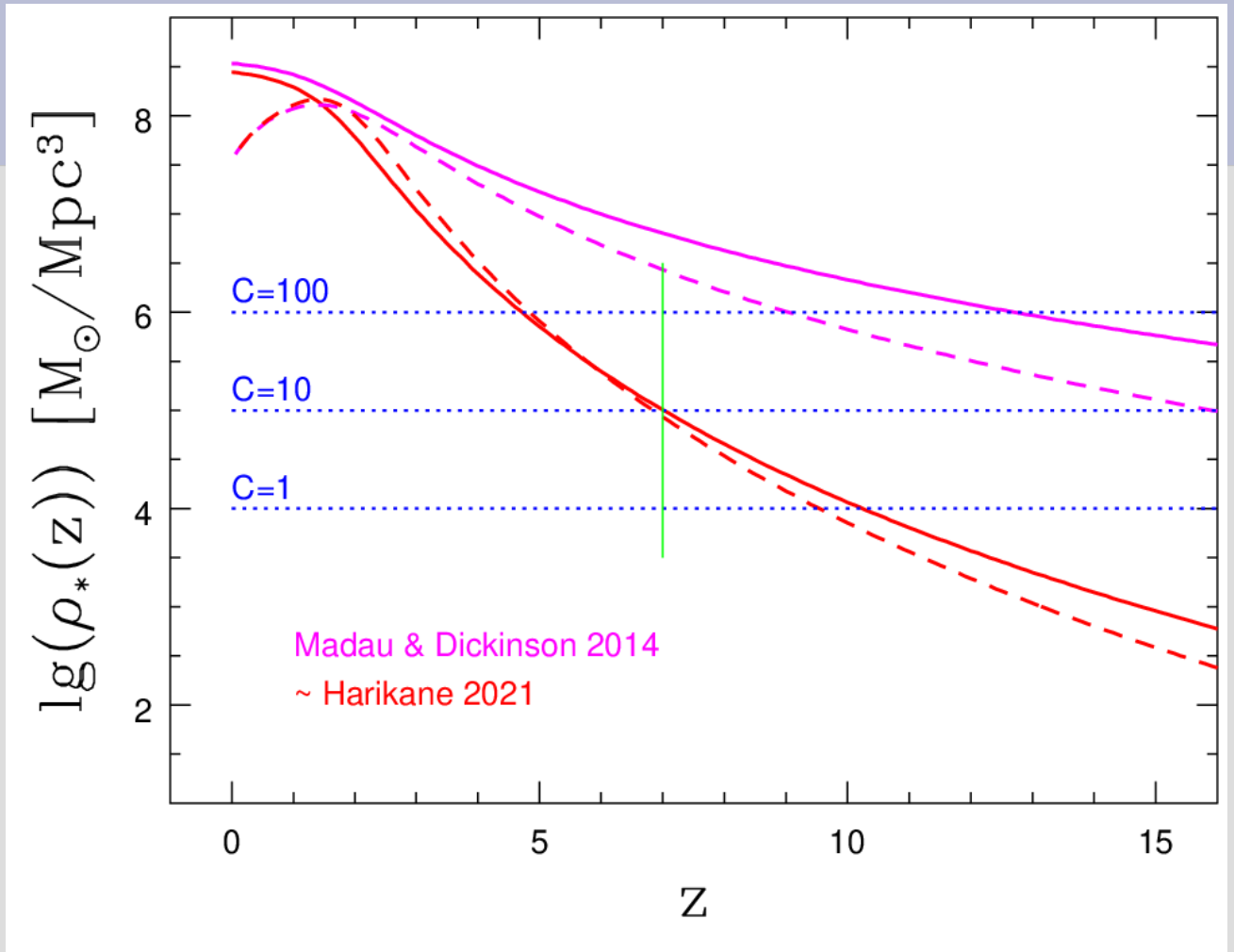
Madau & Dickinson (2014) use the following SFR:

$$SFR(z) = SFR(0) * 1.00257 * \frac{(1+z)^{2.7}}{1+((1+z)/2.9)^{5.6}}$$

To approximate the result of Harikane et al. (2021) we modify the formula replacing power index 5.6 by 9.0 in the denominator. To get the cumulative star density at epoch z, we integrate SFR with time:

$$\rho_*(z) = \int_z^\infty SFR(z)\frac{dt}{dz}dz = \int_z^\infty SFR(z)\frac{dz}{H_0(1+z)h(z)}$$





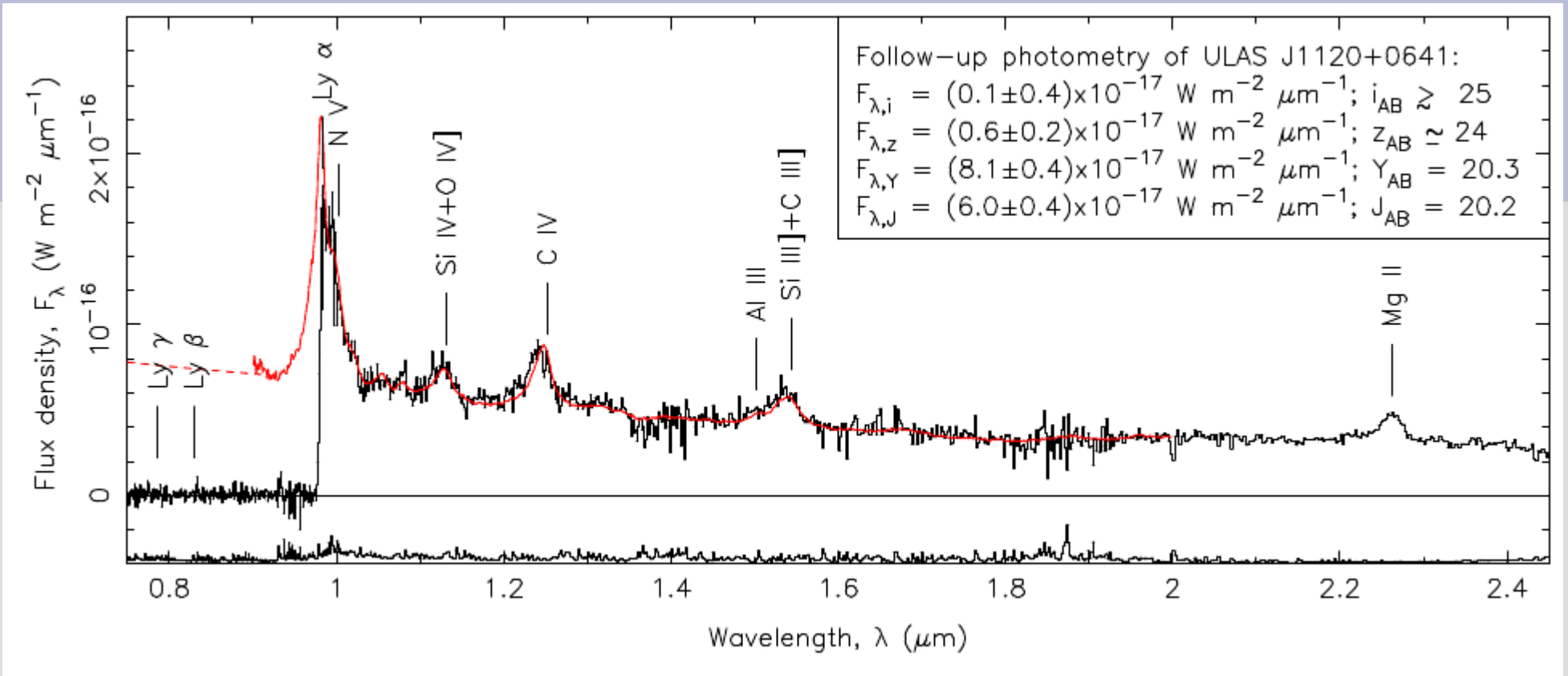
Solid lines: mean density of stars formed up to epoch z. Dashed lines: SFR in arbitrary units; at z~15 the rate based on Harikane 2021 is ~200 times lower as compared to Madau & Dickisnson 2014. Dotted lines: required star density to ionize hydrogen for few values of *C* . If *C* <=10 hydrogen can be ionized by star formation at z>7. (For Madau & Dickinson 2014 SFR that would happen much earlier.)

The role of AGNs

Supermassive black holes (BH) are present in most galaxies. They have influence on star formation, they are sources of radiation (including UV) so they may have had a role in re-ionization.

On the following slides we present some observational hints and a classic theoretical estimate of the total BH mass density, which we then compare to the density of stars.

Najdalszy QSO, z=7.08



[Mortlock i in (2011) Nature, 474, 616]

Najdalszy, jak dotąd, QSO ULAS J1120+0641, o przesunięciu z=7.08, co odpowiada t=770 mln lat. L_bol~6x10^13L_sun, M_BH~2x10^9M_sun. Przy wydajności akrecji 0.1 to odpowiada wzrostowi masy BH w tempie M~exp(t/0.04Gyr), dM/dt=50M_sun/y. Skąd wzięła się SMBH juz 770 mln po WW?
[2x10^9 ~ 10*exp(770/40)]

Ile 8<z<12 QSO zobaczy EUCLID?

