

فصل اول: مقدمه‌ای بر فیزیک اجرام سماوی

سهراب راهوار

دانشکده‌ی فیزیک دانشگاه صنعتی شریف

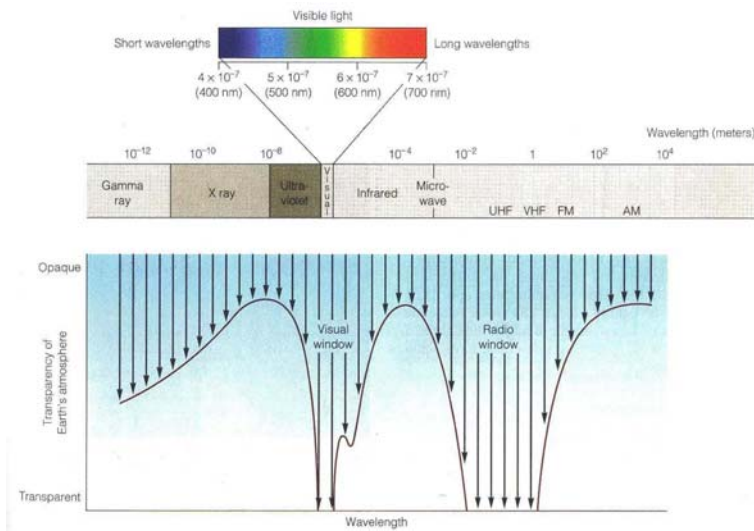
بهمن ۱۳۸۵

چکیده: در این فصل کلیات مفاهیم اخترفیزیکی مورد استفاده در کیهان‌شناسی معرفی خواهد شد.

۱ رصد کیهان

گستره وسیع امواج الکترومغناطیس از طول موج گاما تا رادیویی ناحیه‌ی رصد اجرام کیهانی می‌باشد. این رصدها بسته به طول موج دریافتی و قابلیت گذردهی جو می‌توانند بر روی سطح زمین و یا در خارج از جو زمین انجام گیرند. شکل (۱) عبوردهی جو زمین را برای طول موج‌های متفاوت نشان می‌دهد. به طوری که مشاهده می‌شود امواج الکترومغناطیس تنها در دو بازه رادیویی و مرئی با پهنای ۴۰۰۰ تا ۷۰۰۰ آنگستروم اجازه عبور از جو زمین را دارند.

با توجه به شکل (۱) ما تنها در دو گستره‌ی مرئی و رادیویی قادر به رصد کیهان از سطح زمین می‌باشیم و برای رصد در طول موج‌های دیگر ناگزیر به ارسال ماهواره به خارج از جو زمین هستیم. البته قرار دادن رصدخانه‌ها در ارتفاعات بالا می‌تواند بازه رصدی را در طیف مرئی افزایش دهد. به همین دلیل رصدخانه‌هایی که در ارتفاعات زیاد تاسیس می‌شوند، برای مطالعه اجرام در طیف ماوراء بنفش و مادون قرمز بسیار مناسب می‌باشند. برای گستره طول موج‌های بسیار کوچک نیز که انرژی‌های بسیار بالایی دارند، آشکارسازهای روی سطح زمین با آشکارسازی بهمن‌های تولید شده توسط فوتون‌پر



شکل ۱: پنجره گذر امواج الکترومغناطیس از جو زمین

انرژی اولیه می توانند وجود این فوتون ها را ثبت بکنند. البته در این روش ذرات علاوه بر فوتون های پر انرژی، ذرات پر انرژی کیهانی نیز می توانند مشاهده شود. این ذرات توسط مولدهای بسیار پر انرژی در داخل کهکشان و یا فرا کهکشان تولید شده و در نهایت به سطح زمین می رسند. آشکار سازی این نوع ذرات و ذرات با برهمکنش ضعیف مانند نوترینوها بر خلاف مشاهدات الکترومغناطیسی بر پایه ی آشکار سازهای فیزیک ذرات و فیزیک هسته ای کار می کنند.

