

اثر متغیر بودن سرعت پراکندگی ستاره‌ها با عرض جغرافیایی کهکشانی در تفسیر نتایج رصدی رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی

صدیقه سجادیان^۱ و سهراب راهوار^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

پست الکترونیکی: s.sajadian@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹)

چکیده

کهکشان ما یک کهکشان مارپیچی است و ستاره‌های آن درون یک قرص نازک حول هسته کهکشان می‌چرخند. سرعت پراکندگی ستاره‌ها درون قرص کهکشان در راستای عمود بر قرص تابعی از عرض جغرافیایی کهکشانی است و با افزایش فاصله از قرص کهکشان کاهش می‌یابد. در مدل کهکشانی بوزانسون، از وابستگی سرعت پراکندگی ستاره‌ها به عرض جغرافیایی صرف نظر می‌شود و سرعت پراکندگی را تنها تابعی از سن ستاره‌ها در نظر می‌گیرند. در تفسیر داده‌های رصدی رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی اغلب از مدل بوزانسون استفاده می‌شود و با در نظر گرفتن تابع توزیع توانی برای جرم در قرص کهکشان، شاخص توانی این تابع را تعیین می‌کنند. در این مقاله نشان می‌دهیم که نادیده گرفتن تغییرات سرعت پراکندگی با عرض جغرافیایی کهکشانی باعث می‌شود به کمک ریزهمگرایی گرانشی تعداد اجرام سبک‌تر درون قرص کهکشان بیشتر از واقعیت تخمین زده شود.

واژه‌های کلیدی: ریزهمگرایی گرانشی، سرعت پراکندگی ستاره‌ها، رصد ریز همگرایی گرانشی

۱. مقدمه

هرگاه نور یک ستاره پس‌زمینه از میدان گرانشی یک جسم سنگین زمینه عبور کند، در اثر گرانش مسیر حرکت نور به سمت مرکز گرانشی خم می‌شود و در نتیجه یک یا چند تصویر از ستاره پس‌زمینه ایجاد می‌شود، که به آن همگرایی گرانشی^۱ می‌گویند. هرگاه یک رویداد همگرایی گرانشی در ابعاد کهکشان ما رخ دهد، یعنی ستاره چشمه درون هسته کهکشان باشد و

عدسی نیز درون قرص کهکشان، به طوری که هر دو را بتوان نقطه‌ای در نظر گرفت، در این صورت از ستاره چشمه دو تصویر ایجاد می‌شود که فاصله جدایی آنها بسیار کوچک‌تر از آن است که حتی با تلسکوپ‌های فضایی دیده شود. بنابراین ما نور مجموع تصاویر را دریافت می‌کنیم که نسبت به خود ستاره چشمه تقویت شده است. به این رویداد، ریزهمگرایی گرانشی^۲ می‌گویند [۱].

۲. Gravitational microlensing

۱. Gravitational lensing

با افزایش فاصله از قرص کهکشان کاهش یابد و در یک فاصله‌ای از قرص صفر شود و ستاره دوباره به داخل قرص برگردد. به عبارتی ستاره‌ها در راستای عمود بر قرص نوسان می‌کنند. در این مقاله، ما اثر نادیده گرفتن این تغییرات در سرعت پراکندگی را بر روی تفسیر نتایج رصدی رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی، به ویژه برای تعیین چگالی تعداد ستاره‌ها، بررسی می‌کنیم.

۱.۱. تغییرات مؤلفه سرعت پراکندگی ستاره‌ها در

راستای عمود بر قرص کهکشان

سرعت پراکندگی ستاره‌ها بر اساس معادله بدون برخورد بولتزمن و با توجه به پتانسیل گرانشی قرص کهکشان تعیین می‌شود. تابع پتانسیل گرانشی قرص کهکشان را نیز می‌توان با توجه به چگالی آن و استفاده از معادله پواسون به دست آورد [۹]. این دو معادله در زیر آمده‌اند:

$$\sigma_w^2 \ln \left(\frac{\rho(R, z)}{\rho(R, 0)} \right) = \phi(R, z) - \phi(R, 0), \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi(x, y, z) = 4\pi G \rho(x, y, z), \quad (2)$$