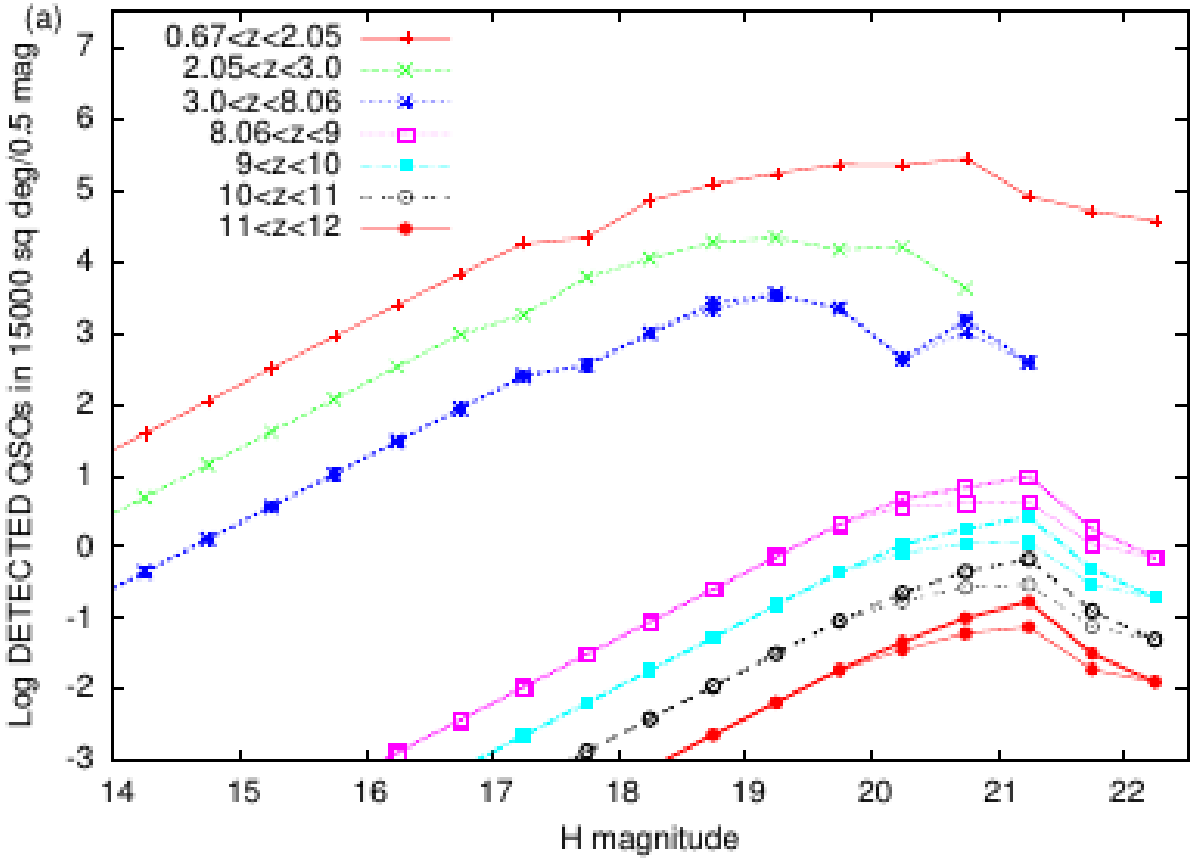


Figure 17. The number counts from the model multiplied by the simulation's detection rate (as a function of H and z), calculated excluding and (as bold lines) including refits, to predict the count of correctly identified QSOs.

[Roche et al. 2012, MNRAS, 420, 1764]

Symulacja. Sugeruje, ze nawet EUCLID (15000 st.kw.) nie wykryje QSO z>10 (spodziewana liczba <1).

Oszacowanie masy QSO
(klasyczna praca Sołtana)

Tlo promieniowania od QSO to

$$I = \int_0^\infty dz \frac{dct}{dz} R^2(z) \frac{(1+z)^3 \int_0^\infty n(L) L dL}{4\pi D^2(z)}$$

$$= \frac{c}{4\pi} \int dt \frac{\mathcal{L}}{1+z(t)}$$

$\mathcal{L}$ to moc/objetosc, $\mathcal{M}$ to masa/objetosc przy wydajnosci ϵ:

$$\int dt \mathcal{L} = \epsilon \mathcal{M} c^2 \qquad \mathcal{M} \approx \frac{4\pi}{\epsilon c^3} \langle 1+z \rangle \; I$$

Soltan otrzymal:

$$\mathcal{M} = \frac{4.7 \times 10^{12}}{\epsilon} \frac{M_\odot}{Gpc^3}$$

Ta ocena nie mówi nic o historii (moze z wyjatkiem <z>) i jest dla oceny procesow przy z>6 nieprzydatna, ale pokazuje piękno argumentu i ogranicza sumaryczna mase BH od dolu.
(Masa barionów w Gpc^3 ~10^6*epsilon razy większa od BH)

[Soltan 1982, MNRAS, 200, 115]

The role of AGNs (black holes)

Rewriting Sołtan's formula we have the present mean density of black hole mass in the Universe:

$$\rho_{BH} = \frac{4.7 \times 10^3}{\epsilon} \frac{M_\odot}{Mpc^3}$$

Assuming that in the past the mean densities of black holes and stars were evolving in proportion to each other, we may estimate their relative importance in re-ionization as:

$$\frac{\epsilon \rho_{BH}}{0.008 \rho_*} = \frac{4.7 \times 10^3}{0.008 * 3 \times 10^8} \approx 0.002$$

where 3×10^8 is the present mean density of stars in the same units. Perhaps the density of BH is underestimated, perhaps their role in the early evolution was more important, but the above estimate suggests that they were not a key cause of the ionization.

GRBs as a probe of star evolution

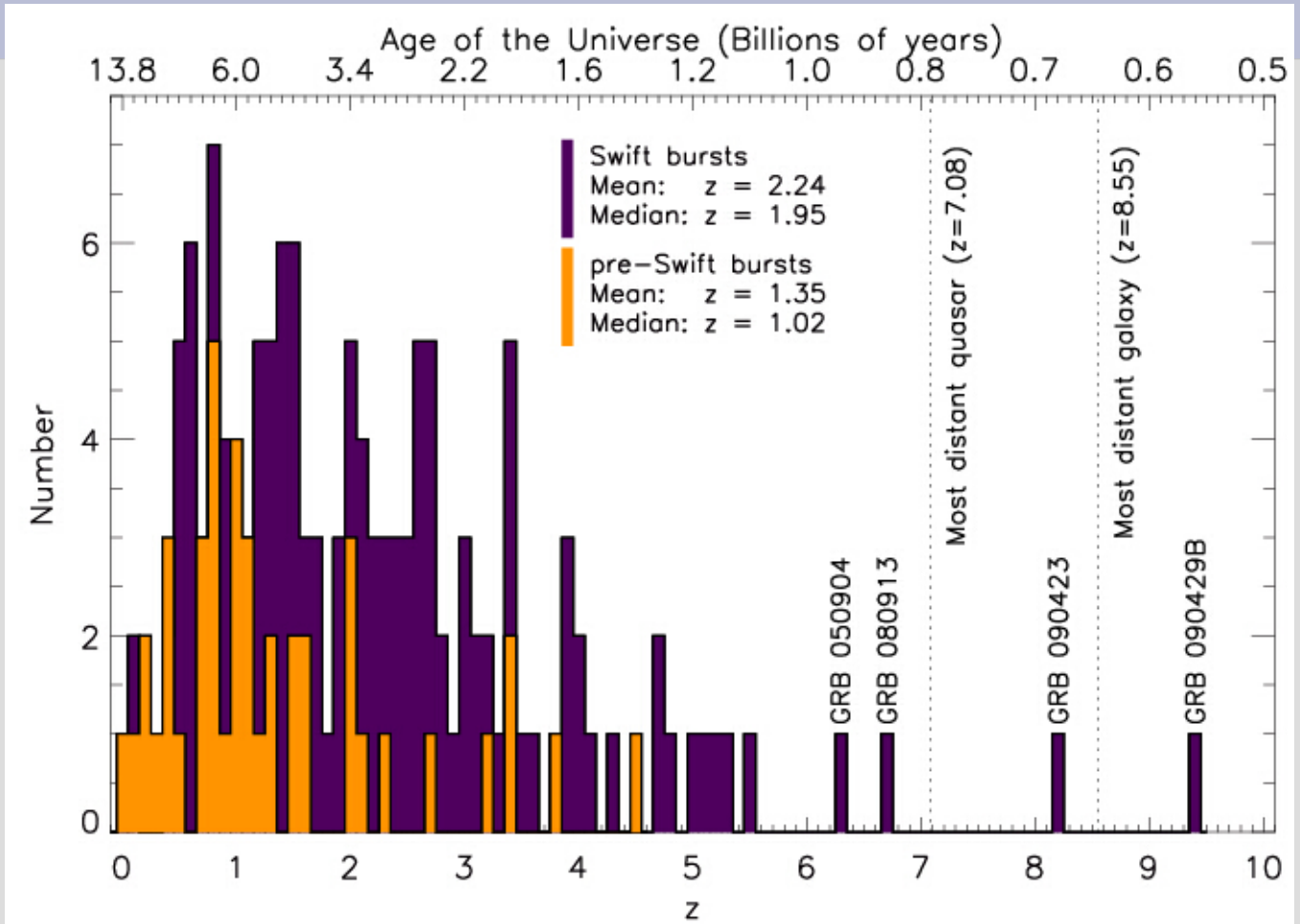
GRBs (gamma ray bursts) are observed at least to $z = 9.4$. Since they are probably related to star evolution, they may serve as its probe. The simplest hypothesis would be "GRB rate is proportional to SFR", but below more sofisticated hypothesis with the important role of low mass, low metallicity galaxies is considered.

Oszacowania GRB ← → SFR

Jak powstawały gwiazdy przy $z > 6$?

- Gwiazdy, galaktyki obserwować trudno
- GRB łatwiej
- GRB powstają wskutek ewolucji gwiazd
- GRB powstają przy małej metaliczności
- Idea: związek pomiędzy częstością GRB a tempem tworzenia gwiazd dla $z<4$, gdzie obserwacji dużo
- Przeniesienie tego związku do $z>6$
- Obserwacje najdalszych GRB miernikiem SFR
- Stąd historia tworzenia gwiazd → historia powtórnej jonizacji

