Werkcollege 7, Groups and clusters, 2008

1 Intracluster medium

Uit de studie van dichte clusters waarin sterrenstelsels langzaam invallen door de onderlinge zwaartekracht, blijkt dat de meerderheid van de baryonische materie in de cluster zich bevindt in heel heet, ijl, intracluster gas met een temperatuur $\geq 7 \times 10^7$ K. Dit hete, ijle gas is wel in evenwicht met het warme, neutrale HI gas in de schijf van stelsels. Dit laatste gas is waargenomen met temperatuur $T_{\rm HI}$=10 000 K en dichtheid n_H=1 cm^{-3}.

1. Wat betekent dit evenwicht voor de dichtheid van het ijle, hete gas?

   Het geheel is in drukevenwicht, m.a.w.:

$$P_{\rm hot} = P_{\rm warm} : n_{\rm hot}T_{\rm hot} = n_{\rm warm}T_{\rm warm} \tag{1}$$
$$n_{\rm hot} = \frac{T_{\rm warm}}{T_{\rm hot}}n_{\rm warm} = \frac{1e4}{7e7}0.3 = 1.4 \times 10^{-4} cm^{-3} \tag{2}$$

2. Dit gas straalt door *free-free* straling (ook wel *bremsstrahlung* genoemd). De lichtkracht van dit gas per kubieke centimeter is:

$$l_X = n^2\Lambda(T_x); \Lambda(T_x) = 3 \times 10^{-27} T_X^{0.5} ergs^{-1} \tag{3}$$

   In een cluster kan dit gas over een straal van 1 Mpc verspreid zijn. Wat is de totale massa (in zonsmassa's) en de totale lichtkracht van dit gas? Vergelijk dit met de lichtkracht van een low-mass X-ray binary die op de Eddington limiet straalt: L_x = 10^{38} erg s^{-1}. Hiervan vinden we er normaal gesproken ∼100 in een sterrenstelsel.

   De totale massa is simpelweg:

$$M_X = nVm_H = \frac{4\pi n m_H}{3}R^3 = 2.87e43kg = 1.4e13M_\odot \tag{4}$$

   De totale lichtkracht van dit gas is:

$$L_X = Vl_x = Vn^2 3 \times 10^{-27} T_X^{0.5} = 1.44e43ergs^{-1} = 1.44e36W = 3.7e9L_\odot \tag{5}$$

   Dit zijn ongeveer 144 000 LMXBs.

3. Wat is het verschil met LMXBs als we dit gas willen detecteren met een röntgentelescoop?

   De LMXBs zijn altijd puntbronnen, en dus is deze lichtkracht in onze detectoren zeer geconcentreerd. Het hete,ijle intergalactische gas is echter uitgespreid over een volume van 200 kpc en de specifieke intensiteit van het gas is dus veel lager. We hebben dus een behoorlijk gevoelige telescoop met een groot blikveld nodig om dit in kaart te brengen en om het verschil met het niveau buiten de cluster te kunnen detecteren

4. De lichtkracht van dit gas moet opgebracht worden door een energiebron. Wat is uiteindelijk de energie bron die dit hete intracluster gas op doet warmen en doet stralen?

   Uiteindelijk is dit het vrijkomen van potentiele energie van de sterrenstelsels die invallen in de clusterpotentiaal

5. Een cluster wordt vaak gedomineerd door één groot elliptisch stelsel (een cD stelsel): NGC 1275. De totale massa van NGC 1275 is $\sim 3 \times 10^{11} M_\odot$ en de straal ongeveer 50 kpc. Stel dat we even stellen dat de cluster slechts uit NGC 1275 bestaat, hoeveel gas moet er dan invallen om de boven uitgerekende röntgenlichtkracht van de cluster op te brengen? Druk je antwoord uit in Zonsmassa's per jaar en het aantal jaar waarin een stelsel als de LMC (2×10^{10} $M_\odot$) geaccreteerd moet worden.

