

**Ważenie Drogi Mlecznej**

**czyli w jaki sposób**

**szacuje się masy galaktyk**

## 1. Z czego składają się galaktyki?

Budowa galaktyki zależy od jej typu. Według najbardziej popularnych modeli galaktyki spiralne, takie jak Droga Mleczna, składają się z **jądra**, w którym jest supermasywna czarna dziura, **centralnego zgrubienia galaktycznego (bulge)**, **dysku** oraz **halo**. Głównym widocznym składnikiem masy są gwiazdy, więc to właśnie teoria ich budowy i ewolucji oraz ich ruchy wewnątrz galaktyki stanowią podstawę do wyznaczania masy.

Oprócz gwiazd źródłami promieniowania są również obłoki gazowe i dyski akrecyjne ale przyjmuje się, że większość masy galaktyk przypada na halo, którego większość stanowią składniki niewidoczne (ciemna materia barionowa lub niebarionowa),

dlatego wyznaczona masa galaktyki w silny sposób zależy od zastosowanego modelu.

## 2. Masy gwiazd.

Masy gwiazd można mierzyć dzięki ich efektom grawitacyjnym. Najdokładniej znamy masę Słońca – według systemu stałych astronomicznych IAU 2009 iloczyn masy Słońca i stałej grawitacji wynosi  $1,3271244 \times 10^{20} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ , co przy stałej grawitacji  $G = 6,67428 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  daje masę  $1.98842 \times 10^{30} \text{ kg}$ . Masy innych gwiazd najłatwiej mierzyć w **układach podwójnych** dzięki **trzeciemu prawu Keplera**

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{4\pi^2}$$

Masy gwiazd są w zadowalający sposób odtwarzane przez **teorię budowy i ewolucji gwiazd**. W myśl tej teorii gwiazdy

większość czasu spędzają na tzw. **ciągu głównym**, kiedy spalają wodór w swoim centrum. Jest to jedyny w miarę stabilny etap ewolucji gwiazdy. Zagęszczenie gwiazd na diagramie Hertzsprunga-Russela (H-R) ten wniosek potwierdza. Czas pobytu na ciągu głównym zależy od masy gwiazdy – gwiazdy masywne opuszczają go o wiele szybciej. Są to wyniki na tyle dobrze ugruntowane, że w przypadku pojedynczych gwiazd należących do Ciągu Głównego przyjmuje się, że ich masę można wyznaczyć z odpowiedniej zależności między masą, widmem i jasnością absolutną.

