

کهکشان‌های کوتوله‌ی خوشه‌ی کهکشانی گیسو در موند (MOND)

بنفشه رنجبر^۱، حسین حقی^۲، حبیب خسروشاهی^۳، مهدی خاکیان قمی^۴

^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر
^۲ دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
 پژوهشگاه دانش‌های بنیادی
^۴ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله سرعت پخشی درونی کهکشان‌های کوتوله‌ی خوشه‌ی کهکشانی گیسو را در دو چهارچوب نیوتونی و موندی و بدون در نظر گرفتن ماده‌ی تاریک محاسبه و با نتایج رصدی کروکچی و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه کردیم. برای مؤلفه‌ی ستاره‌ای، نسبت جرم-به-درخشندگی را در بازه‌ی ۱ تا ۴ که در مدل‌های ستر جمعیت ستاره‌ای معقول به‌نظر می‌رسند، تغییر می‌دهیم. نتایج ما نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن اثر میان خارجی (EFE) از بین ۷۱ کهکشان مطالعه شده، علی‌رغم نزدیک‌تر بودن نتایج موند به رصد نسبت به نتایج نیوتنی، سرعت پخشی تنها ۸ کوتوله با نتایج موند سازگار است. بنابراین نتیجه می‌گیریم که در نظریه‌ی موند و صرفاً با در نظر گرفتن ماده‌ی ستاره‌ای، امکان توصیف دینامیک درونی کوتوله‌ها وجود ندارد و احتمالاً در نظر گرفتن سهمی از ماده‌ی تاریک اجتناب‌ناپذیر است و یا اینکه مدل جایگزین دیگری برای ماده‌ی تاریک باید پیدا شود.

سرعت پخشی در گرانش نیوتونی و موندی

خوشه‌ی گیسو پرجمعیت‌ترین و چگال‌ترین خوشه‌ی کیهانی نزدیک به ما است، که آن را به انتخاب مناسبی برای مطالعه‌ی کهکشان‌های کوتوله تبدیل می‌کند. در مجموع کهکشان‌های کوتوله، در گرانش نیوتونی و در غیاب ماده‌ی تاریک، گستره‌ی وسیعی از نسبت‌های جرم-به-درخشندگی را پوشش می‌دهند. البته اغلب این کوتوله‌ها، روشنایی سطحی کم و شتاب‌های داخلی کوچکی دارند؛ بنابراین اختلاف جرم دینامیکی و جرم باریونی مشاهده‌پذیر آنها قابل توجه است با توجه به این دلایل، این اجرام آزمون‌های مهمی برای نظریه‌هایی چون ماده‌ی تاریک و موند (یا هر نظریه‌ی گرانش تعمیم‌یافته‌ی دیگری) به شمار می‌آیند.^[۱] در این مقاله جرم کوتوله‌ها، تنها با استفاده از داده‌های نورسنجی و در نظر گرفتن نسبت‌های جرم-به-درخشندگی در محدوده‌ی معقول ۱ تا ۴، به دست آمدند. روابط لازم برای محاسبه‌ی سرعت‌های پخشی این کوتوله‌ها در چهارچوب‌های نیوتونی و موندی بدون در نظر گرفتن ماده‌ی تاریک، در ادامه آمده است.

سرعت پخشی خط دید (LOS) نیوتونی، در مدل پلامر توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد^[۲]

$$\sigma_{N,LOS} = 0.36 \sqrt{\frac{GM}{R_h}} \quad (1)$$

که R_h معرف شعاع نیمه-روشنایی سه‌بعدی کوتوله است.

سرعت پخشی در موند در دو رژیم مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱- رژیم منزوی، که میدان گرانشی داخلی سیستم، دینامیک آن را تعیین می‌نماید. ۲- رژیم EFE که اثر یک میدان گرانشی خارجی (به عنوان مثال از طرف کهکشان مجاور و یا میدان متوسط بقیه‌ی کهکشان‌های خوشه) بر دینامیک سیستم غالب است.

