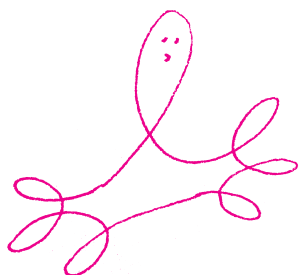


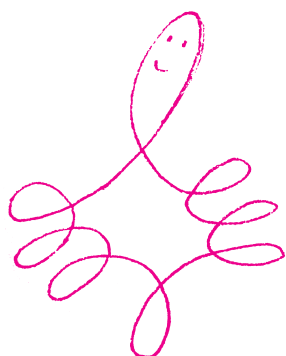
# Rejonizacja Wszechświata i gwiazdy Populacji III

Miguel FIGUEIRA

Zaraz po Wielkim Wybuchu Wszechświat był tak gorący, że materia mogła istnieć tylko w formie mieszaniny naładowanych cząstek subatomowych, poruszających się z zawrotnymi prędkościami. Wraz z czasem Wszechświat się rozszerzał, przez co stawał się coraz zimniejszy, aż osiągnął temperaturę, która pozwoliła na łączenie się tych cząstek i powstanie pierwszych jąder atomowych: helu, deuteru, litu, berylu i boru (tzw. *pierwotna nukleosynteza*). Następnie w związku z dalszym ochładzaniem się Wszechświata mogły powstać neutralne atomy: wodór i hel (tzw. *epoka rekombinacji*). Od tego momentu elektrony były już połączone z atomami i nie mogły oddziaływać z poruszającymi się swobodnie we Wszechświecie fotonami. Poza tymi fotonami nie istniało żadne inne źródło światła i z tego właśnie powodu ten okres istnienia Wszechświata nazywany jest *Ciemnymi Wiekami*. W czasie tego mrocznego okresu materia powoli skupiała się, tworząc pierwsze zwarte obiekty, takie jak gwiazdy, których promieniowanie umożliwiło zjonizowanie wszystkich atomów wodoru obecnych we Wszechświecie. Ten okres historii Wszechświata znany jest jako *era rejonizacji*.

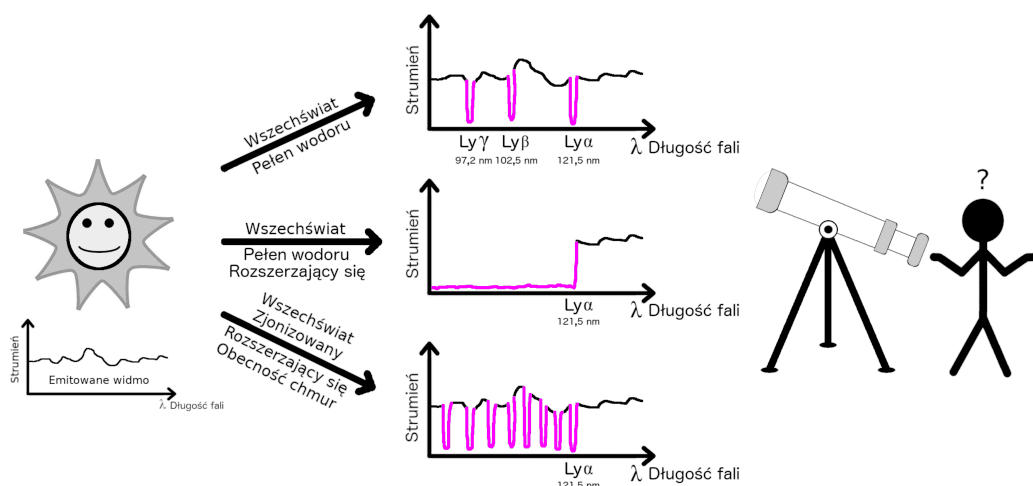


Czym jest widmo, można się dowiedzieć w  $\Delta_{19}^{04}$ .