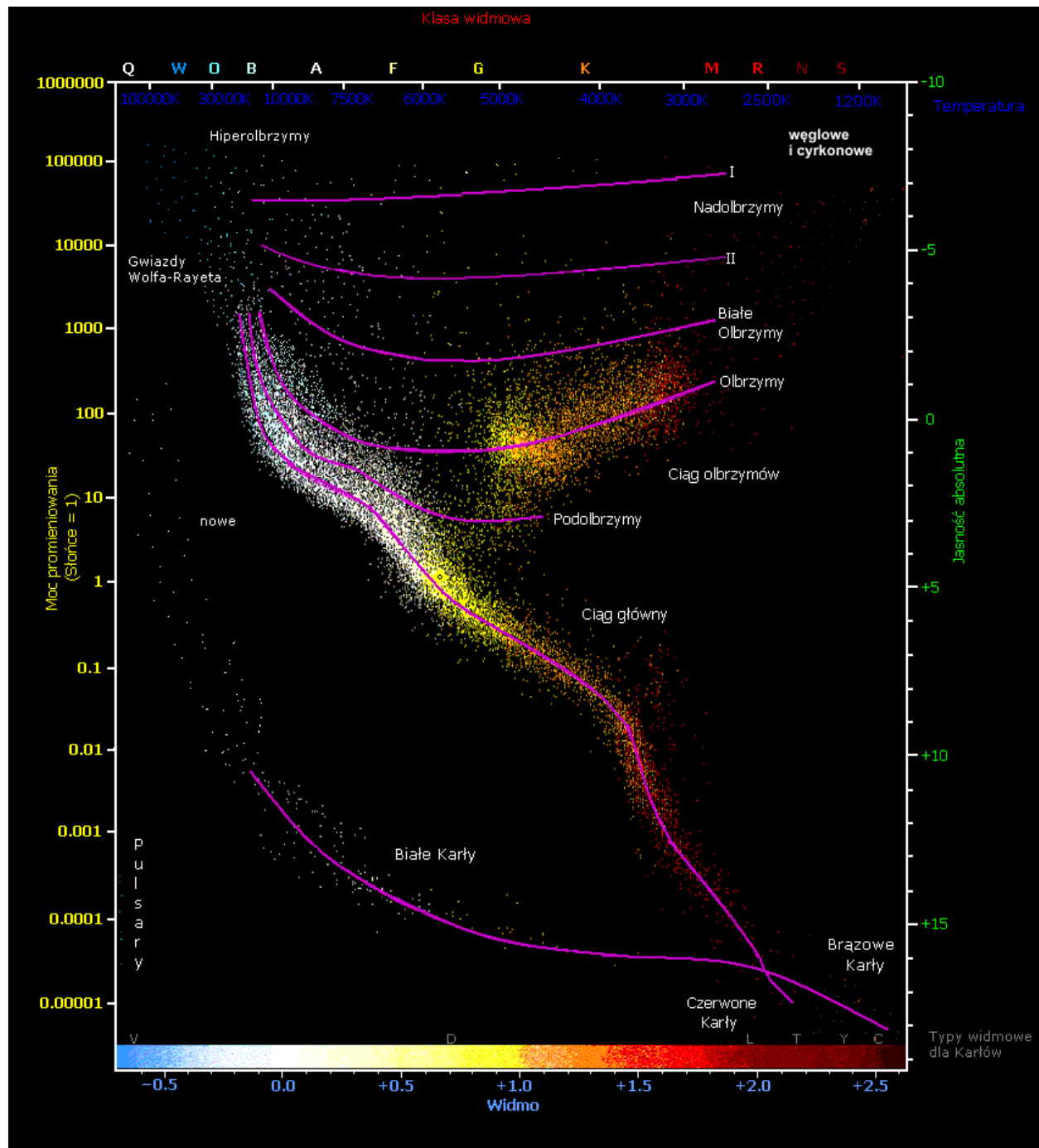
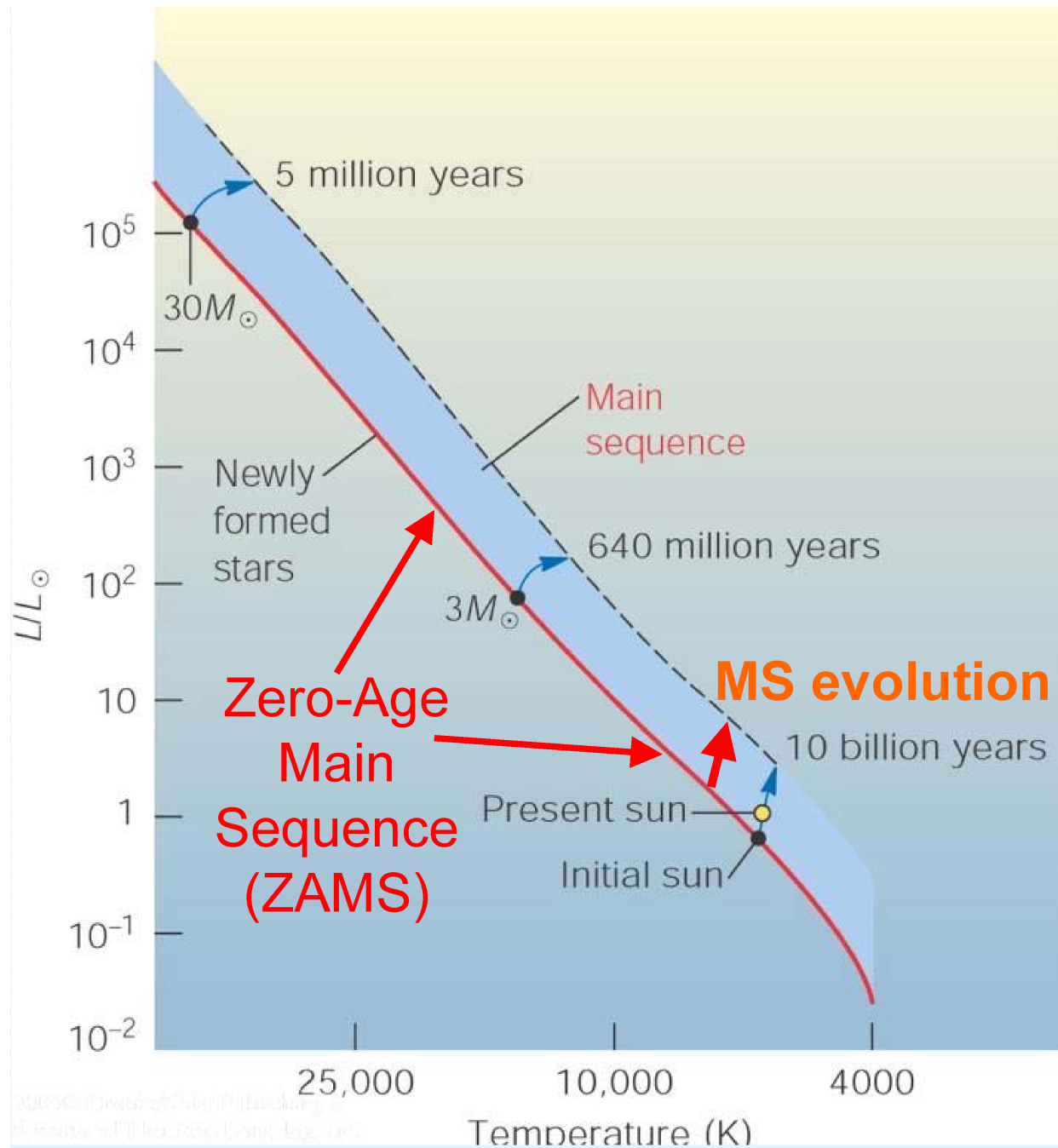