پنجره ی امواج الکترومغناطیس می تواند بر نحوه به وجود آمدن و تکامل موجودات روی زمین نقش بسیار مهمی داشته باشد. مثلاً تنها در طول موج مرئی ساختارهایی در ابعاد سلول های مسئول فوتوسنتز می توانستند شکل بگیرند. مطالعه فسیل های مربوط به چشم موجودات در دوران گذشته نیز نشان می دهد، جو زمین در طول چند صد میلیون تغییراتی زیادی از خود نداشته، چرا که این تغییرات مستقیماً بر روی اندازه چشم به عنوان اتاق تاریک و دیافراگم چشم می توانست تاثیر داشته باشد. اندازه دیافراگم چشم به اندازه مناسب است تا پراش در ورود نور به چشم رخ ندهد. حال اگر تنها امواج رادیویی اجازه ورود به سطح زمین را داشتند، انتظار داشتیم اندامی به نام چشم در موجودات فرضی شکل نگرفته و تنها حس گرایی به بزرگی طول موج رادیویی بر روی این موجودات (از مرتبه طول موج روی زمین بر روی این موجودات) شکل بگیرد. حوزه ی مطالعات این نوع پژوهش ها را می توان در مقالات اختر-بیولوژی^۱ یافت.

(پروژه برای دانشجویان علاقه مند: با توجه به بیشینه تابش نور خورشید در طیف زرد، چشم تمامی موجودات خشکی می بایست به نور زرد حساسیت بیشتری داشته باشد. در مورد موجودات آبی بیشینه دریافت چشم در چه طول موجی می باشد؟ ابتدا با بررسی ضریب گذردهی آب این طول موج را حدس زده و با مقدار داده شده در کتاب های

^۱Astro-Biology

۲ مشاهدات مرئی: نورسنجی – طیفسنجی

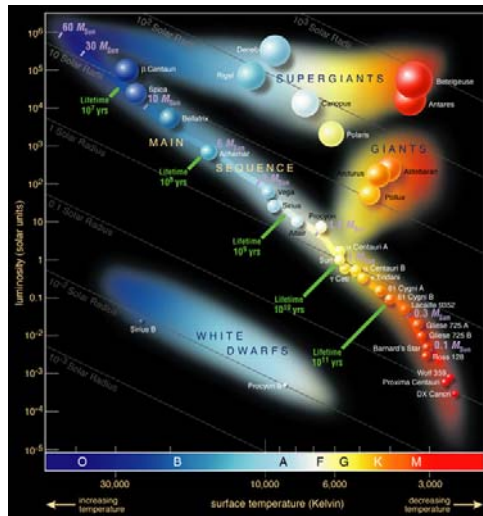
مشاهدات در طیف مرئی معمولاً در توسط تلسکوپ های از نوع کاسگرین و یا نیوتنی انجام می گیرد. هر دو تلسکوپ انعکاسی بوده ولی در حالت کاسگرین فاصله کانونی بلند و برای همین منظور پرتوهای نوری در راستای تلسکوپ توسط یک آینه ثانوی به سمت آینه اصلی برگردانده می شود. مهمترین وسیله به عنوان آشکارساز CCD نام دارد و بر اساس تبدیل فوتون های تابیده به جریان الکتریکی کار می کند. از مهمترین نکات در موقع کار با CCD پایین آوردن دما برای افزایش بازدهی و کاهش نوفه و محاسبه درست زمان نوردهی در هنگام رصد است. آستانه زمان نوردهی اشباع شدن سلول های CCD است. معمولاً بعد از نوردهی مدتی کوتاهی طول می کشد تا داده ها به منتقل شده و دوباره شماره هر یک از سلول ها صفر شود. اندازه گیری در تمامی طول موج ها نورسنجی و در یک بازه کوچک طول موج طیفسنجی نامیده می شود.