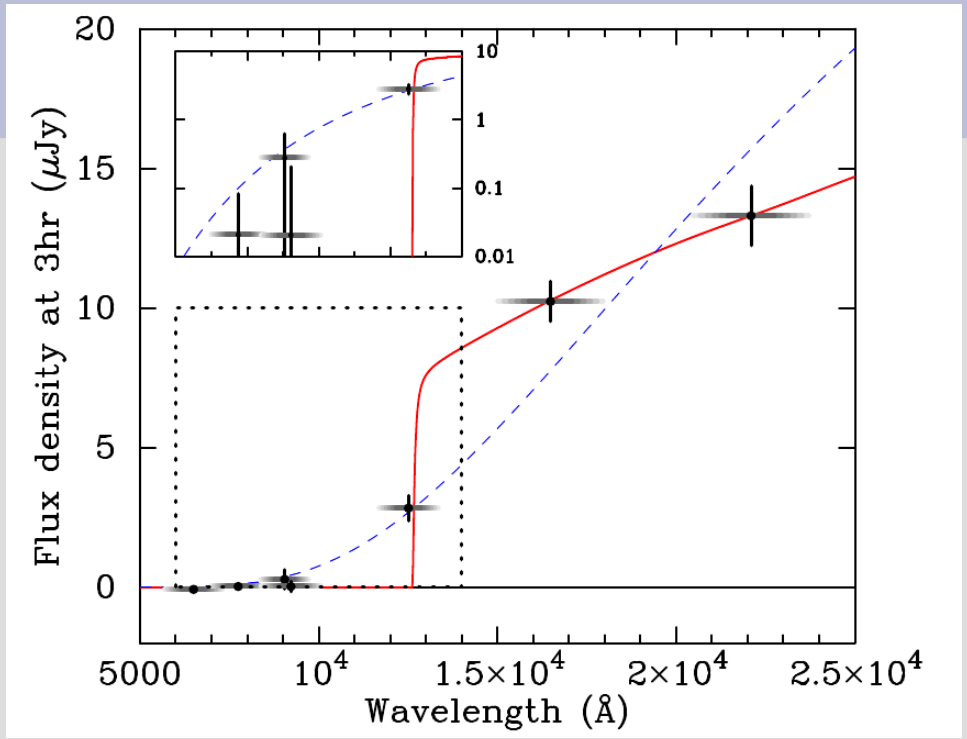
Oszacowania GRB ← → SFR

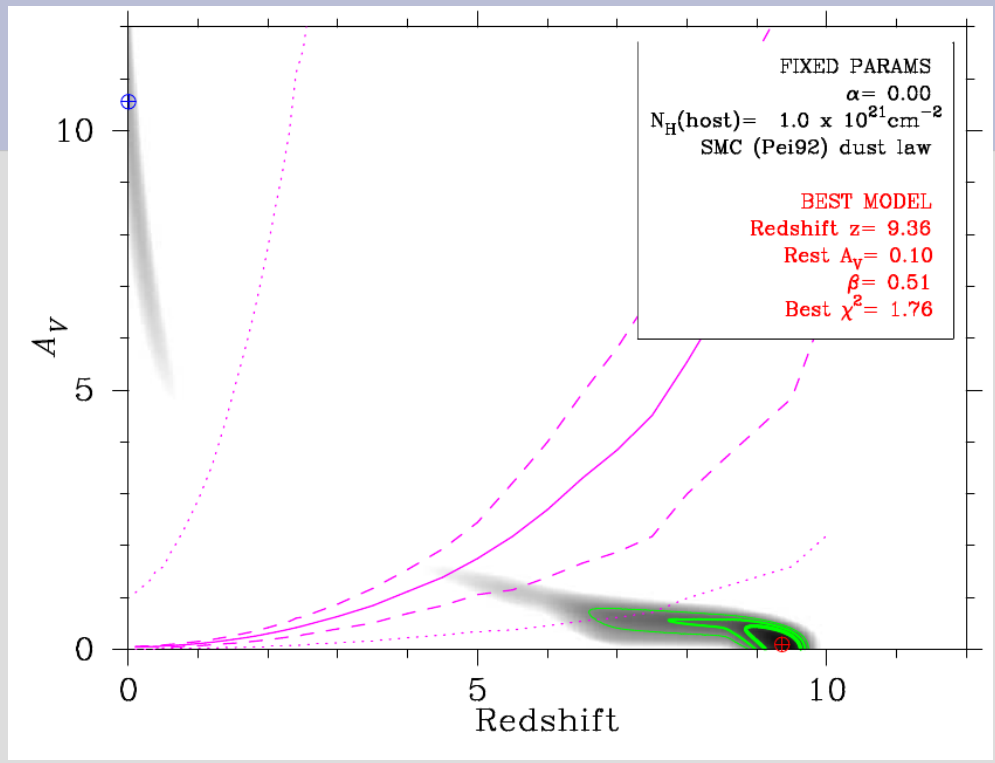


http://www.raunvis.hi.is/~pja/GRBsample.html

Rozkład przesunięć ku czerwieni dla zaobserwowanych GRB (04.XI.2011)

Najdalszy (?) GRB 090429B





Cucchiara i in. (2011) ApJ, 736, 7

GRB 090429B – prawdopodobnie najodleglejszy (z=9.4). Po lewej: redshift fotometryczny, po prawej kontury dopasowania. Z niewielkim prawdopodobieństwem to może być obiekt o mniejszym z, ale brak obserwacji galaktyki – gospodarza przez HST raczej to wyklucza.

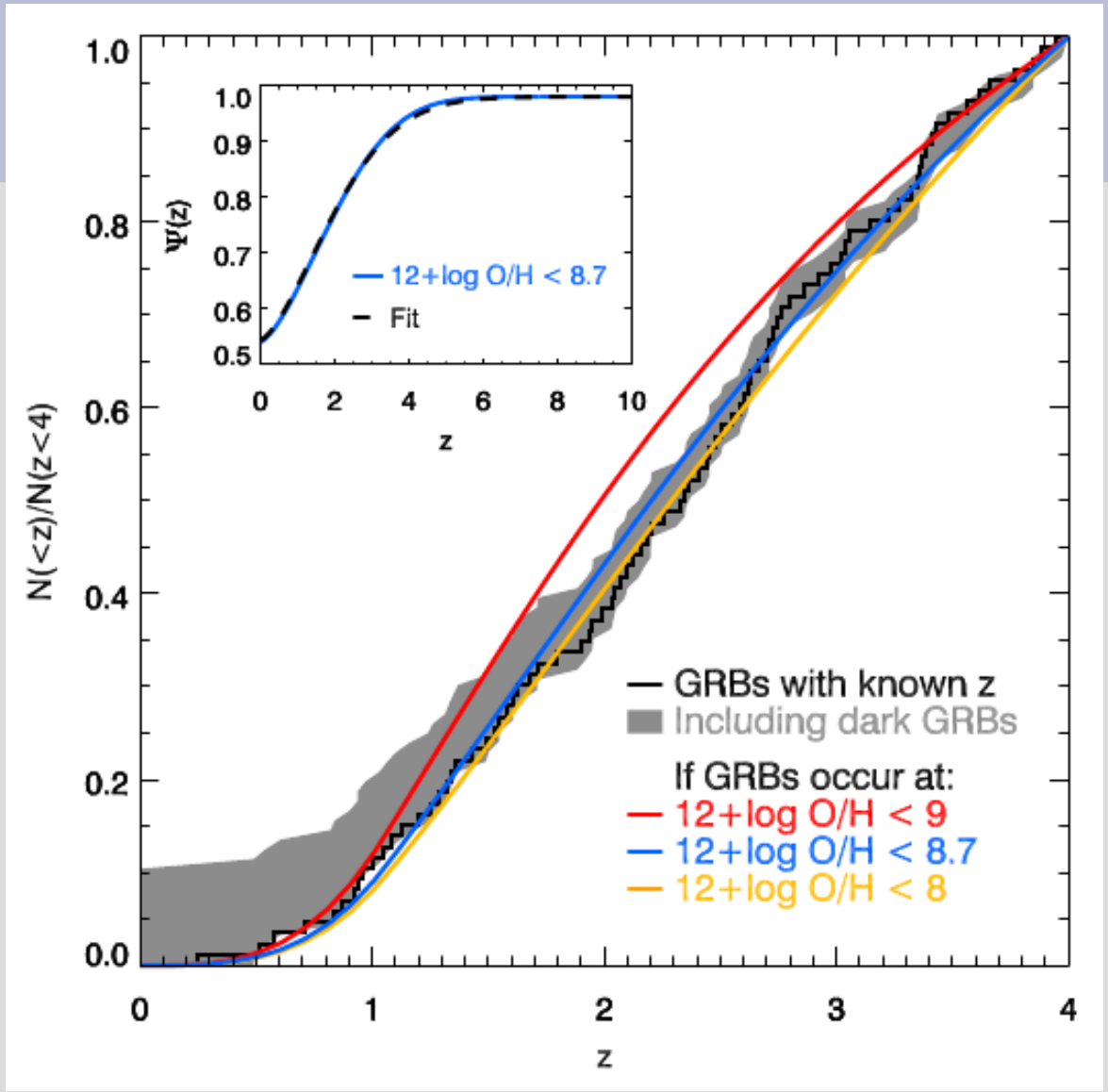
Oszacowania GRB ← → SFR

Długie błyski gamma mają związek z SN Ic o szerokich liniach. GRB są obserwowane w galaktykach, w których $12 + \log[0/H] < 8.7$. Dla wyższej metaliczności SN Ic są obserwowane ale nie poprzedzone przez GRB.
Metaliczność wiąże się z masą gwiazd w galaktyce i jest mniejsza od wymaganej dla pewnej krytycznej wartości masy. GRB nie są więc miarą SFR wszędzie, lecz tylko w galaktykach poniżej „krytycznej" masy:

$$\Psi(z) = \frac{\int_0^{M_{\rm cr}(z)} SFR(M,z)\Phi(M,z)dM}{\int_0^{\infty} SFR(M,z)\Phi(M,z)dM} \qquad (1)$$

