

Fin 2019, un groupe de 3 membres du club Ciel d'Aunis a décidé d'essayer de mesurer la masse sombre dans la partie nord de l'amas de galaxies de la Vierge et de la comparer à la masse visible.

Après une phase de recherche théorique, de préparation du matériel et de tests de prises de vues, nous avons conduit les observations en mars et avril 2020. Puis a suivi une troisième phase d'analyse des données et de calcul des résultats recherchés. Au total, nous avons passé environ 350 heures sur ce projet, dont environ une cinquantaine pour les acquisitions.

Le projet est naturellement composé de deux parties : une ayant pour but de mesurer la masse totale présente dans l'amas, et une seconde dédiée à la mesure de la masse visible (masse stellaire). Les méthodes d'observation et d'analyse des données de ces deux parties sont bien distinctes l'une de l'autre.

Mesure de la masse totale

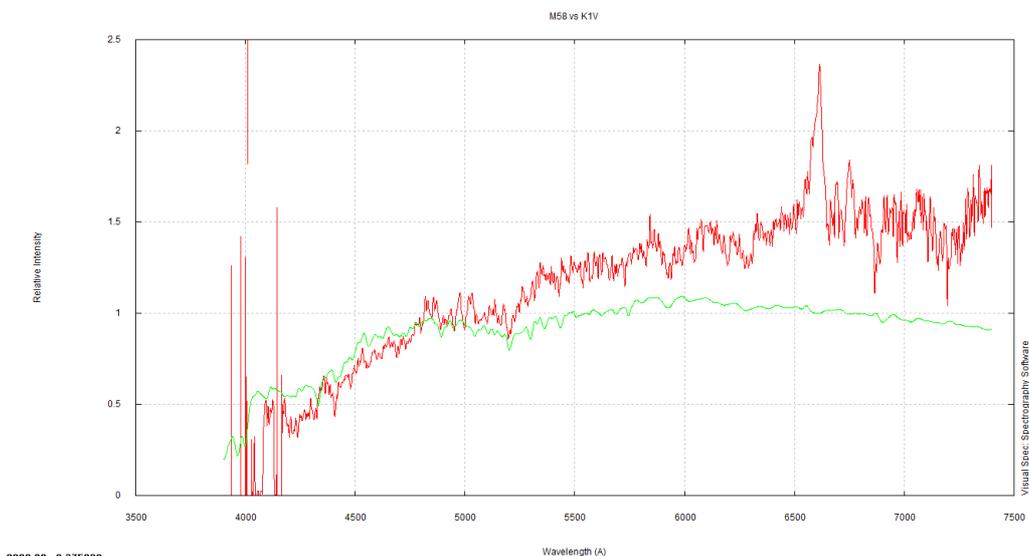
Pour la première partie, nous nous sommes basés sur le fait qu'un essaim de corps massifs va être animé de mouvements internes d'autant plus rapides que la masse totale de l'essaim est importante. Il s'agit d'une généralisation des lois de Kepler dans le cas de nombreux objets de masses similaires. Grâce à cette généralisation, dite « théorème du viriel », il est possible de se faire une idée de la masse totale de l'amas en mesurant la vitesse moyenne des galaxies à l'intérieur de l'amas ainsi que la distance moyenne entre chaque galaxie.

Compte tenu de la distance à laquelle se trouve l'amas de la Vierge, il n'est bien entendu pas possible de mesurer la vitesse de déplacement d'une galaxie dans le plan du ciel. En revanche, il est possible de mesurer sa vitesse radiale, c'est à dire sa vitesse le long de l'axe de visée Terre-galaxie. En réalisant cette observation sur plusieurs galaxies, il est donc possible d'obtenir une estimation de la vitesse radiale moyenne des galaxies dans l'amas. Si l'on fait alors l'hypothèse que l'axe de visée Terre-Vierge n'a rien de particulier, on peut en déduire que les vitesses moyennes en ascension droite et en déclinaison sont similaires à la vitesse radiale, et donc on peut estimer la vitesse moyenne totale des galaxies dans l'amas : c'est justement ce dont nous avons besoin pour appliquer le théorème du viriel.