   De röntgen lichtkracht moet dan opgebracht worden door accretie van materiaal op NGC1275. De energie hier bij vrij komt is maximaal de totale potentiele energie vrij komt als we materie in de potentiaal put van NGC 1275 laten vallen met snelheid $\dot{M}$:

$$L_{\rm pot} = \frac{GM\dot{M}}{R} \tag{6}$$

   m.a.w.

$$\dot{M} = \frac{LR}{GM} = \frac{1.44 \times 10^{36} * 50\,000 * 3.086 \times 10^{16}}{6.67 \times 10^{-11} * 3 \times 10^{11} * 1.99 \times 10^{30}} = 5.58{\times}10^{25} kg/s = 2.8{\times}10^{-5} M_\odot/s = 885 M_\odot/yr \tag{7}$$

   Dat betekent elke 22.6 Myr een LMC!

2 Galaxy-Galaxy mergers

De energie in de baanbeweging van sterren verandert door een interactie met een ander sterrenstelsel. Uiteindelijk leidt dit tot een minder sterk gebonden systeem waarin de geordende rotatie kleiner is geworden. Dat zullen we hier proberen uit te rekenen.
We gaan uit van een situatie zoals geschetst in Fig. 1. Hierin vliegt een sterrenstelsel met massa M langs een ander sterrenstelsel met daarin sterren met massa m. We willen weten wat de verandering in de snelheid (en daarmee de kinetische en potentiele energie) van het *sterrenstelsel* is door de invloed van de ster m. We gaan er vanuit dat het sterrenstelsel op een recht pad langsvliegt met een snelheid V en dat het punt van dichtste nadering een tijd t geleden is, en dat op dichtste nadering de afstand b is geweest. We gaan er vanuit dat de grootte van M veel kleiner is dan b en dat $V > \sigma$, de snelheidsdispersie van de sterren m in het tweede sterrenstelsel.

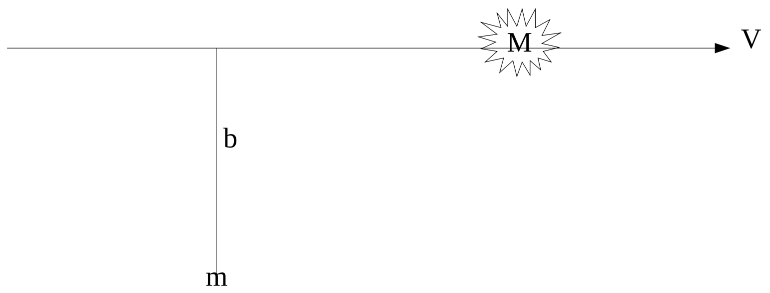

Figure 1: Botsings configuratie waarin galaxy M beinvloed wordt door de aanwezigheid van ster m in een tweede sterrenstelsel. De snelheid van galaxy M is V en de encounter is een tijd t geleden voorbij het punt van dichtste nadering b geweest.

1. Laat zien dat de verandering in de snelheid loodrecht op het pad van M, $\Delta V_\perp$ gelijk is aan:

$$\Delta V_\perp = \frac{2Gm}{bV} \tag{8}$$

   Zie afleiding 3.50 in boek

2. Geef een uitdrukking voor de totale verandering in kinetische energie in loodrechte snelheden van het sterrenstelsel en de ster?

   Zie vergelijking 7.5 uit het boek

3. Deze energie komt uit de voorwaartse snelheid $V_{||}$ van het sterrenstelsel M, als we er vanuitgaan dat de potentiele energie van het sterrenstelsel M lang voor en lang na de 'fly-by' verwaarloosbaar is. Geef hiermee een uitdrukking voor de verandering in de parallele snelheid $V_{||}$.

   Je ziet dat dit leidt tot een afname van de voorwaartse beweging van de het sterrenstelsel M. Dit is een dezelfde *dynamische wrijving* die we in een eerder college zijn tegengekomen.

   vergelijking 7.7 uit het boek

4. Echter, waar het hier om gaat is dat de fly-by natuurlijk ook de sterren m beinvloed. Stel dat het sterrenstelsel waarin m zich bevindt een spiraal stelsel is met totale massa $M_2 = 10^{11}$ $M_\odot$, bestaande uit sterren met massa m = 1 $M_\odot$, een vlakke rotatiecurve $V_{\rm rot}$= 220 km/s. Sterrenstelsel M heeft een totale massa 2×10^{10} $M_\odot$ en heeft een dichtste nadering van 50 kpc. Bovendien beweegt dit systeem zich op een polaire baan rond sterrenstelsel M_2. De snelheidsdispersie σ van de sterren in sterrenstelsel $M_2 < V_{\rm rot}$. Het sterrenselsel M vliegt langs met een snelheid V = 500 km/s.