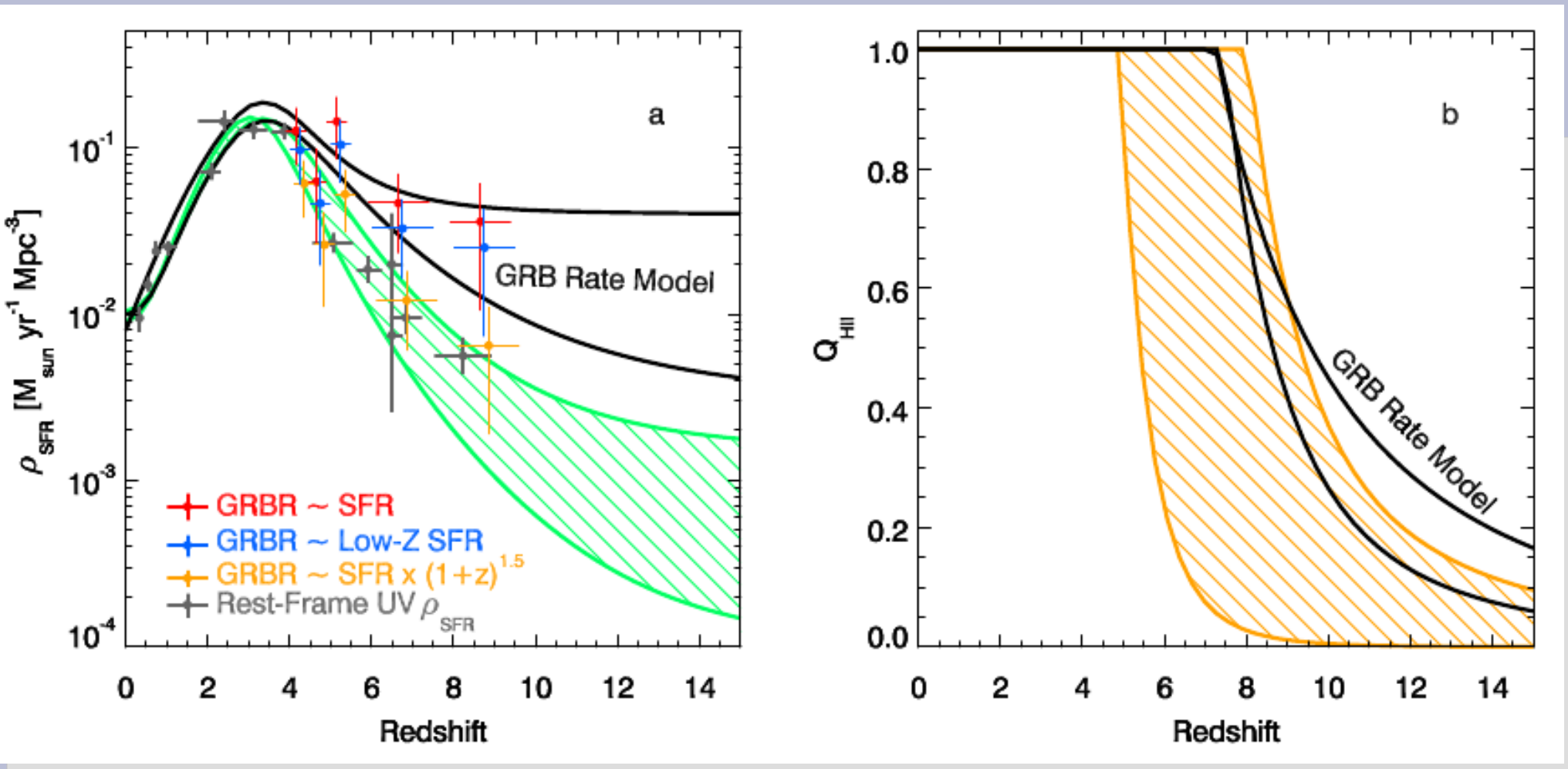
[Robertson & Ellis (2011) arXiv:1109.0990]

Oszacowania GRB ← → SFR



Kalibracja zależności \Psi(z) na podstawie zliczeń GRB przy z<4
[Robertson & Ellis (2011) arXiv:1109.0990]

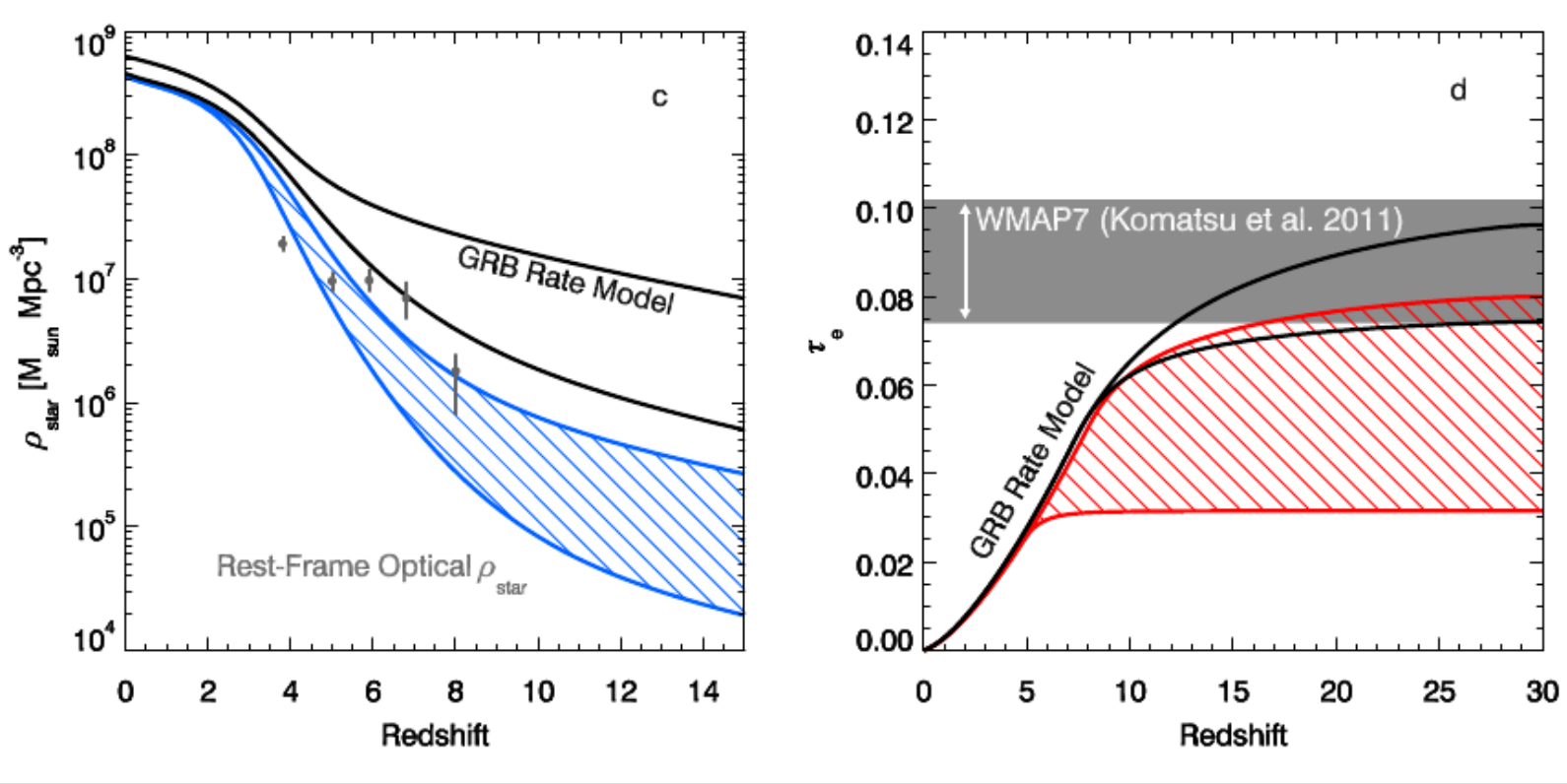
Oszacowania GRB ← → SFR



Ekstrapolacja związku GRB ← → SFR daje wyższe tempo tworzenia gwiazd przy z>4 i wcześniejszą jonizację wodoru – przed z=8.

[Robertson & Ellis (2011) arXiv:1109.0990]

Oszacowania GRB ← → SFR



Ekstrapolacja związku GRB → SFR przewiduje też większą gęstość gwiazd. Zakres przewidywanej grubości optycznej plazmy zgadza się z zakresem niepewności dopasowań WMAP.

[Robertson & Ellis (2011) arXiv:1109.0990]

The theoretical approach was aimed to “explain” *tau*~0.10 as measured then. We see that traditional approach based on the estimate of the total star luminosity works for the present *tau* “requirements”.

Obserwacje bezpośrednie - wnioski

Co jonizowało przy $z > 6$?

- Obserwacje są bardzo fragmentaryczne
- Nie zaobserwowano żadnego obiektu o z>12
- W ocenach konieczna jest ekstrapolacja
- Bardzo ważny parametr (f_esc) jest oceniany dla galaktyk o małych z i stosowany dla wczesnych obiektów
- Obserwacje SN? gal karłowatych ? tła promieniowania jonizującego? z epoki jonizacji
- → Podejście teoretyczne? Symulacje?

Cosmic Dawn (CoDa): the First Radiation-Hydrodynamics Simulation of Reionization and Galaxy Formation in the Local Universe

Pierre Ocvirk,[1] Nicolas Gillet,[1] Paul R. Shapiro,[2] Dominique Aubert,[1]

arXiv:1511.00011

Setup	
Number of nodes (GPUs)	8192 (8192)
Grid size	4096^3
Box size L_{box}	91 Mpc
Grid cells per node	128x256x256
DM particle number N_{DM}	4096^3
DM particle mass M_{DM}	3.49 x 10^5 $M_\odot$
Initial redshift z_{start}	150
End redshift z_{end}	4.23