در رژیم منزوی موند، با فرض سیستمی همسانگرد و ایزوله (ممکن است در حالت عام درست نباشد)، می‌توان سرعت پخشی مجزوری میانگین $\langle V^2 \rangle$ را مساوی ضریب ۳ از سرعت پخشی LOS، $3\sigma_{iso,LOS}^2$ ، در نظر گرفت. بدین ترتیب با به‌کار گرفتن رابطه‌ی ویریال در موند عمیق، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید

$$\sigma_{iso,LOS} = \left(\frac{4}{81} GMa_0 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

تخمین موند در رژیم EFE با فرض برقراری شرط $a_0 \gg g_{ex}$ ، رابطه‌ی زیر را برای سرعت پخشی به دست می‌دهد

$$\sigma_{efe,LOS}^4 = \sigma_{N,LOS}^4 \left(\frac{a_0}{g_{ex}} \right)^2 \quad (3)$$

g_{in} شتاب داخلی سیستم نسبت به مرکز جرم آن است. $g_{ex} = \frac{V_{coma}^2}{D_{dwarf}}$ نیز معرف شتاب سقوط آزاد جرم، در میدان گرانشی

خارجی است. در رابطه‌ی شتاب خارجی، D_{dwarf} برابر فاصله‌ی هر کهکشان کوتوله تا مرکز خوشه‌ی گیسو است و سرعت چرخشی

این خوشه نیز حدود $v_{coma}^2 \approx 1000 \text{ km s}^{-1}$ برآورد شده است. در حد شتاب‌های داخلی بسیار کوچک رابطه‌ی (۴)، اهمیت EFE را روشن می‌کند.

داده‌های رصدی

سرعت‌های پخشی رصدی ۷۱ کهکشان خوشه‌ی کهکشانی گیسو در محدوده‌ی قدرهای $15 < M_R < 21$ ، به همراه داده‌های نورسنجی آنها توسط کروچی و همکاران (۲۰۱۱) فراهم آمده است. این سرعت‌های پخشی داخلی، با بهره‌گیری از تفکیک بالای طیف‌نگار DEIMOS بر روی تلسکوپ Keck II اندازه‌گیری شده‌اند.^[۷] در جدول (۱) نتایج رصد و نتایج محاسبات نیوتونی و موندی در هر دو رژیم منزوی و EFE برای ۵ مورد به عنوان نمونه آمده است.