که در آنها ρ و ϕ به ترتیب پتانسیل گرانشی و چگالی جرمی قرص کهکشان در یک نقطه دلخواه هستند. σ_w سرعت پراکندگی است. برای به دست آوردن وابستگی سرعت پراکندگی به فاصله عمودی از قرص کهکشان که با عرض جغرافیایی کهکشانی داده می‌شود، ابتدا یک تابع توزیع برای چگالی کهکشان در نظر می‌گیریم و با تخمین میزان پتانسیل گرانشی در هر نقطه (که با R, z داده می‌شود) می‌توانیم سرعت پراکندگی ستاره‌ها را در آن نقطه تخمین بزنیم. چگالی قرص کهکشان را تابعی با تقارن استوانه‌ای، در نظر می‌گیریم [۹]:

$$\rho(R, z) = \frac{\delta}{2H} \exp \left[-\frac{(R - R_\odot)}{h} \right] \exp \left(-\frac{|z|}{H} \right), \quad (3)$$

که در آن H و h طول مقیاس در راستای عمود و مماس بر صفحه قرص کهکشان هستند. همچنین δ میزان چگالی ستونی قرص در مکان خورشید است. با حل عددی این دو معادله که

سه گروه مسأحه کننده و رصدی، 1 OGLE، 2 MOA، 3 KMTNet، سالیانه بیش از ۲۰۰۰ رویداد ریزهمگرایی گرانشی به سمت هسته کهکشان کشف می‌کنند [۲-۴]. مهم‌ترین هدف رصد رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی در حال حاضر کشف سیارات فراخورشیدی حول ستاره‌های دور دست است. ریزهمگرایی گرانشی، برای آشکارسازی سیارات کم جرم که در فاصله از مرتبه چند کیلوپارسک از ما قرار دارند، روشی توانمند است [۵].

اما این تنها نتیجه رصد رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی نیست. از آنجایی که رصد رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی به صورت مسأحه کل آسمان صورت می‌گیرد، پس می‌توان با مقایسه نتایج رصد و نتایج شبیه‌سازی، مدل‌های کهکشانی موجود را مورد آزمون قرار داد و یا برخی پارامترهای آزاد درون مدل‌ها را تعیین کرد. برای مثال اولین هدف از رصد رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی تعیین کسری از هاله کهکشان بود که از اجرام سنگین، تاریک و فشرده^۴ تشکیل شده است. این اجرام به عنوان یک کاندید برای ماده تاریک بودند. با انجام رصد این رویدادها و مقایسه نتایج رصدی با شبیه‌سازی بر اساس مدل‌های کهکشانی، کسر این اجرام در هاله کهکشان کمتر از ۲۰ درصد تخمین زده شد [۶ و ۷].

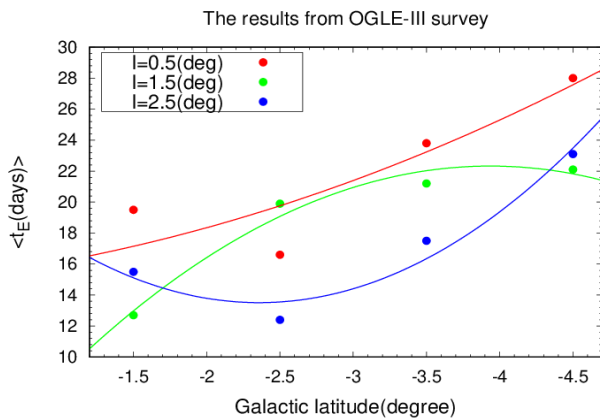
نکته بسیار مهم این است که در حین مقایسه مدل با نتایج رصدی باید به تمامی جزئیات درون مدل توجه شود، زیرا در نظر نگرفتن یکی ممکن است بر روی قیدهای به دست آمده تأثیرگذار باشد. یکی از این جزئیات، سرعت پراکندگی ستاره‌ها درون قرص کهکشان است. ستاره‌های درون قرص کهکشان علاوه بر چرخش حول مرکز کهکشان، سرعت‌های پراکندگی نیز دارند که ناشی از برهم‌کنش آنها با دیگر ستاره‌ها و یا چگالی کل قرص است. سرعت پراکندگی اجرام درون قرص کهکشان در راستای عمود بر قرص در مدل کهکشانی بوزانسون [۸] ثابت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که این سرعت باید