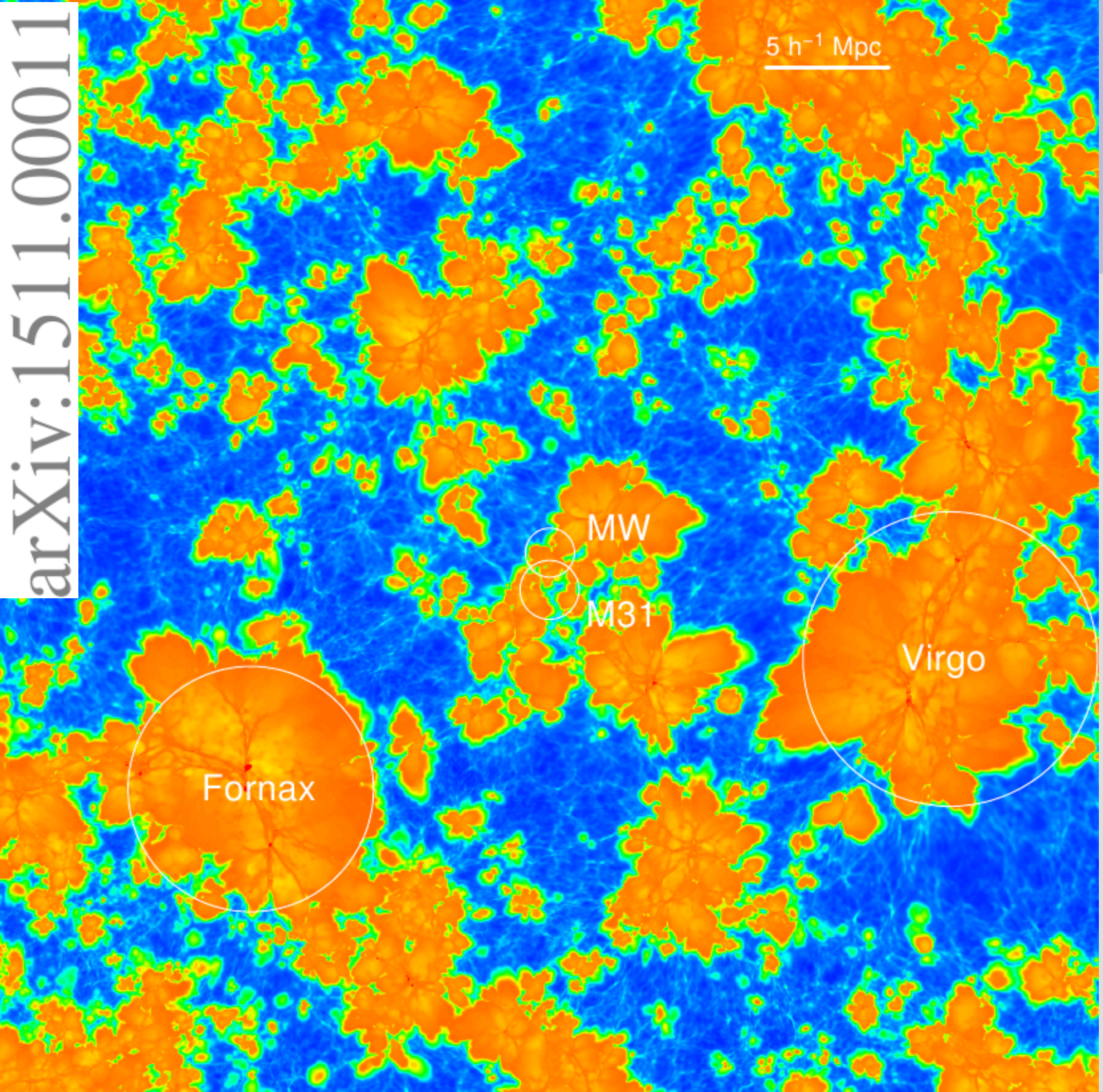
Star formation	
Density threshold $\delta_\star$	50 $\langle\rho\rangle$
Temperature threshold $T_\star$	2×10^4K
Efficiency $\epsilon_\star$	10^{-2}
Stellar particle mass (post-SN) $M_\star$	3194 $M_\odot$
Massive star lifetime $t_\star$	10 Myr

Supernova feedback	
Mass fraction η_{SN}	10%
Energy E_{SN}	10^{51} erg

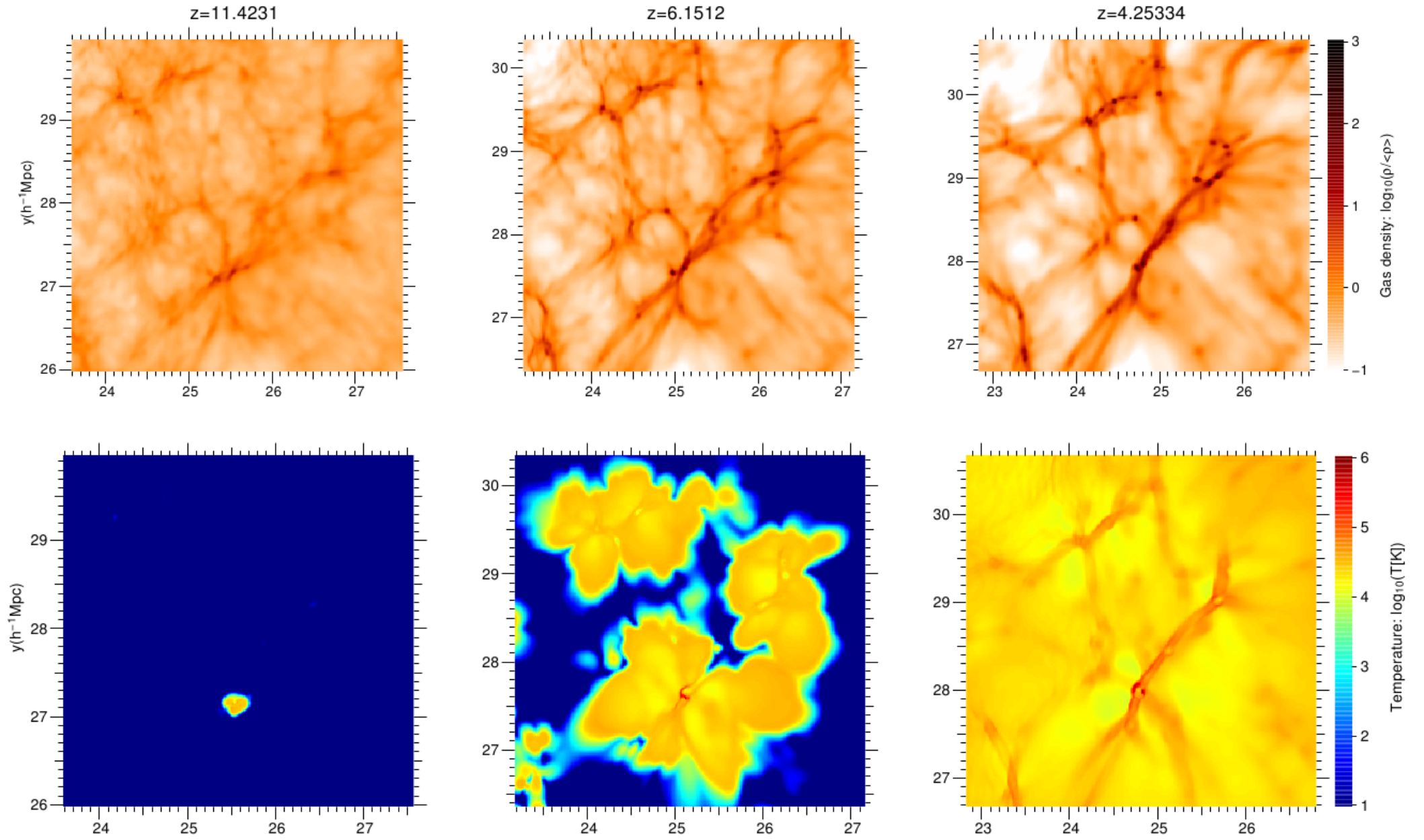
Radiation	
Stellar ionizing emissivity	1.824×10^{47} ph/s/$M_\odot$
Stellar particle escape fraction $f_{esc,\star}$	0.5
Effective photon energy	29.61 eV
Effective H cross-section σ_E	1.097 x 10^{-22}m^2
Speed of light c	299 792 458 m/s

Rachunki: 10 dni = 240h*8192nodes*30cores
138x10TB danych co 10 mln lat, 4.23<z<150
Zapamietane: 138*2048^3 (cała obj.)
+ 138*499*256^3 (wybrane obszary 4/h Mpc