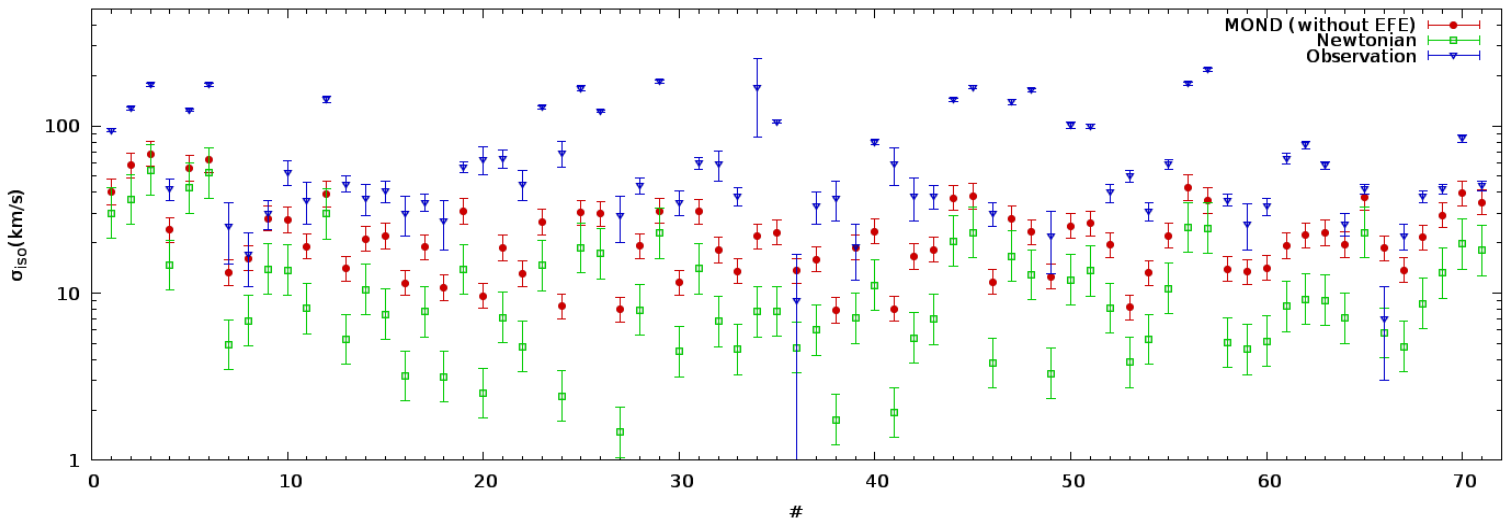
جدول ۱: سرعت‌های پخشی رصدی کهکشان‌های کوتوله‌ی خوشه‌ی کهکشانی گیسو^[۷] به همراه پیش‌بینی‌های نیوتونی^[۹] و موند در دو رژیم منزوی^[۱۰] و EFE^[۱۱]. این مقادیر برای $M_*/L = 2_{-1}^{+2}$ محاسبه گردیده‌اند. فقط اطلاعات ۵ کوتوله به عنوان نمونه در جدول آمده است. لازم به تأکید است که خطاهای سرعت‌های پخشی محاسبه‌شده، ناشی از خطای سیستماتیک نیستند؛ بلکه حدهای بالا و پایین، به ترتیب تفاضل سرعت‌های پخشی متناظر با $M_*/L = 4$ و $M_*/L = 1$ است.^[۱] در ستون ۵ درخشندگی سطحی متناظر با قدر مطلق است.

#	بعد J2000 [۲]	میل J2000 [۳]	μ_e Mag/arcsec ² [۴]	R_e Kpc [۵]	CZ km s^{-1} [۶]	σ_{obs} km s^{-1} [۷]	$\Delta\sigma_{\text{obs}}$ km s^{-1} [۸]	σ_{N} km s^{-1} [۹]	σ_{iso} km s^{-1} [۱۰]	σ_{efe} km s^{-1} [۱۱]	g_{in} (a_0) [۱۲]	g_{ex} (a_0) [۱۳]
۷	۱۳:۰۰:۳۷.۳۰	۲۷:۵۴:۴۱.۱۰	۲۳	۰.۶۶	۵۸۹۵	۲۵	۱۰	$13.2_{-2.1}^{+2.5}$	$36.9_{-1.8}^{+2.1}$	۰.۰۵۶	۰.۰۱۸	
۸	۱۳:۰۰:۳۶.۶۰	۲۷:۵۵:۵۲.۰۰	۲۲.۵	۰.۷۵	۵۹۴۴	۱۷	۶	$16.1_{-2.1}^{+2.1}$	$50.1_{-1.5}^{+1.8}$	۰.۰۹۵	۰.۰۱۹	
۱۰	۱۳:۰۰:۳۴.۴۰	۲۷:۵۶:۰۵.۰۰	۲۲.۵	۱.۵۶	۸۶۵۳	۵۳	۹	$13.7_{-2.1}^{+2.1}$	$113.6_{-4.1}^{+4.1}$	۰.۱۸۵	۰.۰۱۱	
۱۱	۱۳:۰۰:۱۳.۳۰	۲۷:۵۸:۴۹.۰۰	۲۲.۹	۱.۰۵	۵۱۲۶	۳۶	۱۰	$8.1_{-2.5}^{+2.1}$	$8.3_{-2.5}^{+1.1}$	۰.۰۹۵	۰.۰۱۰	
۱۲	۱۳:۰۰:۲۸.۰۰	۲۷:۵۷:۲۲.۰۰	۲۰.۴	۱.۳۸	۷۰۰۹	۱۴۴	۷	$29.8_{-8.7}^{+11.2}$	$64.8_{-19.0}^{+21.8}$	۰.۹۸۵	۰.۰۲۱۲	