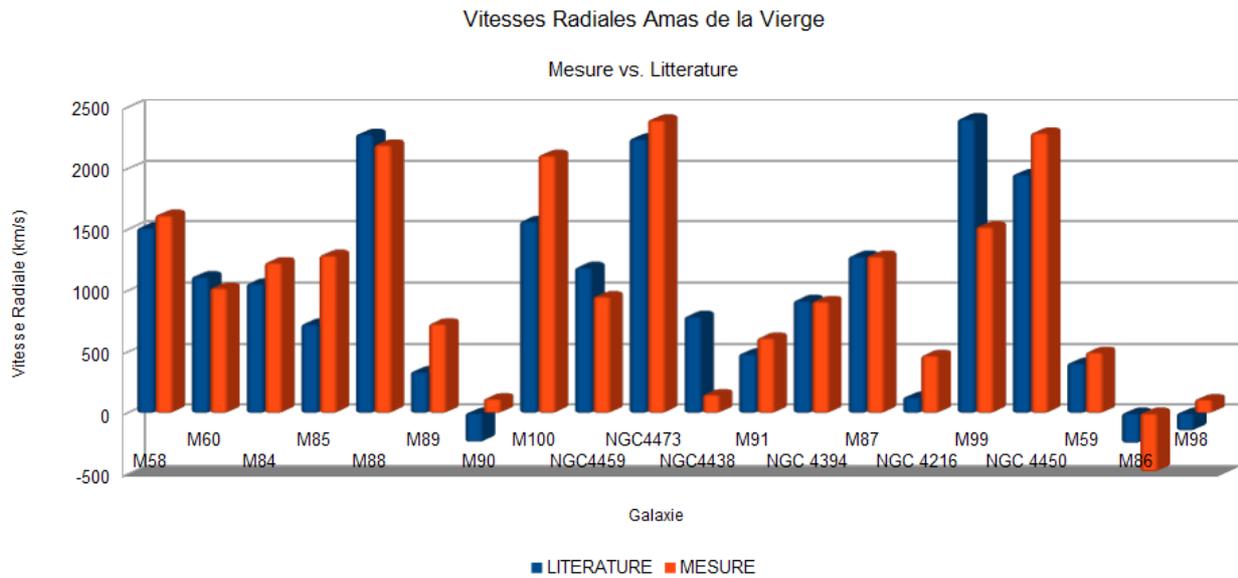
Pour mesurer la vitesse radiale moyenne, nous avons obtenus les spectres de 20 galaxies (Messier 58, 59, 60, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 98, 99, 100, NGC4216, 4394, 4438, 4450, 4459, 4473) avec un Schmidt-Cassegrain de 355 mm opérant à f/7, un spectroscopie Alpy600 et une caméra ASI 1600MM en bining 2.

Au total, nous avons réalisé un peu plus de 100 000 secondes de poses (5x1000s par galaxie). Les spectres ont été traités et analysés avec Isis ce qui nous a permis de mesurer le décalage spectral d'environ 8 raies en absorption/émission par galaxies, pour un total de 158 mesures de décalage.



La figure ci-jointe montre le spectre d'une de ces galaxies et permet de constater un niveau de bruit assez élevé et donc le besoin de réaliser plusieurs mesures de raies sur chaque galaxie. En rouge le spectre de M58, en vert un spectre de référence Pickles pour le spectre K1V.

Ces mesures permettent d'estimer la vitesse radiale par rapport à la Terre de chacune des 20 galaxies. On effectue alors des corrections pour ramener ces mesures à ce qu'un observateur, situé au centre de notre Groupe Local de galaxies, verrait. Ces corrections permettent de s'affranchir de différents mouvements parasites comme la rotation de la Terre autour du Soleil ou celle du Soleil autour de la Galaxie.



Le diagramme ci-contre compare nos mesures aux données de la littérature. S'il existe des variations individuelles, les valeurs moyennes et médianes sont proches.