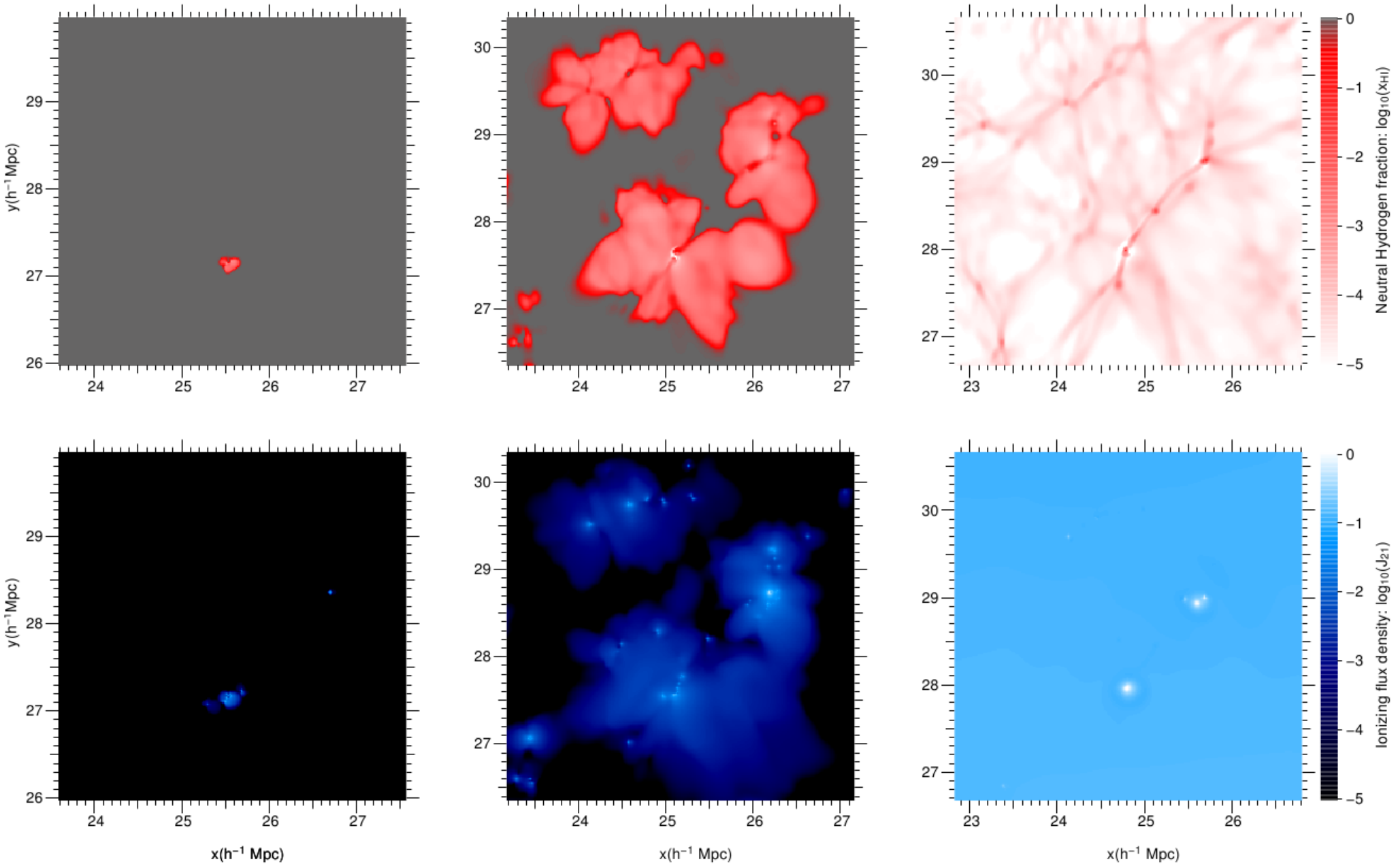
arXiv:1511.00011



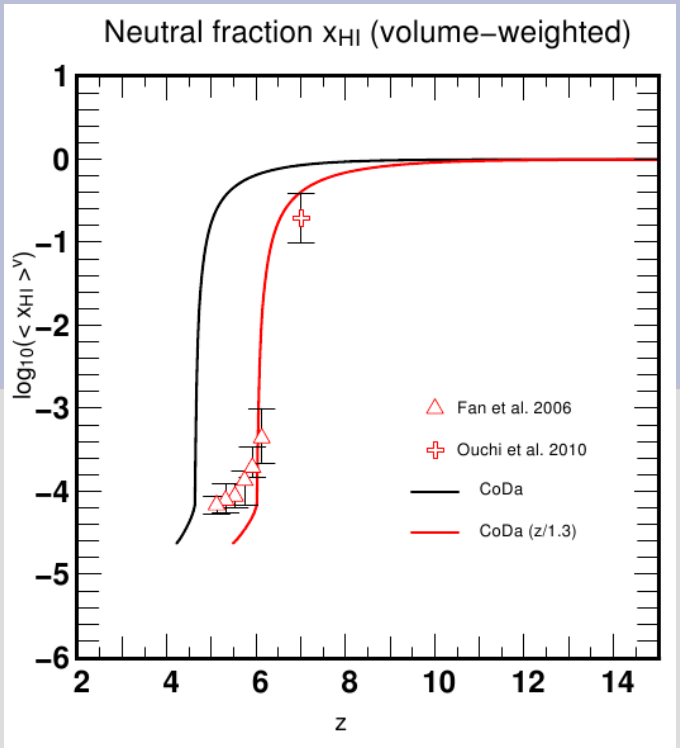
Ilustracja: rozkład temperatury w obszarze przypominającym Grupę Lokalną I jej okolice przy z=6.15

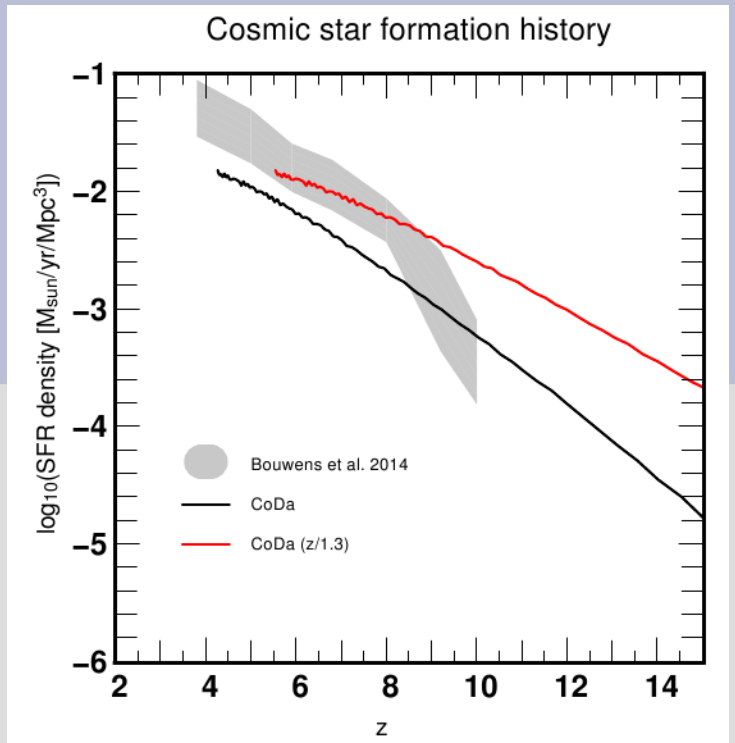


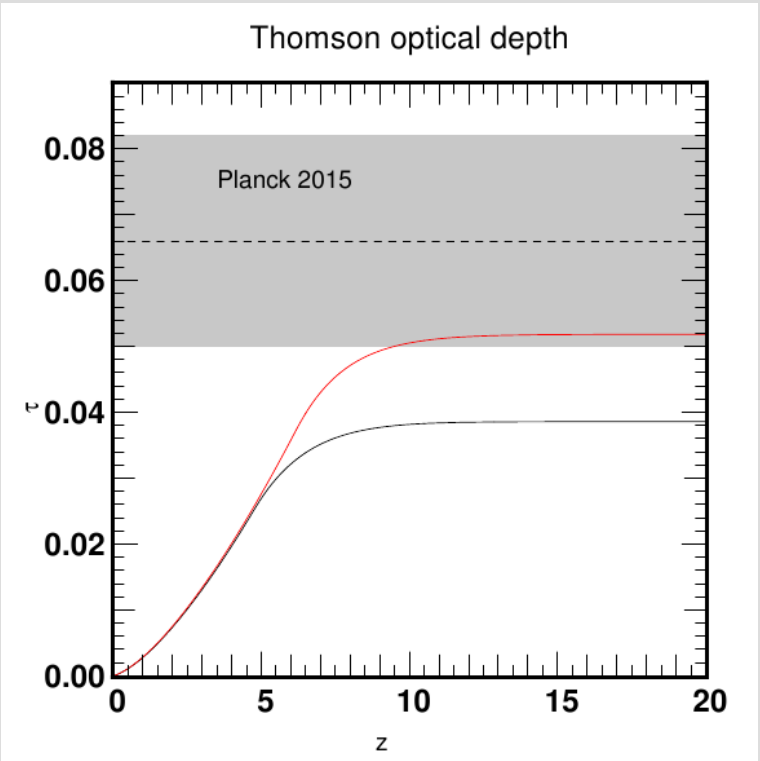
Ewolucja gęstości gazu I jego temperatury



Ewolucja zawartości HII I rozkładu jonizującego promieniowania
Te rachunki sugerują, ze przy z~6 jonizacja nie jest jeszcze kompletna (???)





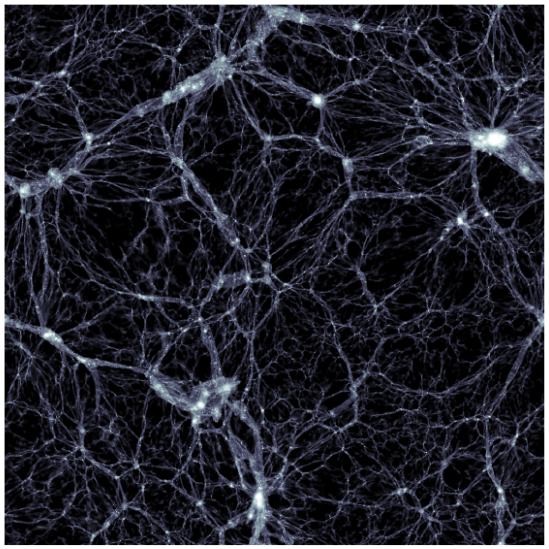


Problemy: parametry dopasowane do modelowania zjawisk w małej objętości (otoczenie LG) dają (zbyt?) późną jonizację, za małą SFR, za małą grubość optyczną
Przeskalowane: (sztuczne przesunięcie z-->1.3*z) częściowo usuwa problem
Wyniki symulacji sa natomiast zgodne z półanalitycznymi przewidywaniami: pierwsze galaktyki ~10^8 M_sun, usunięcie gazu z satelitów

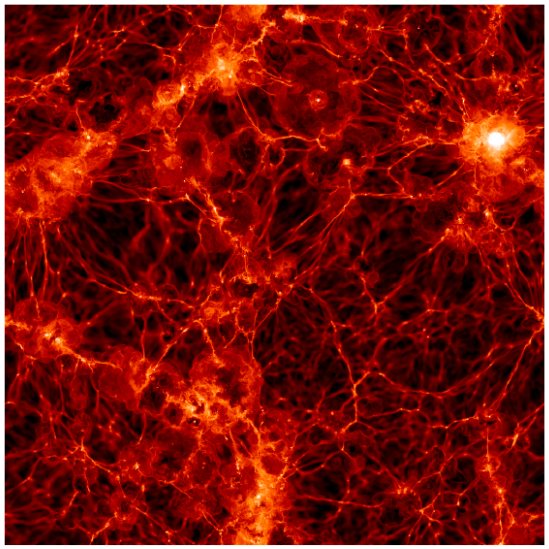
2021: red lines are artificial, aimed to “explain” *tau* ~0.07 as required in 2015

Large-scale mass distribution in the Illustris simulation

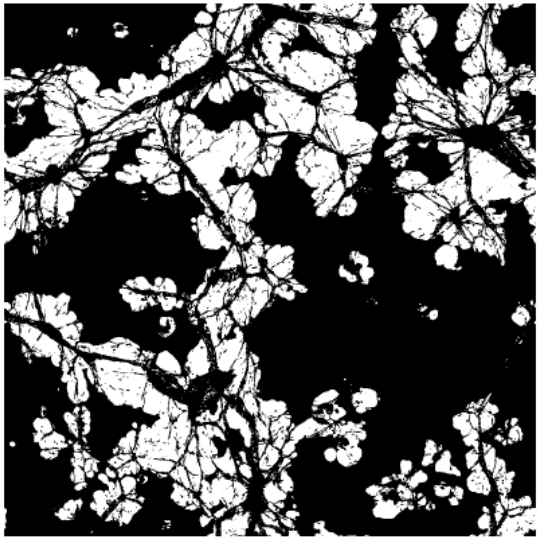
M. Haider[1⋆], D. Steinhauser[1], M. Vogelsberger[2], S. Genel[3†], V. Springel[4,5]
P. Torrey[2,6] and L. Hernquist[7]