۳ نمودار قدر-رنگ ستارگان

قبل از ورود به این مبحث قدر ستارگان را بر اساس لگاریتم درخشندگی آنها تعریف می کنیم. این تعریف با توجه به حساسیت چشم انسان به صورت لگاریتمی $m = -2.5 \log(F) + C$ تعریف شده است. برای فاصله $d = 10$ قدر مطلق را به صورت $M = -2.5 \log(F(d = 10 \text{ pc})) + C$ تعریف می کنیم. در این صورت ارتباط بین قدر مطلق و قدر ظاهری با در نظر گرفتن تغییرات شدت نور با فاصله $F \propto 1/d^2$ به صورت زیر تغییر می کند.

$$m - M = 5 \log(d/10 \text{ pc}) \quad (1)$$

در عمل برای به دست آوردن نمودار قدر-رنگ، ابتدا با اندازه گیری اثر اختلاف منظر فاصله ستاره های نزدیک را حساب کرده و در نتیجه با داشتن قدر ظاهری می توان قدر مطلق آنها را حساب کرد. از طرف دیگر رنگ ستارگان نیز از طریق مشاهده ستارگان در دو فیلتر مختلف صورت می گیرد. نتیجه این تحلیل رسم نمودار قدر-رنگ برای مجموعه ستارگان مطابق شکل (۲) است. مهمترین آزمایش برای به دست آوردن نمودار قدر-رنگ توسط ماهواره Hipparcos انجام شده است.



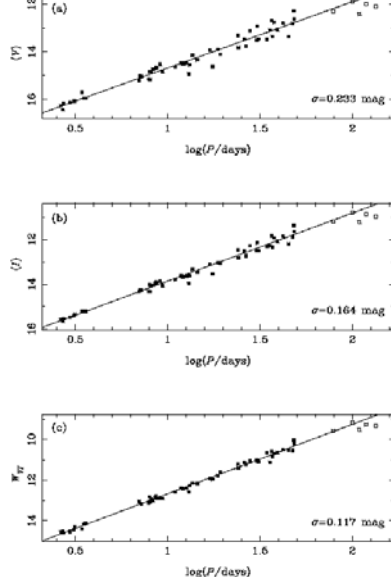
شکل ۲: نمودار رنگ - قدر ستارگان

تمرین: به سایت CDS به آدرس: <http://cdsweb.u-strasbg.fr/> مراجعه کرده و انتخاب لینک Astronomer's Bazar داده های Hipparcos را برای فواصل کمتر از 100 پارسک دریافت کرده و نمودار قدر رنگ را رسم کنید.

۴ نردبان فاصله

نردبان فاصله مجموعه‌ای از تکنیک‌های اندازه‌گیری فاصله در مقیاس‌های کیهانی است که با کالیبره کردن این روش‌های به صورت نردبانی صورت می‌گیرد. با این اندازه‌گیری‌ها مساحتی ساختارهای کیهانی و درخشندگی ذاتی آنها را می‌توان به دست آورد. اولین وسیله برای اندازه‌گیری فاصله در مقیاس منظومه شمسی استفاده از رادار به روش ارسال و دریافت سیگنال‌های رادیویی است. با این روش فواصل سیارات و سفینه‌های فضایی را می‌توان به خوبی اندازه‌گیری کرد. در مقیاس فراتر از منظومه شمسی مهم‌ترین روش استفاده از اثر اختلاف منظر برای محاسبه فاصله است. در این روش با توجه به حرکت زمین به دور خورشید، موضع ظاهری ستارگان نسبت به اجرام بسیار دور جابجا می‌شود. با استفاده از ماهواره Hipparcos می‌توان تا فواصل ۱۰۰ پارسکی را با دقت خوبی اندازه‌گیری کرد. پروژه GAIA در آینده با استفاده از اثر اختلاف منظر خواهد توانست کهکشان راه شیری را مساحتی بکند.