Diagram H-R.



Ewolucja gwiazd na ciągu głównym.

### 3. Dynamiczne masy galaktyk

O wiele trudniej oszacować masy galaktyk. Galaktyki występują w gromadach, trudno mierzyć ich prędkości (de facto w grę wchodzi tylko prędkości radialne), dlatego nie można skorzystać bezpośrednio z III prawa Keplera. Można skorzystać z **twierdzenia o wiriale**, według którego zależność między energią potencjalną i kinetyczną w układach mechanicznych i hydrodynamicznych jest następująca

$$E_p = -2E_k$$



co w konsekwencji oznacza

$$\sigma^2 \geq \frac{GM}{5r_g}$$

gdzie  $r_g$  to rozmiar obiektu a  $\sigma^2$  jest dyspersją prędkości wyznaczoną (w przypadku innych galaktyk) z dopplerowskiego poszerzenia linii widmowych.

Dodatkowym źródłem informacji na temat rozkładu masy w galaktyce jest krzywa rotacji. Większość galaktyk spiralnych ma **płaskie krzywe rotacji** co oznacza, że w przypadku zastosowania **modelu sferycznego** otrzymujemy liniową zależność między masą i rozmiarem – czyli istnienie **ciemnego, sferycznego halo**, złożonego głównie z materii niebarionowej.