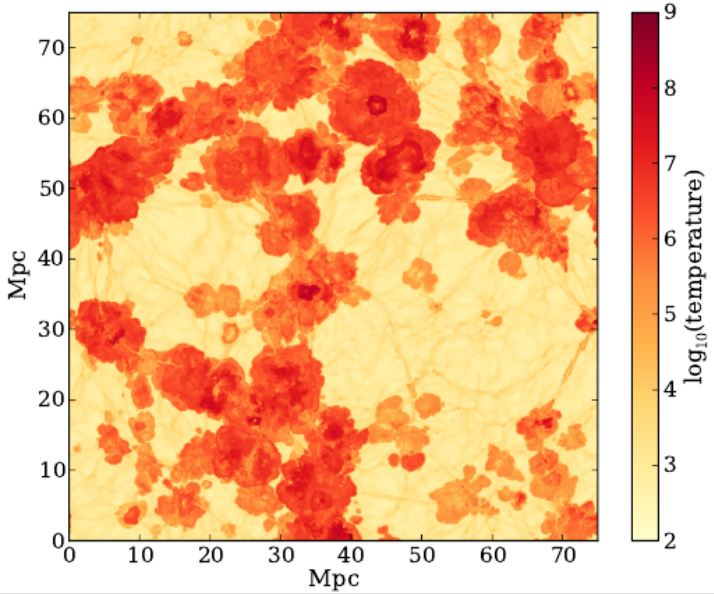


(a) dark matter



(b) baryons





Rozkłady gęstości DM, B

Wyrzuconych B
Temperatury gazu
przy z=0

75/h Mpc*75/h Mpc*100kpc

(Jakościowo rozkłady podobne do wyników innych symulacji. Wady Illustris nie pozwalają na wiążące porównanie wyników I obserwacji)

Podsumowanie

- W zasadzie rozumiemy epokę powtórnej jonizacji
- Pop III wzbogaciły ośrodek w metale i zapoczątkowały proces
- Pop II dokończyły
- Akrecja na BH chyba nie miała większego znaczenia (skoro masa BH jest typowo 100x -1000x mniejsza od masy gwiazd, to nawet przy 20 razy wiekszej wydajności nie mogły być znaczące)
- Jeśli natężenie promieniowania przy z>6 opierać na obserwacjach galaktyk, wytłumaczenie jonizacji jest marginalnie zgodne z obserwacjami, choć obserwacje???
- Jeśli ocenę ilości gwiazd oprzeć na obserwacjach GRB zgodność jest lepsza

Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters

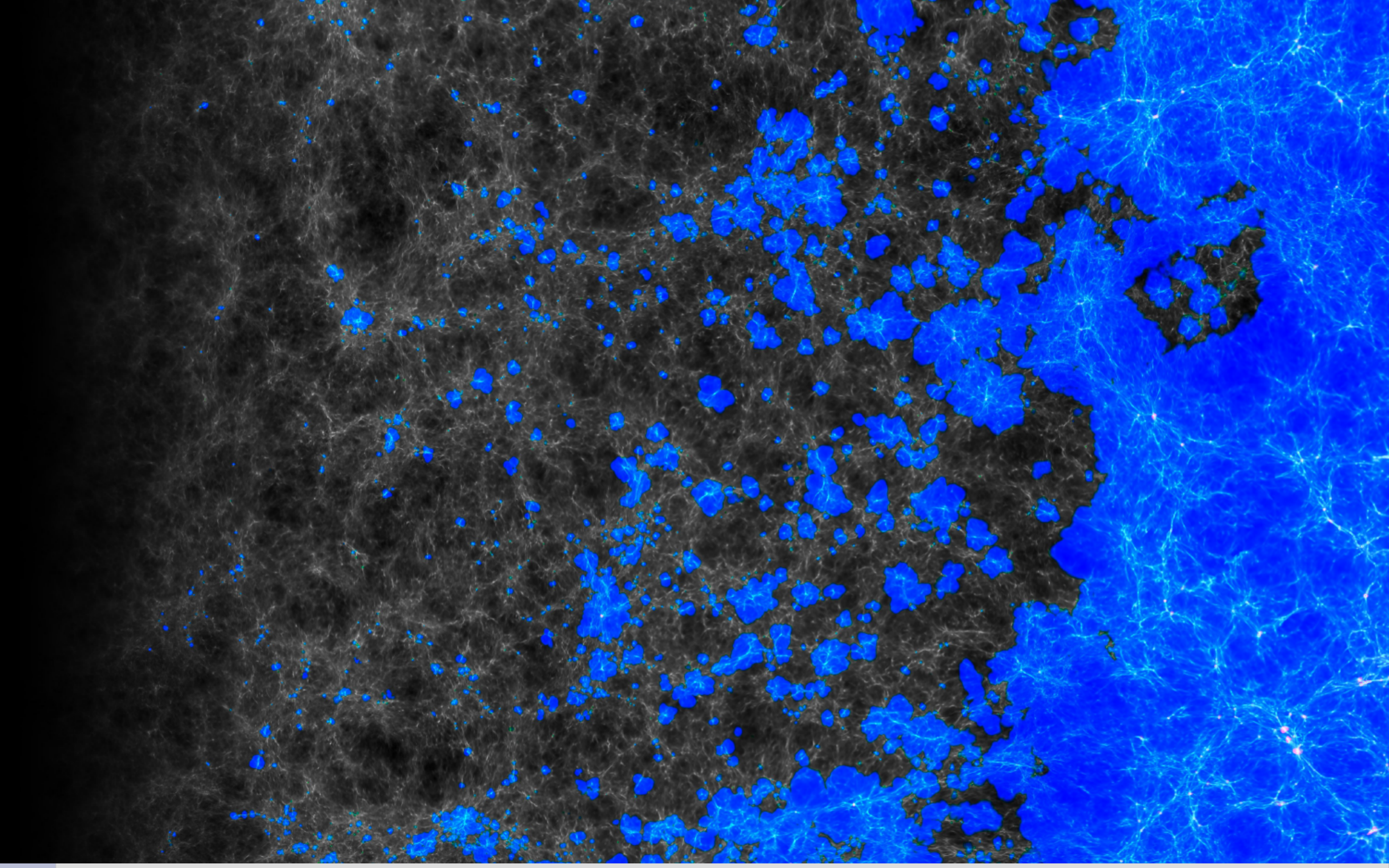
Planck Collaboration: N. Aghanim[53], Y. Akrami[56,58], M. Ashdown[65,5], J. Aumont[95], C. Baccigalupi[78], M. Ballardini[20,40], A. J. Banday[95,8],

Parameter	TT+lowE 68% limits	TE+lowE 68% limits	EE+lowE 68% limits	TT,TE,EE+lowE 68% limits	TT,TE,EE+lowE+lensing 68% limits	TT,TE,EE+lowE+lensing+BAO 68% limits
$\Omega_b h^2$	0.02212 ± 0.00022	0.02249 ± 0.00025	0.0240 ± 0.0012	0.02236 ± 0.00015	0.02237 ± 0.00015	0.02242 ± 0.00014
$\Omega_c h^2$	0.1206 ± 0.0021	0.1177 ± 0.0020	0.1158 ± 0.0046	0.1202 ± 0.0014	0.1200 ± 0.0012	0.11933 ± 0.00091
$100\theta_{MC}$	1.04077 ± 0.00047	1.04139 ± 0.00049	1.03999 ± 0.00089	1.04090 ± 0.00031	1.04092 ± 0.00031	1.04101 ± 0.00029
τ	0.0522 ± 0.0080	0.0496 ± 0.0085	0.0527 ± 0.0090	$0.0544^{+0.0070}_{-0.0081}$	0.0544 ± 0.0073	0.0561 ± 0.0071
z_{re}	7.50 ± 0.82	$7.11^{+0.91}_{-0.75}$	$7.10^{+0.87}_{-0.73}$	7.68 ± 0.79	7.67 ± 0.73	7.82 ± 0.71

2018: Cosmic Dawn II

Era Powtórnej Jonizacji (Era of Reionization EoR)
4096x4096x4096 → halo >10^8 sledzone
~100x100x100 Mpc^3 → niejednorodność procesów, sprzężenia zwrotne, tło UV opisane adekwatnie
Odtworzenie realiów lokalnego Wszechświata + gaussowskie war początkowe dla reszty → możliwość śledzenia lokalnych procesów I wpływu na nie z zewnątrz
Sprzężenie hydrodynamiki oraz transferu promieniowania
Parametry kosmologiczne: PLANCK
Rozdzielczość duża, ale dla ISM, procesów powstawania gwiazd niewystarczająca.
Zamiast tego “sub-grid” “smaller-boxes” → kalibracja fenomenologicznych parametrów dla zgodności z obserwacjami
Transfer promieniowania: front jonizacyjny pokonuje rozmiary komórki w paru krokach całkowania równań. (W rzadkim ośrodku front ma prędkość ~c) Hydrodynamika: dłuższe kroki czasowe na CPU, transfer: krótsze z użyciem GPU.

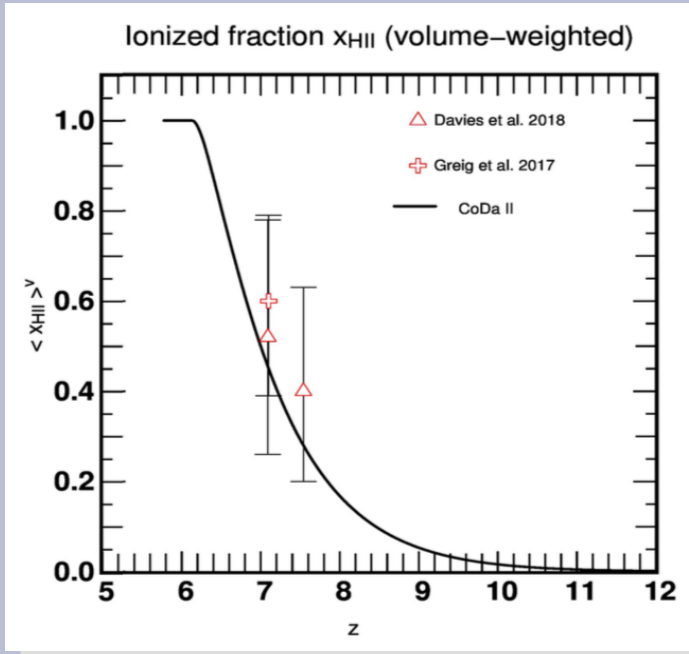
[Ocvirk et al., 2018 arXiv:1811.11192]