برای فواصل دورتر تلسکوپ قادر به تفکیک جابجایی ناشی از اختلاف منظر نیست و می‌بایست از روش‌های دیگری استفاده بکنیم. ستارگان متغیر به نام قیفاوسی‌های یکی از روش‌های اندازه‌گیری در مقیاس‌های بزرگ ترمی باشد. این نوع از ستارگان متغیر 10^3 تا 10^4 مرتبه درخشان‌تر از خورشید می‌باشند و در اثر انبساط و انقباض این ستارگان درخشندگی آنها نیز به دلیل تغییر مساحت تابش‌کننده عوض می‌شود. اولین بار خانم



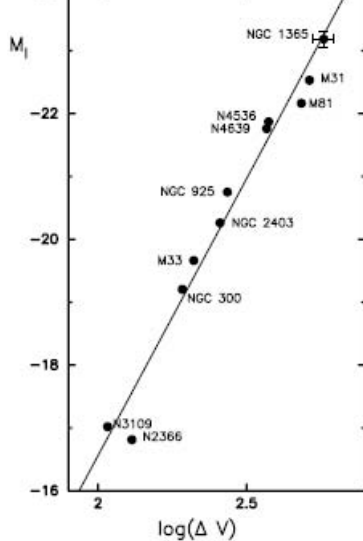
شکل ۳: ارتباط دوره تناوب قیفاوسی ها با قدر ظاهری

Leavitt با رصد صدها سیفید (قیفاوسی) نزدیک ارتباط بین درخشندگی ذاتی و دوره تناوب آنها را در سال ۱۹۱۲ به دست آورد. یک ستاره متغیر از این نوع با دوره تناوب سه روزه ۸۰۰ مرتبه درخشان تر از خورشید است حال آنکه برای ستاره ای با دوره تناوب سی روزه، درخشندگی ذاتی ۱۰۰۰۰ مرتبه بیش از خورشید تابش می کند. اندازه گیری فاصله قیفاوسی ها و درخشندگی ظاهری آنها با استفاده از ماهواره Hipparcos ارتباط بین درخشندگی ذاتی و دوره تناوب را به صورت زیر به دست می دهد:

$$M = -2.8 \log(P) - (1.43 \pm 0.1) \quad (2)$$

گروه OGLE تعداد زیادی از ستارگان متغیر در ابرهای ماژلانی پیدا کردند. (تمرین: با استفاده از داده های OGLE در بانک اطلاعاتی CDS، فاصله ای ابرماژلانی را به دست آورید.) با استفاده از تلسکوپ هابل می توان تا فاصله $10 Mpc$ را نیز از طریق قیفاوسی ها رصد کرد. برای فواصل دورتر می توان از خود کهکشان ها به عنوان شمع های استاندارد استفاده کرد. ارتباط بین درخشندگی ذاتی کهکشان ها با سرعت دوران آنها به صورت $L \propto v^4$ می باشد. بهترین راه برای به دست آوردن این رابطه رصد خوشه های کهکشانی غنی مثلاً خوشه ی Virgo می باشد.

در نهایت ابرنواخترهای نوع یک، فاصله دورترین اجرام کیهانی را می توانند اندازه گیری بکنند. ابرنواختر نوع یک، یک مجموعه دوتایی از کوتوله سفید و غول سرخ است که به تدریج جرم به سمت کوتوله سفید سرازیر شده و در نهایت با رسیدن به آستانه لازم به صورت ابرنواختر متلاشی می شود. ابرنواخترهای نوع یک دارای قدر مطلق از مرتبه $V = -19$ است. به طور متوسط در هر قرن حدود یک ابرنواختر نوع یک متلاشی می شود، بنابراین انتظار داریم تعداد آنها بسیار اندک باشد. با مساحتی تعداد زیادی از کهکشان



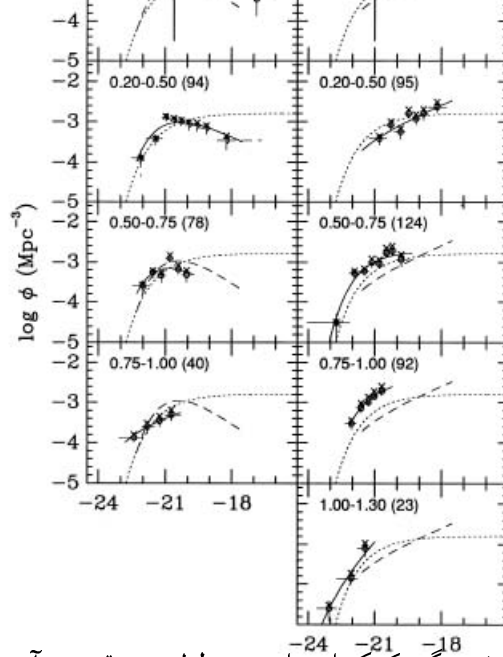
شکل ۴: ارتباط بین سرعت قدر مطلق کهکشان کالیبره شده با قفاوسی ها و پخش سرعت گاز از رصد ۲۱ سانتی متری، مرجع (۱).