۱. Optical Gravitational Lensing Experiment

۲. Microlensing Observations in Astrophysics

۳. Korea Microlensing Telescope Network

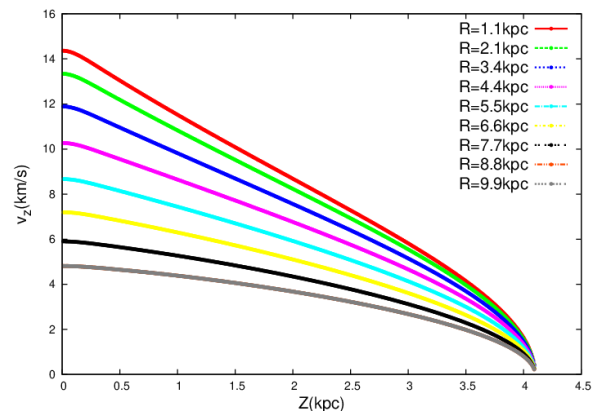
۴. Massive Compact Halo Objects (MACHOs)



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) متوسط زمان عبور انیشتین رویداد های ریزهمگرایی گرانشی دیده شده توسط گروه OGLE که در آنها ستاره چشمه بسیار روشن است، بر حسب عرض جغرافیایی کهکشانی، در سه راستای مختلف.

کمتر می شود، بنابراین میزان آمیختگی نیز کمتر می شود. رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی رصد شده که اثر آمیختگی در آنها زیاد است زمان عبور انیشتین نیز طولانی تر است. این اثر سهم بیشتری نسبت به سرعت پراکندگی ستاره‌ها در تعیین متوسط زمان عبور انیشتین دارد. اگر این اثر را حذف کنیم و رویدادهایی را در نظر بگیریم که آمیختگی در آنها یکسان است، در اثر تغییر سرعت پراکندگی با عرض جغرافیایی کهکشانی، زمان عبور انیشتین نیز باید با عرض جغرافیایی تغییر کند. برای بررسی این موضوع، از رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی دیده شده توسط گروه مساحی کننده [۱۱] OGLE-III، آنهایی که ستاره چشمه درخشان تر از قدر ۱۹ در I-band است را انتخاب کرده ایم (برای این رویدادها قطعاً اثر آمیختگی بسیار ناچیز خواهد بود). متوسط زمان عبور انیشتین آنها را بر حسب عرض جغرافیایی کهکشانی رسم کرده ایم.

برای سه راستای مختلف داده‌ها نشان داده شده‌اند. برای هر راستا به داده‌ها یک منحنی درجه دو برازش شده است که با رنگ همان داده‌ها مشخص شده است. هر سه منحنی افزایشی هستند. همان طور که می‌بینید این زمان با افزایش فاصله از قرص کهکشان افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از قرص کهکشان سرعت نسبی ستاره چشمه - عدسی



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات سرعت پراکندگی بر حسب فاصله عمودی تا قرص کهکشان در فواصل مختلف نسبت به مرکز کهکشان.

در روابط (۱) و (۲) آمده است نحوه تغییرات سرعت پراکندگی با فاصله عمودی از قرص کهکشان به دست می‌آید، که در شکل ۱ رسم شده است.

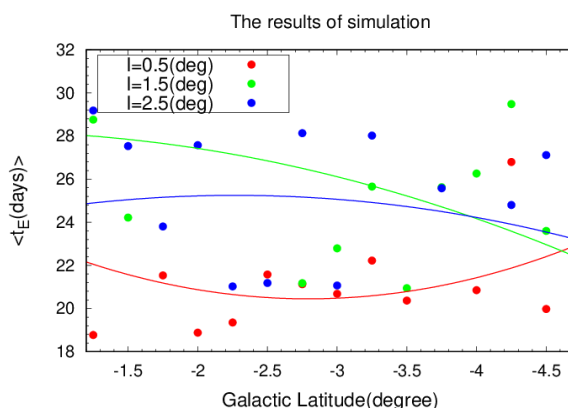
تغییرات سرعت پراکندگی با مؤلفه عمودی فاصله از قرص کهکشان باعث می‌شود که سرعت نسبی ستاره - عدسی در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی و به دنبال آن زمان عبور انیشتین تابعی از مؤلفه عمودی فاصله از قرص شوند.