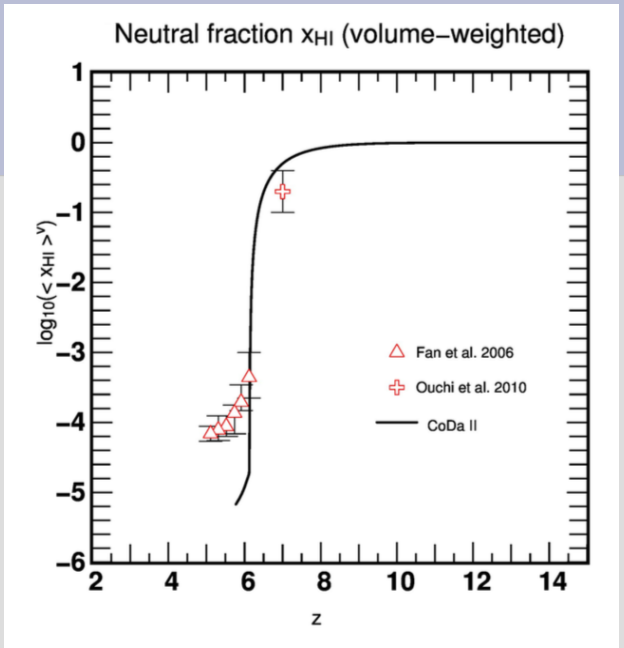


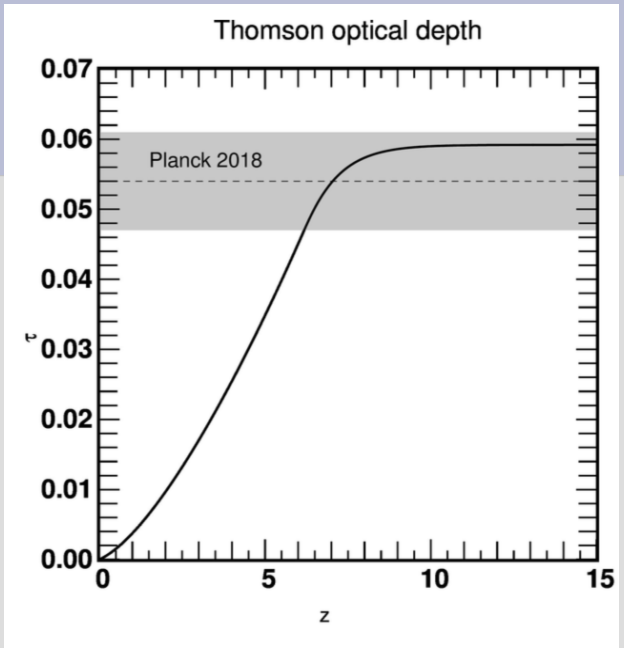
Jonizacja od z=150 do z=5.8. (Złożenie 1024 wąskich pionowych pasków, każdy odpowiadający innemu z) Niebieski: fotojonizacja, czerwone kropki: SN + akrecja

[Ocvirk et al., 2018 arXiv:1811.11192]

CO-DA II

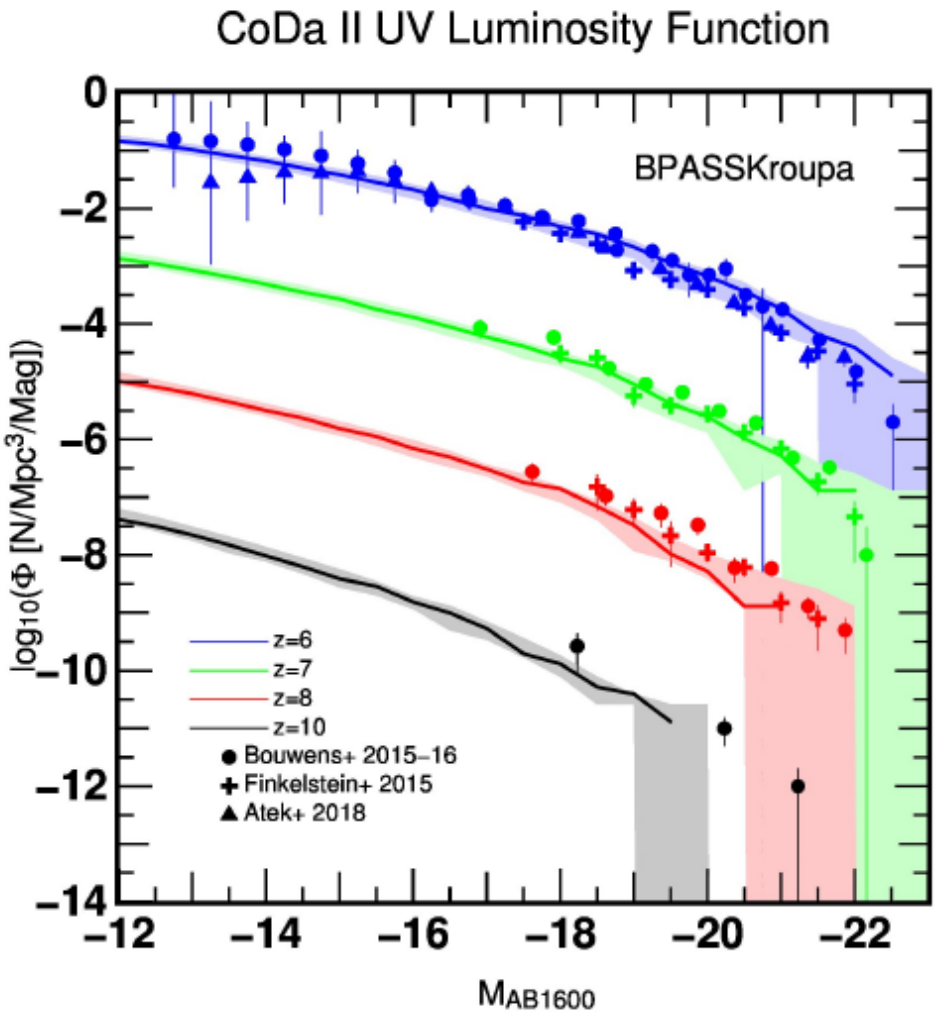


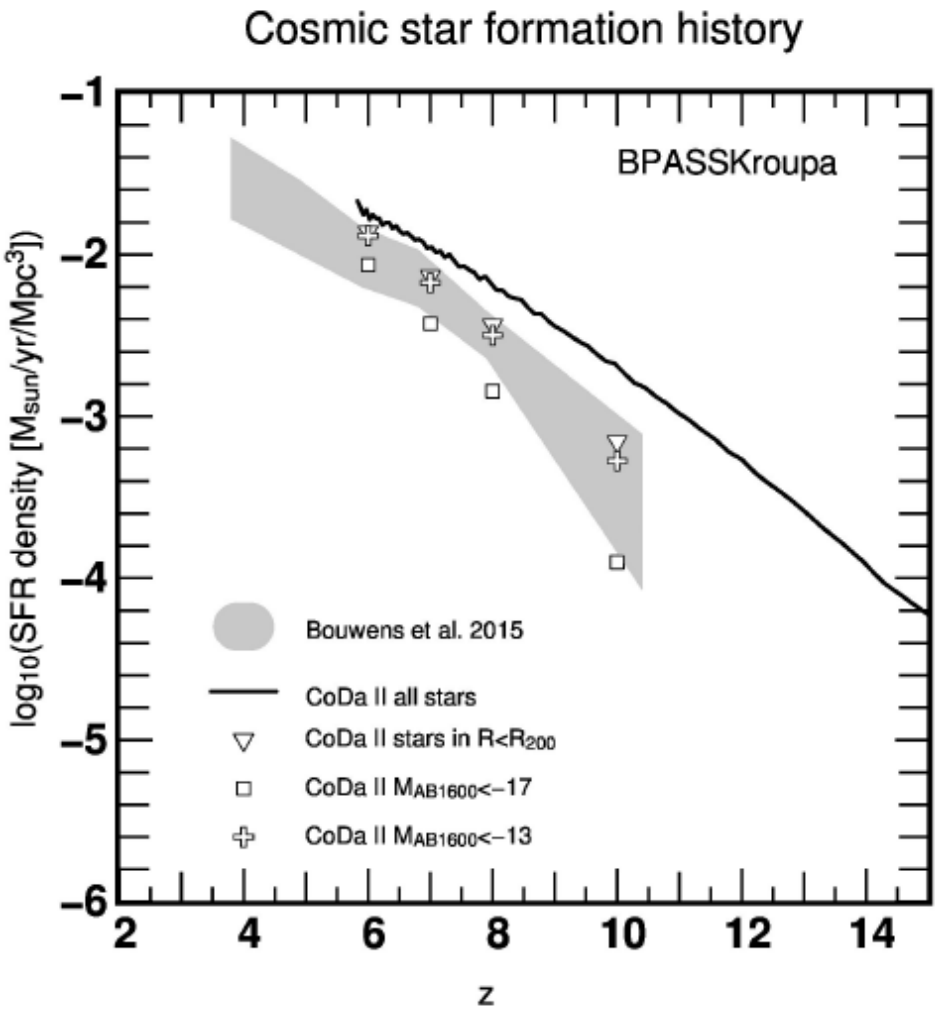




Uśredniony po objętości stopień jonizacji oraz stopień neutralności wodoru (lg).
(Widać, że CO-DA II jonizuje wodór kompletnie do z=6, tymczasem efekt Gunna – Petersona sugeruje x_HI = 1/10000 jeszcze przy z=5)
Całkowita grubość optyczna ze względu na rozpraszanie jakby chcial Planck 2018.
(Do z=6 mamy \tau_e=0.048, a nie klasyczne 0.04, bo Planck 2018 używa też wyższej, w porównaniu z poprzednikami, gęstości barionów.)

[Ocvirk et al., 2018 arXiv:1811.11192]





Rozkład jasności galaktyk dla różnych z, tempo tworzenia gwiazd w funkcji z oraz porównanie z obserwacjami.

Co-Da II

[Ocvirk et al., 2018 arXiv:1811.11192]

2018: Co-Da II

- Symulacja obejmuje wszystkie halo >10^8 M_Sun
- Procesy gwiazdotwórcze, SN + transfer promieniowania pozwalają zjonizować wodór przy z~6, dają dobry opis rozkładu jasności galaktyk przy dużych z
- SFR jest trochę zawyżona
- SFR ~ M_halo^{5/3}, ale to galaktyki o małych masach (których dużo) kontrybuują większość
- Dla M< 2x10^9 zależność jest jeszcze silniejsza: jonizacja przez zewnętrzne źródła UV hamuje powstawanie gwiazd w lekkich halo
- Ten efekt ograniczania SFR jest silniejszy przy większej średniej gęstości materii

[Ocvirk et al., 2018 arXiv:1811.11192]