ها این شانس را خواهیم داشت تا ابرنواخترهای نوع یک را به تعداد زیاد رصد کنیم. داده های ابرنواختر نوع یک عمدتاً در مطالعات کیهان شناسی مورد استفاده قرار می گیرد و یکی از دلایل برای انبساط تند شونده کیهان است. داده های مربوط به ابرنواخترهای نوع یک را می توان در مقاله (astro-ph/0611572) می توان به دست آورد.

۵ کهکشان ها: کهکشان راه شیری

قسمت عمده نور کیهان ناشی از کهکشان ها می باشند که بین ده تا صد میلیارد ستاره دارند. (تمرین: اگر هر آجر را نماینده یک کهکشان بنامیم، آیا آجرهای تشکیل دهنده تهران به اندازه تعداد ستارگان یک کهکشان است؟) به طور متوسط درخشندگی هر کهکشان برابر است با $L = 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ به طوری که درخشندگی خورشید $L_{\odot} = 2.4 \times 10^{45} \text{ ev}^{-1} \text{ s}^{-1}$. شکل (۷) تابع توزیع درخشندگی کهکشان ها در مقطع های مختلف فاصله ای نشان می دهد. کهکشان های دورتر سرخ تر از کهکشان های نزدیک می باشند. این تابع توزیع به دلیل عدم مشاهده ی تمامی کهکشان ها در تمامی قدرها یک مجموعه ی کامل نیست بنابراین تنها می تواند قسمتی از تابع توزیع درخشندگی کهکشان ها را توصیف بکند.

کهکشان راه شیری به عنوان مجموعه ای از ده میلیارد ستاره است که خورشید یکی از ستارگان وابسته به آن در فاصله حدود هشت کیلو پارسیکی از آن قرار دارد. کهکشان راه شیری دارای سه ساختار دیسک، هسته و هاله کهکشان می باشد. دیسک کهکشان عمدتاً ستارگان جوان می باشند و در هسته کهکشان بر خلاف دیسک ستارگان پیر را داریم. مولفه ی سوم کهکشان هاله می باشد که دلیل وجود آن جهت توافق دینامیک دوران دیسک



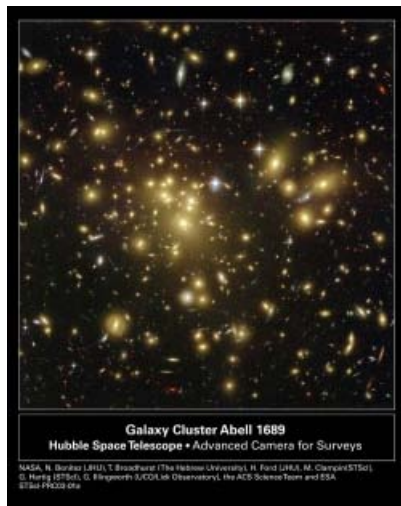
شکل ۵: تابع درخشندگی کهکشان ها در دو طول موج قرمز و آبی بر حسب انتقال به سرخ . کهکشان های دورتر رنگ قرمزتری نسبت به کهکشان های نزدیک دارند (مرجع ۲) .

کهکشان با رصد می باشد. با توجه به سرعت سراسری ثابت دیسک کهکشان، توزیع ماده در هاله می بایست به صورت $\rho = v^2 / (4\pi Gr^2)$ تغییر بکند. لازم به ذکر است که گرانش در محدوده‌ی کهکشان به صورت نیوتنی در نظر گرفته می شود. محدوده‌ی گرانش نیوتنی پتانسیل ضعیف $1 \ll v^2/c^2 \simeq \phi$ و مقیاس کوچک به معنی کنش آنی می باشد.