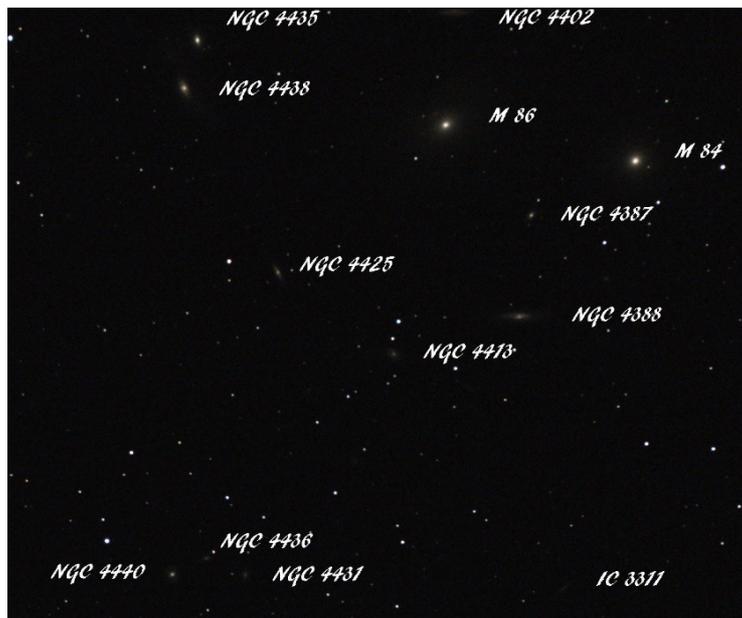
En calculant la moyenne des vitesses radiales, on obtient la vitesse d'éloignement d'ensemble de l'amas de la Vierge par rapport au Groupe Local. Nos mesures montrent une vitesse de récession de 1053 km/s. En utilisant la valeur de 67,8 km/s/Mpc pour la constante de Hubble-Lemaître, cela nous permet d'estimer une distance à l'amas de 15,06 Mpc (note : 1 Mpc = 1 méga parsec = 3,23 millions d'année-lumière) contre 16,67 Mpc pour le Catalogue des Galaxies dans l'Univers Local à $z < 0,01$.

La connaissance de la vitesse radiale de chaque galaxie et celle de l'ensemble de l'amas permet en outre de déterminer la vitesse radiale à l'intérieur de l'amas pour chacune des 20 galaxies. On en déduit une vitesse moyenne radiale intra-amas de 590km/s, et donc une vitesse moyenne 3D intra-amas de 1022 km/s.



Nous avons, en parallèle des observations spectroscopiques, réalisé une mosaïque de 102 Mega-pixels couvrant l'ensemble de la partie nord de l'amas de la Vierge (RA entre 12h et 13h, Dec entre $+10^\circ$ et $+20^\circ$). Cette mosaïque a été réalisée avec une lunette Takahashi FSQ85 équipée d'un réducteur de focale Taka, d'un APN Canon 450D refroidi, le tout monté sur une monture équatoriale EQ-6. Une dizaine de champs ont ainsi été enregistrés en RGB avec un échantillonnage de $3,3''/\text{pixel}$.

On voit ici la partie centrale de la mosaïque.



La mosaïque permet de repérer la position respective des galaxies de l'amas. Connaissant la distance de l'amas, nous avons ainsi pu mesurer les distances entre 330 galaxies, soit plus de 100 000 mesures.

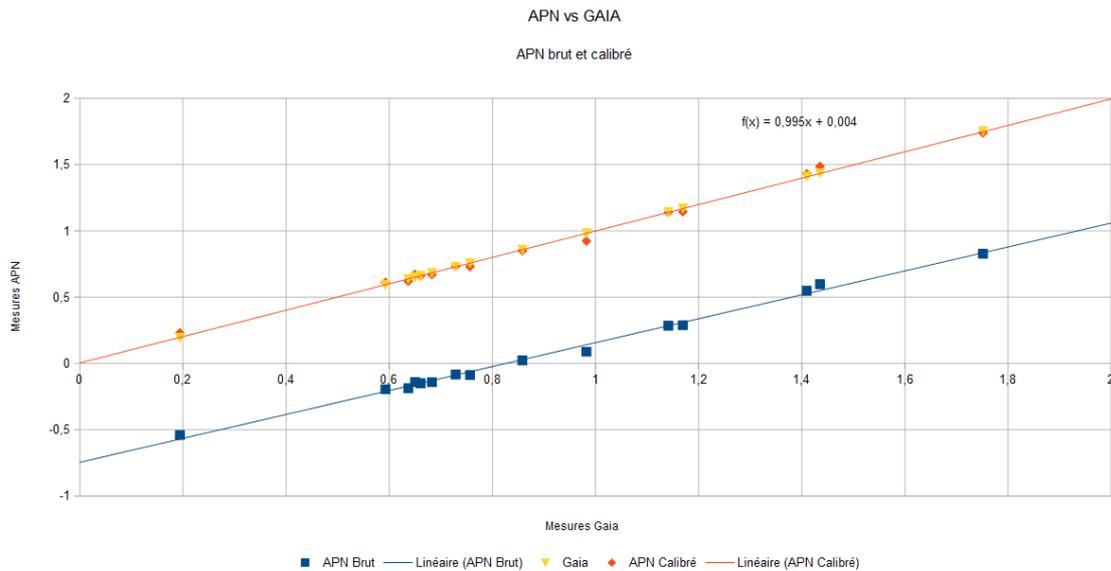
La moyenne de toutes ces mesures est de 1,25 Mpc (en 3D). Au passage, attention, il ne s'agit pas de la distance moyenne entre deux galaxies voisines, mais bien de la moyenne de toutes les distances en prenant toutes les paires de galaxies possibles. Pour la distance moyenne entre galaxies voisines, nos observations permettent de la situer à 250 000 année-lumière, soit un peu plus que la distance qui nous sépare du Petit Nuage de Magellan.