Skąd wiemy, że neutralny Wszechświat zmienił się w zjonizowany? Rozważmy źródło (galaktykę albo gwiazdę) emitujące światło o pewnym ciągłym widmie. Jeśli na drodze pomiędzy źródłem a obserwatorem światło nie ma żadnych przeszkód, to na Ziemi zaobserwujemy dokładnie takie samo widmo promieniowania, jakie zostało wyemitowane. Wyobraźmy sobie jednak, że Wszechświat jest wypełniony atomami wodoru. Wodór może absorbować fotony o określonej długości fali ( $\lambda$ ), wzbudzając elektrony do przejścia na wyższe poziomy energiczne. Dla wodoru przejście od stanu podstawowego ( $n = 1$ ) do wyższych poziomów ( $n > 1$ ) odpowiada tzw. serii Lymana: 121,6 nm ( $\lambda_{Ly\alpha}$ ,  $n = 1 \rightarrow 2$ ), 102,5 nm ( $\lambda_{Ly\beta}$ ,  $n = 1 \rightarrow 3$ ), 97,2 nm ( $\lambda_{Ly\gamma}$ ,  $n = 1 \rightarrow 4$ ) itd. Fotony o takich długościach fali są absorbowane (pochłonięte przez wodór) i znikają z widma, pozostawiając w nim ciemne prążki, które nazywamy liniami absorpcyjnymi. I takie właśnie widmo obserwujemy na Ziemi.

Przyjmując wcześniejsze założenie, że Wszechświat jest wypełniony wodorem, musimy jednak wziąć pod uwagę fakt, że Wszechświat się rozszerza, przez co

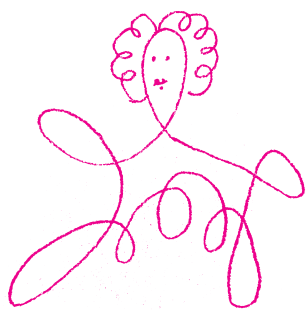


Rys. 1. Źródło (gwiazda) emituje światło, którego widmo obserwujemy na Ziemi. W statycznym Wszechświecie równomiernie wypełnionym wodorem wszystkie fotony, których długość fali odpowiada długościom fali serii Lymana, są absorbowane i znikają z widma. W rozszerzającym się Wszechświecie wypełnionym wodorem wszystkie fotony o długości fali mniejszej niż  $\lambda_{Ly\alpha}$  są absorbowane (Efekt Gunna-Petersona). W zjonizowanym i rozszerzającym się Wszechświecie, w którym istnieją chmury neutralnego wodoru znajdujące się pomiędzy nami a źródłem światła, widmo zawiera linie absorpcyjne od każdej chmury wodoru, przez którą przeszło światło (Las Lymana  $\alpha$ )

Zjawisko wydłużenia fali światła podróżującego przez rozszerzający się Wszechświat nazywamy przesunięciem ku czerwieni (*redshift*). Im bardziej wydłużona jest fala (im jest bardziej czerwona), tym pochodzi od bardziej odległego od nas obiektu. Długość fali fotonu emitowanego ( $\lambda_E$ ) przez źródło znajdujące się w odległości odpowiadającej redshiftowi  $z_E$  rośnie i jest obserwowana na Ziemi jako  $\lambda_Z = (1 + z_E)\lambda_E$ . Więcej o redshiftcie można przeczytać w  $\Delta_{19}^4$ .

Kwazary to ekstremalnie jasne galaktyki aktywne, w których centrum znajduje się supermasywna czarna dziura.

Generację gwiazd powstałych we wczesnym Wszechświecie nazywamy przewrotnie gwiazdami III Populacji.



Gwiazdy, które urodziły się po gwiazdach Populacji II, mają wyższą zawartość pierwiastków metalicznych i są znane jako Populacja I.