هاله‌ی کهکشان راه شیری تا گستره‌ی ۱۰۰ کیلو-پارسک گسترده شده و جرمی از مرتبه ۱۰ برابر قسمت روشن کهکشان را دارد. ابعاد هاله کهکشان با استفاده از دینامیک کهکشان های اقماری قابل محاسبه است. مثلاً ابرهای ماژلانی در فاصله‌ی ۶۰ کیلو پارسک از مرکز کهکشان نشان دهنده ابعاد هاله‌ی کهکشان تا آن محدوده است. هاله‌ی کهکشان به دلیل تاریک بودن از ماده‌ی تاریک و غیر قابل رصد تشکیل شده است. در بخش بعد انواع کندبدهای ماده تاریک معرفی خواهد شد.

۶ ماده تاریک در هاله کهکشان

اولین کاندید برای ماده تاریک می تواند از نوع باریونی باشد. ستاره های نارس با جرم $M < 0.08 M_{\odot}$ قابلیت تولید انرژی از طریق همجوشی ندارند. این نوع ستارگان کوتوله های قهوه ای نامیده می شوند و انتظار می رفت مقدار قابل توجهی ماده تاریک از این دست در هاله‌ی کهکشان باشد. در فرایند تشکیل کهکشان با توجه به گرادیان چگالی از لبه تا مرکز کهکشان انتظار داریم ستارگان با جرم بیشتر در مرکز و ستارگان کم جرم در هاله تشکیل شود. بنابراین وجود کوتوله های قهوه ای در قسمت های خارجی هاله‌ی کهکشان دور از انتظار نیست [۵].



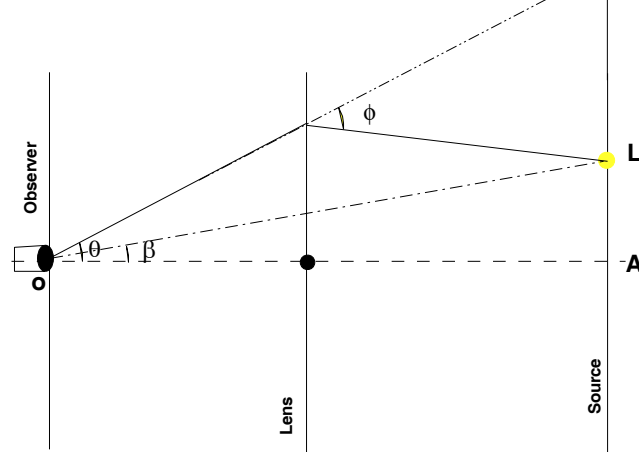
شکل ۶: همگرایی گرانشی در مقیاس کیهانی

در سال ۱۹۸۶ ایده‌ی ریز همگرایی گرانشی برای رصد اجرام فشرده^۲ در هاله کهکشان توسط پاجینسکی ارائه شد. اساس ریز همگرایی گرانشی به صورت همگرایی گرانشی ستارگان پس زمینه در هاله کهکشان می باشد که توسط ماچوهای هاله، نور این ستارگان در گذر از خط دید ناظر تقویت می شود. در گرانش نیوتنی و نسبت عام نور به هنگام عبور از کنار یک جرم مسیر خود را خم می کند.