۲.۱. زمان عبور انیشتین رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی بر حسب عرض جغرافیایی کهکشانی

یک پارامتر مهم دیگر در تعیین وابستگی زمان عبور انیشتین بر حسب عرض جغرافیایی کهکشانی نیز وجود دارد، که پارامتر آمیختگی است [۱۰]. آمیختگی یعنی میزان آمیخته شدن نور ستاره چشمه با نور ستاره‌های مجاورش به طوری که درون تصویر نجومی گرفته شده قابل تشخیص نباشد و با پارامتر زیر مشخص می‌شود:

$$b = \frac{F_*}{F_{bg}}, \quad (4)$$

که در آن F_{bg} و F_* به ترتیب شار دریافتی از ستاره چشمه و کل شار دریافتی از آسمان در مکان ستاره چشمه هستند. هر چه از قرص کهکشان فاصله می‌گیریم، تراکم ستاره‌ها



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) متوسط زمان عبور انیشتین رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی شبیه‌سازی شده براساس مدل کهکشانی بوزانسون بر حسب عرض جغرافیایی کهکشانی.

نشود، متوسط زمان عبور انیشتین بیشتر خواهد بود.

۳.۱. اثر مخرب بر روی تفسیر نتایج

همه گروه‌های رصدی نتایج رصد خود را در پایان چندین فصل رصدی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌کنند و برای کمیت‌های مشاهده‌پذیر با کمینه کردن اختلاف‌ها برخی پارامترهای مدل را تعیین می‌کنند. برای مثال این مراجع را ببینید [۱۵ و ۱۶]. نادیده گرفتن وابستگی سرعت پراکندگی به عرض جغرافیایی کهکشانی باعث می‌شود که تفسیر نتایج رصدی با اشتباه همراه شود. یکی از مهم‌ترین تفسیرهای رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی تعیین تابع توزیع جرمی اجرام درون قرص کهکشان است. برای این منظور تابع توزیع زمان عبور انیشتین رصد شده را با مشابه مدل آن مقایسه می‌کنند. یک یا چند پارامتر آزاد در مدل در نظر می‌گیرند که از مقایسه این دو و کمینه کردن اختلاف بین این دو، آن پارامتر را مقید می‌کنند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل جهت مقایسه رصد با شبیه‌سازی توان در تابع توزیع جرمی درون قرص کهکشان است [۱۷]. اگر چنانچه مدل به خوبی توصیف نشده باشد این توان نیز اشتباه به دست خواهد آمد و در این صورت تفسیر ما از اجرام درون قرص کهکشان با اشتباه همراه خواهد شد.

در شبیه‌سازی، وقتی وابستگی مؤلفه سرعت پراکندگی در

کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از کم شدن سرعت پراکندگی ستاره‌ها با افزایش فاصله از قرص کهکشان است.

برای اثبات این ادعا، ما یک شبیه‌سازی انجام داده‌ایم و در آن با شبیه‌سازی قرص و هسته کهکشان بر اساس مدل کهکشانی بوزانسون رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی را تولید می‌کنیم. تمامی جزئیات شبیه‌سازی در مراجع [۱۲-۱۴] آمده است و از بیان این جزئیات در اینجا خودداری می‌کنیم. با در نظر گرفتن تابع احتمال رصد رویدادها بر حسب زمان عبور انیشتین که توسط گروه رصدی III-OGLE به دست آمده است [۱۱]، رویدادهای قابل مشاهده را جدا می‌کنیم. رویدادهای قابل مشاهده‌ای که ستاره چشمه درخشان‌تر از ۱۹ در I-band هستند را جدا کرده و متوسط زمان عبور انیشتین این رویدادها را بر حسب عرض جغرافیایی کهکشانی رسم می‌کنیم که در شکل ۳ آمده است:

برای سه راستای مشخص شده با طول جغرافیایی کهکشانی شبیه‌سازی تکرار شده است و برای هر راستا یک منحنی درجه دوم به داده‌ها برازش شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در صورتی که میزان وابستگی سرعت پراکندگی ستاره‌ها به عرض جغرافیایی در نظر گرفته نشود، زمان عبور انیشتین رویدادهای شبیه‌سازی شده تابعی افزایشی از عرض جغرافیایی کهکشانی نخواهند بود و تقریباً ثابت است. بنابراین اگر کم شدن سرعت پراکندگی عمودی با عرض جغرافیایی در نظر گرفته

ستاره‌های رشته اصلی درون قرص کهکشان باشد [۱۸]. یکی از مشکلات تفسیر نتایج رصدی گروه MOA، استفاده از مدل بوزانسون و در نتیجه نادیده گرفتن تغییرات سرعت پراکندگی با عرض جغرافیایی است.