A ce stade du projet, l'application du théorème du viriel nous permet d'estimer la masse totale de l'amas Nord (visible + sombre) à $6e+14$ masses solaires (600 mille milliards de masses solaires). La littérature donne une valeur de $1,2e+15$ pour l'ensemble de l'amas de la Vierge (Nord et Sud), soit le double de notre mesure pour l'amas Nord seul. Notre estimation est donc en accord avec les valeurs publiées.

Mesure de la masse visible

Dans la seconde partie du projet, nous nous sommes attachés à estimer le nombre et la masse des étoiles d'une galaxie en fonction de 3 paramètres: sa magnitude apparente, sa distance et son indice de couleur (magnitude bleue – magnitude rouge).

Nous avons, dans un premier temps, réalisé la calibration en couleur de l'APN refroidi. Pour cela, nous avons réalisé une série de mesures des canaux rouge et bleu sur des étoiles de référence, mesures que nous avons comparées aux données Gaia. Ceci nous a permis de créer une fonction de correction de l'indice de couleur mesuré par l'APN. Voici les données avant (points et courbe en bleu) et après correction (points et courbe en rouge. Les données Gaia sont en jaune). On voit qu'il est possible de faire une bonne analyse d'indice de couleur avec un APN étalonné.



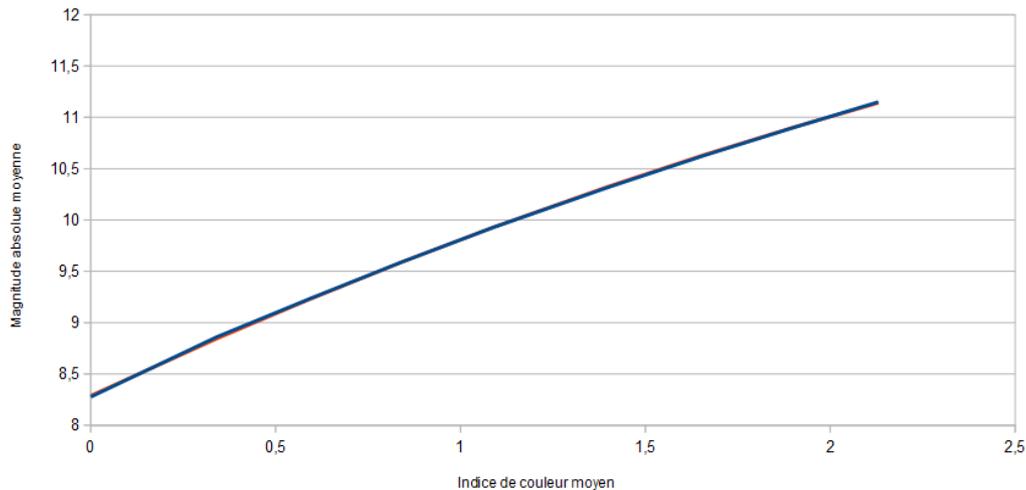
Une fois cette calibration faite, nous avons utilisé les images couleurs grand champ de la mosaïque pour mesurer les flux lumineux en rouge et bleu des 112 galaxies les plus importantes de l'amas. Le traitement s'est fait entièrement sous Iris (pré-traitement et photométrie). La connaissance de la distance de l'amas obtenu dans la première partie nous a alors permis de calculer les magnitudes absolues des galaxies.