۷ ریز همگرایی گرانشی

تمرین: ”با استفاده از مکانیک نیوتنی نشان دهید میزان خمیدگی نور تابیده به جسمی به جرم M برابر است با: $\alpha = \frac{2GM}{c^2 b}$ به طوری که b کوتاه ترین فاصله نور تا جسم است. ” در نسبت عام زاویه انحراف نور برای پرتو نور عبوری از کنار یک جرم دو برابر مقدار داده شده در مکانیک نیوتنی است. با توجه به انحراف نور داده شده می توان محل تصویر حاصل از منبع را بر حسب پارامترهای هندسی مسئله به دست آورد. همگرایی گرانشی را می توان به سه دسته‌ی (الف) همگرایی گرانشی قوی به طوری که تصویر منبع در این نوع همگرایی به دلیل انحراف شدید نور کاملاً تغییر کرده و برای نمونه تصویر یک منبع دایروی به صورت کمان ظاهر می شود (ب) همگرایی گرانشی ضعیف: در این نوع همگرایی تصویر منبع در اثر انحراف پرتوهای نوری کمی کشیده می شود (ج) ریز همگرایی گرانشی: این نوع همگرایی گرانشی در مقیاس های کهکشانی توسط ستارگان رخ می دهد و به دلیل زاویه‌ی جدایی کم در تصاویر تشکیل شده، عملاً تلسکوپ های زمینی قادر به تفکیک تصاویر نخواهند بود. در این نوع همگرایی گرانشی با

^۲ Massive Compact Astrophysical Halo Objects: MACHOs



شکل ۷: انحراف نور ستاره در مجاورت عدسی گرانشی

گذر یک ستاره و یا ماچواز کنار خط دید ناظر-چشمه، نور ستاره‌ی زمینه همگرا شده و اثر آن به صورت تقویت نور ستاره زمینه خواهد بود. شکل (۶) نمونه‌ای از همگرایی گرانشی رصد شده در مقیاس کیهانی را نشان می‌دهد.

با توجه به زاویه انحراف کم در همگرایی گرانشی، در محاسبه مسیر پرتو نور در همگرایی گرانشی، می‌توان با تقریب خوب این انحراف را با شکسته شدن پرتو نور نشان داد. شکل (۷) پرتو نور را قبل و بعد از شکست نشان می‌دهد. پایستگی اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای در گرانش همواره تضمین می‌کند پرتو نور در صفحه چشمه-عدسی-ناظر قرار گرفته و از آن خارج نشود. از طرف دیگر پرتوهای چشمه، خارج از این صفحه نیز با توجه به حرکت پرتو بر روی صفحه حامل بردار سرعت اولیه پرتو و خط واصل چشمه-عدسی هیچ وقت به ناظر نخواهند رسید. از نظر ریاضی شکست نور در مجاورت عدسی را می‌توان به یک نگاهت ۲ به ۱ از صفحه عدسی به صفحه‌ی چشمه دانست به طوری که یک نگاهت از صفحه بالای خط واصل ناظر-عدسی و دیگری از نیمه پایین این خط می‌باشد. یکی از اهداف آزمایش‌های همگرایی گرانشی به دست آوردن محل تصویر با توجه به موقعیت منبع و یا بلعکس می‌باشد.

با توجه به شکل (۷) رابطه‌ی $\overline{AB} = \overline{AL} + \overline{BL}$ را می‌توان بر حسب زاویه مشاهده‌ی چشمه و تصویر با جاگذاری $\overline{AL} = D_{os}\beta$ و $\overline{AB} = D_{os}\theta$ و $\overline{LB} = D_{ls}\phi$ به صورت زیر نوشت:

$$\theta = \beta + \frac{D_{ls}}{D_{os}}\phi, \quad (3)$$

به طوری که زاویه انحراف با استفاده از محاسبات نسبیت عامی برابر $\phi = 4GM/b$ است. برای $b = D_{ol}\theta$ معادله (۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\theta^2 = \theta\beta + \theta_E^2. \quad (4)$$

حل معادله‌ی فوق به صورت زیر است:

$$\theta = \frac{1}{4}(-\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}) \quad (5)$$

این معادله دو جواب را برای تصویر به دست می‌دهد که نشان دهنده دو تصویر برای عدسی گرانشی است. فاصله بین تصاویر برابر است با:

$$\Delta\theta = \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2} \quad (6)$$

۸ مراجعها

- [۱] B. F. Madore et al., 1999, ApJ 515, 29
- [۲] S. J. Lilly et al. 1995, Apj 455, 108
- [۴] Peacock, J, A., Cosmological Physics, Cambridge university press 1999.
- [۵] Rahvar, S., 2005, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 356, 1127