Zamiast modelu sferycznego można zastosować **dyskowy** (pierwszy taki model opublikował L.Mestel w 1963 r.), ale w tego typu modelach są poważne problemy z ich stabilnością. Alternatywą dla ciemnej materii jest **MOND** (MOdified Newtonian Dynamics), ale ten model z kolei wymaga modyfikacji praw fizyki i z tego powodu jest mniej popularny.

## 4. Gwiazdne masy galaktyk

Inną metodą szacowania masy galaktyki jest ocena masy gwiazd. O ile w przypadku np. Drogi Mlecznej można liczyć pojedyncze gwiazdy, dla dalekich galaktyk ta metoda jest bezużyteczna. W praktyce bierze się pod uwagę jasność całej galaktyki, zakłada jakąś początkową funkcję masy gwiazd (IMF - Initial Mass Function) i przy pomocy zależności między jasnością a masą gwiazd otrzymuje się masę gwiazd w galaktyce.

Tą metodą można otrzymać dolne oszacowanie masy galaktyki. Problem w tym, że dla niektórych galaktyk **masa gwiazdna jest większa od masy dynamicznej**. Ten fakt jest trudny do wyjaśnienia choć L.Peralta de Arriba i inni w pracy z 2015 r. przytaczają dane wskazujące, że ten problem występuje czę-

ściej dla galaktyk o wyższym przesunięciu ku czerwieni. Przy-  
puszczają, że rozwiązaniem tego problemu może być przyjęcie,  
że struktura dynamiczna galaktyk eliptycznych zależy od ich  
zwartości.

Warto nadmienić, że jednym z parametrów stosowanych  
do opisu galaktyk jest **stosunek masy do jasności**, zwykle nieco  
powyżej  $1M_{\odot}/L_{\odot}$ .

## 5. Szacowanie masy Drogi Mlecznej

Masa naszej Galaktyki jest uznawana za jeden z najbardziej fundamentalnych parametrów. Różne oszacowania dają spory rozrzut – od 0,5 (na podstawie anizotropii radialnej) do nawet 3 bilionów mas Słońca (wyższe wyniki są uzyskiwane przy użyciu różnych metod). Od tej masy zależy nasze zrozumienie historii dynamicznej Grupy Lokalnej oraz formacji i rozwoju struktur we Wszechświecie.

Ostatnio (już w 2019 r.) ukazała się publikacja L.L.Watkins i współpracowników, w której uwzględniono dane dotyczące kinematyki gromad kulistych pochodzących z satelity Gaia (Data Release 2) o odległości od środka od 2,0 do 21,1 kpc. Dane te porównano z danymi pochodzącymi z teleskopu Hubble'a. Przy

różnych założeniach otrzymali następujące wyniki (w bilionach mas Słońca):

⇒ 1,28 (Gaia)

⇒ 1,54 (Gaia i HST)

⇒ 1,34 (Gaia bez potencjalnych obiektów połączonych)

⇒ 1,22 (Gaia i HST bez obiektów o wysokiej prędkości prostopadłej)

Podane niepewności są dość wysokie: od dołu 0,36-0,50, od góry 0,63-1,02. Autorzy twierdzą, że ponieważ ich dane są oparte na najbardziej kompletnej bazie danych, pozwalają one na pogodzenie ze sobą sprzecznych oszacowań masy Drogi Mlecznej. Złośliwość każe mi dopisać, że być może do czasu pojawienia się nowych pomiarów.

## 6. Podsumowanie

Szacowanie mas galaktyk nadal obarczone jest wieloma niepewnościami. Bardzo wiele zależy od założonego modelu. Problemy pojawiają się w nieoczekiwanych miejscach, np. masa gwiazdowa wyższa od masy dynamicznej wydaje się sprzeczna ze zdrowym rozsądkiem (po uwzględnieniu ewentualnych składników niewidocznych masa powinna być wyższa od masy zawartej w gwiazdach). W przypadku Drogi Mlecznej danych mamy najwięcej, ale do tej pory był duży rozrzut w oszacowaniach jej masy. Obecnie być może przynajmniej ten problem został rozwiązany.