نتیجه‌گیری

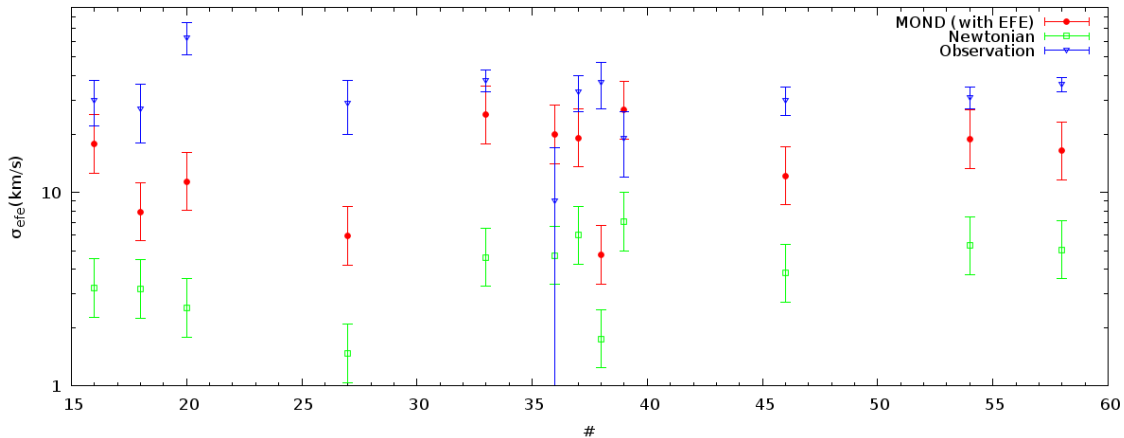
در ۶۸ مورد از ۷۱ کهکشان کوتوله، مقدار g_{in} زیر حد شتاب موند قرار داشت که به این مفهوم است که باید دینامیک آنها در چهارچوب موندی توصیف شود. برای ۳۱ کهکشان کوتوله نیز مقادیر g_{ex} قابل محاسبه بوده است. از این رو در هر دو رژیم منزوی و EFE مجموعه‌ی مناسبی برای آزمودن موند در اختیار قرار داشت. در ادامه پیش‌بینی‌های سرعت‌های پخشی نیوتونی و موندی با نتایج رصدی، در رژیم‌های منزوی و EFE به صورت مجزا مقایسه شدند.

مطابق شکل (۱)، نتایج سرعت پخشی موند در رژیم منزوی نسبت به نتایج نیوتونی، بدون در نظر گرفتن ماده‌ی تاریک، به رصد نزدیک‌تر است. با این وجود از بین ۷۱ کهکشان کوتوله، تنها ۸ مورد با نتایج رصدی در محدوده‌ی عدم قطعیت‌ها سازگار هستند.



شکل ۱: سرعت‌های پخشی رصدی ۷۱ کهکشان کوتوله‌ی خوشه‌ی کهکشانی گیسو با رنگ آبی، مقادیر حاصل از پیش‌بینی‌های نیوتونی به رنگ سبز و پیش‌بینی‌های موند در رژیم منزوی به رنگ قرمز بر حسب شماره‌ی شناسه‌ی کوتوله‌ها. خطاهای پخشی محاسبه‌شده، ناشی از خطای سیستماتیک نیست، بلکه حد بالا سرعت پخشی به ازای $M_*/L = 4$ و حد پایین به ازای $M_*/L = 1$ است. محور عمودی در مقیاس لگاریتمی رسم شده است.

برای محاسبه‌سی سرعت پخشی در حضور میدان خارجی، EFE، نیاز به محاسبه‌ی g_{ex} داشتیم. برای این منظور داده‌های انتقال به سرخ ۳۱ مورد از ۷۱ کوتوله در دسترس قرار داشت. تنها در ۱۲ مورد از ۳۱ مورد شرط $a_0 > g_{in} > g_{ex}$ برقرار بود. با این حال مطابق شکل (۲) فقط ۵ مورد از این ۱۲ کوتوله با نتایج رصدی در محدوده‌ی عدم قطعیت‌ها سازگار هستند (۲ مورد از این ۵ مورد در هر دو رژیم سازگار هستند).