۲. نتایج

در بالا نشان دادیم که یکی از مشکلات مدل بوزانسون نادیده گرفتن وابستگی سرعت پراکندگی به عرض جغرافیایی کهکشانی است. این مشکل باعث می‌شود که نتوانیم تخمین درستی از تابع توزیع جرمی درون قرص کهکشان بر اساس داده‌های ریزهمگرایی گرانشی داشته باشیم. در صورتی که این وابستگی نادیده گرفته شود، پیش‌بینی رصدی بر اساس آمار رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی، به تابع توزیعی برای جرم می‌رسد که اجرام سبک‌تر تعدادشان بیش از واقعیت است.

راستای عمود بر قرص با عرض جغرافیایی در نظر گرفته نشود، متوسط زمان عبور انیشتین به دست آمده از شبیه‌سازی بیشتر از متوسط زمان عبور انیشتین رصدی خواهد شد (دو نمودار بالا را با هم مقایسه کنید)، که برای جبران آن به ناچار باید تعداد اجرام سبک تر در قرص کهکشان را افزایش داد. به عبارتی به جای تصحیح سرعت پراکندگی آنها، فرض می‌شود که عدسی‌ها کم جرم‌تر هستند.

تفسیر نتایج رصدی گروه MOA در سال ۲۰۱۱ به همین روش منجر به پیش‌بینی وجود جمعیت زیادی از سیارات سرگردان در قرص کهکشان شد. این گروه اعلام کردند که به ازای هر ستاره در قرص کهکشان دو سیاره، آزاد و یا غیر مقید به هیچ ستاره‌ای وجود دارد [۱۷]؛ در حالی که در سال ۲۰۱۷ نتایج رصدی گروه OGLE این ادعا را رد کرد و آنها اعلام کردند، تعداد سیارات فراخورشیدی نمی‌تواند دو برابر تعداد

مراجع

1. B Paczynski, *ApJ*. **301** (1986) 503.
2. I Soszynski, A Udalski, and M K Szymanski, *et al.*, "The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE- III Catalog of Variable Stars. IX. RR Lyr Stars in the Small Magellanic Cloud", *AcA*. **60** (2010) 165.
3. I A Bond, F Abe, and R J Dodd, *et al.*, *MNRAS* **327** (2001) 868.
4. S L Kim, C -UK Lee, and B Park, *et al.*, *JKAS* **49** (2016) 37.
5. G Kim, N Safizadeh, *ApJ*. **500** (1998) 37.
6. T Lasserre, C Afonso, and J N Albert, *et al.*, *A & A*. **355** (2000) 39.
7. P Tisserand, L Le Guillou, and C Afonso, *et al.*, *A & A*. **469** (2007) 387.
8. A C Robin, C Reyle, S Derriere, and S Picaud, *A & A*. **409** (2003) 523.
9. J Binney and S Tremaine, "Galactic Dynamics",
10. P Vermaak, *MNRAS*, **319**, 4 (2000) 1011.
11. L Wyrzykowski, A E Rynkiewicz, and J Skowron, *et al.*, *ApJS*. 216 (2015) 12.
12. S Sajadian, *AJ*. **149** (2015) 4.
13. S Sajadian and P Radek, "Prediction on Detection and Characterization of Galactic Disk Microlensing Events by LSST", arXiv: 1806 (2018) 06372.
14. S Sajadian, *MNRAS* **452** (2015) 2587.
15. M Moniez, S Sajadian, and M Karami, *et al.*, *A & A*. **604** (2017) 124.
16. S Awiphan, E Kerins, and A C Robin, *MNRAS* **456** (2016) 166.
17. T Sumi, K Kamiya, and A Udalski, *Nature* **473** (2011) 349.
18. P Mroz, A Udalski, and J Skowron, *et al.*, *Nature* **548** (2017) 7666.