Probablement le point le plus délicat du projet a consisté en l'estimation de la masse stellaire pour chaque galaxie. Pour ce faire, nous avons créé un modèle très simplifié de population stellaire dans lequel nous avons réduit une galaxie à sa séquence principale. Il existe des modèles permettant d'estimer la masse, la luminosité et le nombre initial des étoiles le long de cette séquence (ZAMS). On peut simuler des galaxies plus ou moins évoluées en supprimant ou en gardant les étoiles les plus bleues de la séquence (ce sont des étoiles très brillantes ayant une courte durée de vie). On peut ainsi créer des mixes d'étoiles plutôt jeunes ou plutôt âgées et estimer pour chacun d'eux sa couleur globale ainsi que la masse et la luminosité moyenne de ses étoiles. A l'inverse, en mesurant l'indice de couleur d'une galaxie, on peut retrouver l'éclat et la masse d'une « étoile moyenne » de cette galaxie.

La figure ci-jointe montre la relation entre l'indice de couleur d'une galaxie et la magnitude absolue de son « étoile moyenne » selon notre modèle simplifié.

INDICE DE COULEUR VS. MAGNITUDE ABSOLUE MOYENNE

Pour une séquence principale



Grâce à ce modèle, il est ainsi possible d'estimer le nombre d'étoiles et la masse stellaire pour une galaxie de couleur et de magnitude absolue donnée. C'est donc ce que nous avons fait pour les 112 galaxies de notre échantillon photométrique. A noter que, dans ce projet, nous n'avons tenu compte ni du gaz ni de la poussière inter-stellaire / inter-galactique.

Au passage, il est intéressant de remarquer que si la lumière d'une galaxie vient essentiellement de ses grosses étoiles, la grande majorité de la masse stellaire est contenue dans les naines rouges. La masse moyenne d'une étoile de l'univers est de l'ordre de 10% de la masse solaire.

Ce travail nous a permis d'estimer la masse stellaire de chacune des 112 galaxies principales de l'amas ainsi que leur somme que nous évaluons à $5,3 \times 10^{12}$ (5 mille milliards) de masses solaires, ou bien encore une centaine de fois la masse stellaire de notre Galaxie.

Rapport masse sombre sur masse visible

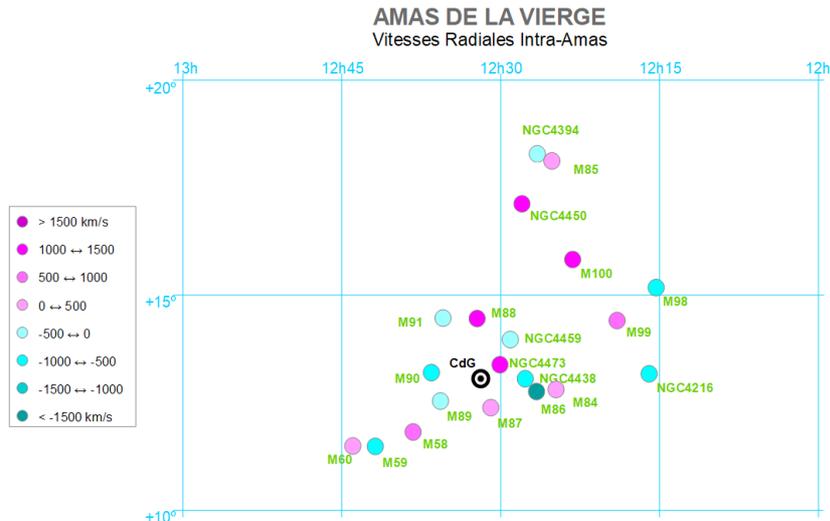
En comparant les résultats des deux parties, on arrive à un rapport masse sombre / masse visible de 110 fois. Il est donc clair, comme l'avait montré Fritz Zwicky, que la masse sombre prédomine largement dans l'amas de la Vierge.

Bien entendu, notre étude est pleine de simplifications et raccourcis, mais les grands traits de la composition de l'amas de la Vierge sont néanmoins bien esquissés.