شکل ۲: سرعت‌های پخشی اندازه‌گیری‌شده‌ی کهکشان‌های کوتوله‌ی خوشه‌ی کهکشانی گیسو با رنگ آبی به همراه پیش‌بینی‌های نیوتونی به رنگ سبز و نتایج موندی در رژیم EFE به رنگ قرمز بر حسب شماره‌ی شناسه‌ی کوتوله‌ها. تنها ۱۲ موردی که شرط میدان خارجی غالب در آنها برقرار است، بررسی شده‌اند. خط‌های سرعت‌های پخشی مطابق قواعد شکل (۲) است. محور عمودی در مقیاس لگاریتمی رسم شده است.

مک‌گوخ و میلگروم (۲۰۱۳)، بررسی مشابهی بر روی دینامیک درونی کهکشان‌های کوتوله‌ی کروی آندرومدا انجام داده‌اند، که بسیار موفق بوده است. در مجموع، با در نظر گرفتن هر دو رژیم موند، سرعت‌های پخشی ۲۳ مورد از ۲۶ کوتوله، حداقل با یکی از چهار نمونه‌ی نتایج رصدی در دسترس، سازگاری خوبی دارند (برای ناسازگاری مدل با برخی نمونه‌های داده‌های رصدی، دلایلی چون تعداد بسیار کم اعضای رصد شده، موقعیت تیم رصدی نسبت به کهکشان و یا بهبود داده‌ها با پیشرفت تکنولوژی عنوان شده است).^[۴]

به دنبال این موفقیت، به تازگی مقاله‌ای برای بررسی مجدد کوتوله‌های کهکشان راه‌شیری منتشر شده است. در این مقاله اثر EFE کهکشان راه‌شیری بر همه‌ی کوتوله‌ها لحاظ شده است. سرعت‌های پخشی ۲ کوتوله از ۵ کوتوله با دینامیک موند سازگاری دارند، در حالی که ۳ کوتوله‌ی دیگر مقادیر کوچک‌تری را در مقایسه با سرعت‌های پخشی رصدی نشان می‌دهند. بنابراین یا امکان توصیف درستی از EFE در نظریه وجود ندارد و یا این کوتوله‌ها با میدان کشندی کهکشان راه‌شیری در تعادل ویریالی نیستند.^[۵]

در این مقاله نیز نشان داده شد که در خوشه‌ی کهکشانی گیسو، در رژیم منزوی موند، سرعت پخشی تنها ۸ کوتوله از ۷۱ کوتوله و در رژیم EFE موند، سرعت پخشی ۵ کوتوله از ۱۲ کوتوله با نتایج رصدی در توافق است. در کل فقط ۱۱ کوتوله از مجموع ۷۱ کهکشان با رصد سازگار هستند. بنابراین نتیجه می‌گیریم که تنها با در نظر گرفتن ماده‌ی ستاره‌ای، نمی‌توان دینامیک درونی کهکشان‌های کوتوله‌ی خوشه‌ی گیسو را توسط موند پیش‌بینی کرد. از این رو یا باید سهمی به ماده‌ی تاریک اختصاص داده شود و یا برای توصیف دینامیک کوتوله‌های این خوشه، مدل جایگزین دیگری برای ماده‌ی تاریک پیدا شود.

مرجع‌ها

۱. Famaey B., McGaugh S., 2012, *arXiv*, **1112.3960v2**
۲. Hagi .H, Baumgardt .H, Kroupa P., Grebel E. K., Hilker M., Jordi K., 2009, *MNRAS*, **395**,1549
۳. Kourkchi E., Khosroshahi H.G., Carter D., Mobasher B. , 2012, *MNRAS*, **420**, 2835
۴. McGaugh .S, Milgrom .M, 2013, *The Astrophysical Journal*, **766**, 22
۵. Lüghausen F., Famaey B., Kroupa P., 2014, *arXiv*, **1404.4049v1**