   Wat is de totale kinetische energie van sterrenstelsel M_2?

$$E_{\rm kin} = 1/2NmV_{\rm rot}^2 = 1/2MV_{\rm rot}^2 = 4.81 \times 10^{51} J \tag{9}$$

5. Door de 'fly-by' verkrijgen de sterren in sterrenstelsel M_2 een extra kinetische energie $\Delta E_{\rm kin,\perp}$. Hoe groot is deze verandering? Druk je antwoord ook uit in een fractie van de totale kinetische energie.

   We gaan er hier van uit dat alle sterren dezelfde verandering in kinetische energie krijgen. We krijgen dan dat:

$$\Delta E_{\rm kin,\perp} = N\frac{m}{2}(\frac{2GM}{bV})^2 = \frac{M_2}{2}(\frac{2GM}{bV})^2 = 4.71 \times 10^{48}\, J. \tag{10}$$

   Dit is ongeveer 1 promille van de totale kinetische energie van het sterrenstelsel M_2.

6. Aangezien ons sterrenstelsel M zich in een polaire baan rond het sterrenstelsel M_2 bevindt kan deze extra kinetische energie niet gaan zitten in de baanrotatie van de sterren, maar alleen in de verticale component van hun snelheid. Wat voor snelheids dispersie σ_z krijgen de sterren in M_2 door deze 'fly-by'? Vergelijk dit met de snelheids dispersie van sterren in de *thin-disc* van ons Melkwegstelsel: $\sigma_{\rm z,thin} \sim 30km/s$.

   De extra kinetische energie zal gaan zitten in de verticale snelheidsdispersie: $\sigma_z^2 =< V_z^2 >$. We kunnen dus schrijven:

$$\Delta E_{\rm kin,\perp} = \Delta E_{\rm kin,z} = \frac{Nm}{2}\sigma_z^2 = \frac{M_2}{2}\sigma_z^2 \tag{11}$$

   Vergelijken met de uitdrukking hierboven zien we dat de kinetische energie verandering per deeltje precies gelijk is aan de dispersie in de z-richting:

$$\sigma_z = \frac{2GM}{bV} \tag{12}$$

   Voor onze sterrenstelsels leidt dit tot: $\sigma_z = 6.9km/s$. We zien dat slechts een klein aantal fly-by's van LMC-achtige systemen al genoeg is om de huidige snelheidsdispersie te veroorzaken.

7. Volgens het viriaal theorema is de totale potentiele energie in een stelsel gelijk aan $E_{\rm pot} = -2E_{\rm kin}$, en is de totale energie $E_{\rm tot} = E_{\rm kin} + E_{\rm pot} = -E_{\rm kin}$. Laat zien dat een fly-by leidt tot een *minder* sterk gebonden sterrenstelsel als we er van uitgaan dat het stelsel lang na de fly-by ook weer geviraliseerd is.

   Een verhoging van de totale kinetische energie leidt via het viriaal theorema automatische tot een verhoging van de potentiele energie:

$$E_{\rm tot,0} = E_{\rm kin,0} + E_{\rm pot,0} = +1/2E_{\rm pot,0} \tag{13}$$

$$E_{\rm tot.1} = E_{\rm kin,0} + E_{\rm pot,0} + \Delta E_{\rm kin} > E_{\rm tot,0} \tag{14}$$

$$E_{\rm tot,1} = E_{\rm kin,1} + E_{\rm pot,1} = +1/2E_{\rm pot,1} \tag{15}$$

$$\text{aangezien } E_{\rm tot,1} > E_{\rm tot,0}{:}E_{\rm pot,1} > E_{\rm pot,0}. \tag{16}$$

   De potentiele energie is omhoog gegaan, en het systeem is dus minder sterk gebonden: sterren hebben, gemiddeld, een grotere afstand tot het massa-middel punt/vlak gekregen, en het systeem is dus 'opgepuft'