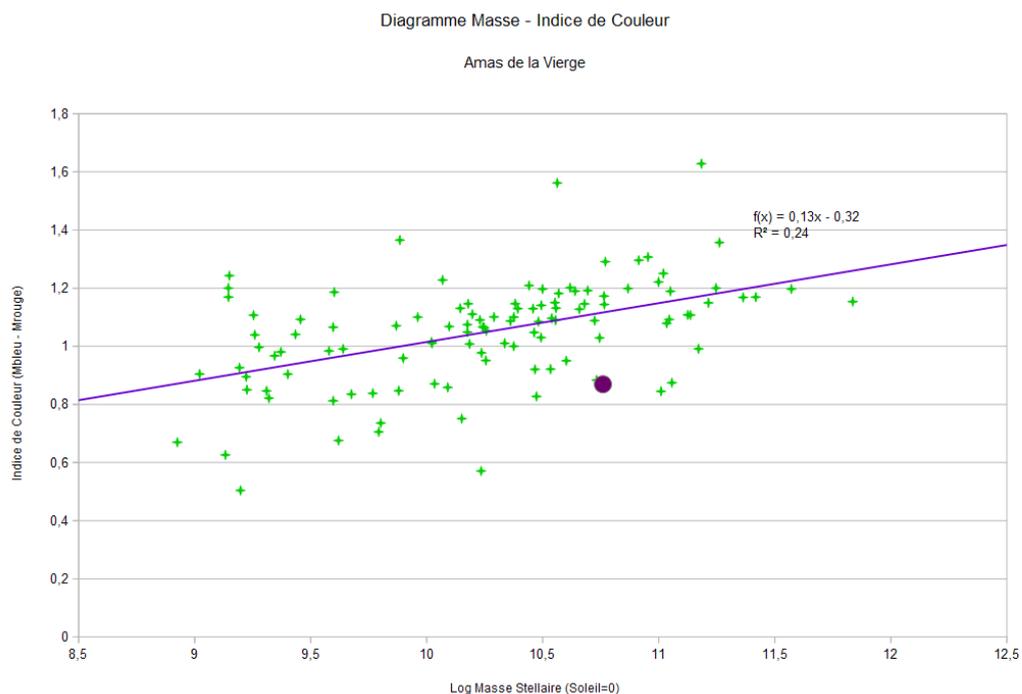
Autres résultats

Au passage, ce projet nous permet d'atteindre quelques autres résultats intéressants :

- Le diamètre de l'amas est d'environ 3,5 Mpc (11 millions d'année-lumière). Ce chiffre est à rapprocher de celui de notre Groupe Local dont la taille est de 3 Mpc, soit sensiblement similaire. En revanche, nos observations montrent que l'amas Nord de la Vierge est environ 300 fois plus massif que le Groupe Local.
- La direction du centre de gravité de la matière visible de l'amas Nord se situe environ aux coordonnées RA : 12h30,4 DEC : +13,0°, soit dans le triangle formé par M86, M87 et



- L'amas ne semble pas animé d'un mouvement de rotation d'ensemble comme on peut s'en rendre compte sur le diagramme montrant les vitesses radiales intra-amas pour les 20 galaxies mesurées. En effet, un mouvement de rotation global se remarquerait par une séparation des couleurs cyan et magenta de part et d'autre d'un axe de la figure, ce qui ne semble pas être le cas. La cible noire symbolise la direction du centre de gravité de la masse stellaire.
- Notre Galaxie, avec une magnitude absolue estimée à -20.4 , est dans le peloton de tête des galaxies les plus lumineuses. De notre échantillon photométrique, seules 20% des galaxies de la Vierge sont plus brillantes, mais il faut tenir compte du fait que notre étude s'est limitée aux galaxies les plus brillantes de l'amas. Si l'on inclut les estimations d'une population totale de l'ordre de 1500-2000 galaxies dans cet amas, alors notre Galaxie se situe dans le top 1% des galaxies (au moins dans l'univers local).
- Il est possible de tracer un diagramme Masse Stellaire vs Indice de Couleur pour les 112 galaxies principales de l'amas : c'est ce que présente la figure ci-contre. On y voit que, dans la Vierge, les galaxies massives sont essentiellement rouges (donc plutôt sans étoiles jeunes) et que dans notre échantillon, la plage des masses est dans un rapport pratiquement 1000 entre les galaxies les plus et les moins massives. Pour mémoire, notre Galaxie serait représentée par le cercle mauve sur ce diagramme.



Conclusions

Ce projet démontre que l'équipement et les connaissances accessibles à la communauté des amateurs est tout à fait suffisant pour réaliser des mesures astrophysiques intéressantes. Il nous a permis d'aboutir à des conclusions en accord avec les résultats professionnels. Au delà des résultats, ce projet a constitué une vraie source de motivation et d'apprentissage en commun : de la photométrie couleur à la spectroscopie en passant par la création de modèles divers et variés... bref de la science en amateur !