długość fali fotonów rośnie (dla zainteresowanych tym zjawiskiem odrobineć więcej informacji w notatce na marginesie). Wiemy, że fotony o długości fali  $\lambda = \lambda_{Ly\alpha}$  są absorbowane przez wodór, ale co się dzieje z fotonem emitowanym na niższej długości fali  $\lambda < \lambda_{Ly\alpha}$ ? Rozważmy foton o długości fali  $\lambda_E = 110$  nm emitowany przez źródło istniejące 0,5 Gyr (0,5 miliarda lat) po Wielkim Wybuchu ( $z \sim 9$ ). Podczas podróży fotonu przez Wszechświat jego długość fali stopniowo rośnie, osiągając  $\lambda_Z = (1 + 9) \times 110 = 1100$  nm w momencie obserwacji na Ziemi. Ponieważ foton został wyemitowany z  $\lambda_E < \lambda_{Ly\alpha}$  i ta długość fali rośnie do  $\lambda_Z > \lambda_{Ly\alpha}$ , to istnieje moment, w którym  $\lambda$  jest równe  $\lambda_{Ly\alpha}$  ( $= 121,6$  nm). W tym momencie foton zostaje zaabsorbowany, kończąc swoją podróż (nie dotrze do Ziemi). Z drugiej strony, długość fali bardziej energetycznych fotonów emitowanych z  $\lambda_E > \lambda_{Ly\alpha}$  też rośnie do  $\lambda_Z > \lambda_{Ly\alpha}$ , więc nigdy nie będzie w stanie osiągnąć  $\lambda_{Ly\alpha}$  – te fotony nie zostaną pochłonięte przez wodór i dotrą niezmiennie do Ziemi. Ostatecznie więc widmo promieniowania obserwowane na Ziemi będzie się składało z dwóch części, których granica wypadnie dokładnie na długości fali  $\lambda_{Ly\alpha}$ : powyżej tej wartości widmo pozostanie niezmienione, natomiast poniżej nie zostanie całkowicie zaabsorbowane. To zjawisko nazywane jest Efektem Gunna–Petersona i zostało teoretycznie przewidziane przez Jamesa Edwarda Gunna i Bruce’a Petersona w 1965 roku oraz potwierdzone obserwacyjnie w roku 2001 dzięki obserwacji kwazara J1030+0524. Późniejsze tego typu obserwacje, przeprowadzone dla wielu różnych kwazarów, dowiodły, że Era Rejonizacji skończyła się około 1 Gyr ( $z \sim 6$ ) po Wielkim Wybuchu.

Dzisiaj astrofizycy uważają, że rejonizacja była spowodowana przez bardzo gorące i niezwykle masywne gwiazdy, które powstały zaledwie kilkaset milionów lat po Wielkim Wybuchu. Rodziły się one w chmurach gazów składających się jedynie z trzech rodzajów atomów: wodoru, deuteru i helu. Z uwagi na fakt, że w młodym Wszechświecie nie istniały jeszcze ciężkie pierwiastki, proces tworzenia się pierwszych gwiazd przebiegał trochę inaczej, niż ma to miejsce teraz. Proces powstania gwiazdy można skrótowo opisać w następujący sposób: Żeby mogła powstać gwiazda, zapadająca się chmura gazu musi mieć wystarczająco dużą masę, większą od tzw. masy Jeansa. Masa ta rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Młody Wszechświat był bardzo rozgrzany. Chmury deuteru miały temperatury nie mniejsze niż  $\sim 100$  K. Skutkowało to wysoką masą Jeansa. Ponieważ masa gwiazdy ( $\bar{M}$ ) zależy od masy chmury gazu, z której powstaje, gwiazdy Populacji III były zdecydowanie masywniejsze ( $\bar{M} > 100 M_\odot$ , gdzie  $M_\odot$  oznacza masę Słońca) niż te, które powstają we współczesnym Wszechświecie ( $\bar{M} \sim 0,5 M_\odot$ ). Tak masywne gwiazdy żyły „tylko” kilka milionów lat, ale odegrały fundamentalną rolę we Wszechświecie: zjonizowały go oraz wyprodukowały cięższe pierwiastki, które potem rozrzuciły, wybuchając jako wysokoenergetyczne supernowe. Ciężkie pierwiastki wyprodukowane wewnątrz pierwszych, masywnych gwiazd wzbogaciły chmury deuteru, co umożliwiło obniżenie ich temperatury i jednocześnie zmniejszenie masy Jeansa. Dlatego mogło powstać nowe pokolenie mniej masywnych gwiazd o niezerowej metaliczności, znanych jako Populacja II.

Cała wiedza, którą posiadamy o gwiazdach III Populacji, jest niestety jedynie teoretyczna. Jak do tej pory, nie mamy żadnych dowodów obserwacyjnych na ich istnienie. Pomimo bardzo szybkiego rozwoju technologicznego teleskopów obserwacje młodego Wszechświata wciąż są bardzo trudne. Skuteczne mogłoby się jednak okazać wykorzystanie obserwacji fal grawitacyjnych. 19 maja 2021 roku zaobserwowano sygnał fal grawitacyjnych powstałych w wyniku połączenia się dwóch masywnych czarnych dziur (GW190521). Jedną z hipotez opisujących pochodzenie tych czarnych dziur mówi, że one właśnie mogą być pozostałością po układzie podwójnym gwiazd III Populacji.