

## جرم- تاریک- خوشه ی- گیسو

احمد شریعتی

در این مقاله ی- آموزشی توضیح داده می-شود که مبنا ی- رصدی ی- جرم- تاریک- خوشه-ها ی- کهکشانی، از جمله خوشه ی- گیسو چیست.

### 1 مقدمه ی- تاریخی

در دهه ی- 1930، فریتس زویبکی<sup>(a)</sup>، منجم- سویسی- آمریکایی، مدعی شد که جرم- مجموعه ای از کهکشان-ها موسوم به خوشه ی- گیسو، چندین برابر- آن چیزی است که می-توانیم ببینیم [۱]. به بیان- دیگر این مجموعه از کهکشان-ها قاعدتاً باید شامل- ماده یا موادی باشند که تابش- الکترومغناطیسی ی- بسیار ضعیفی دارد. زویبکی این ماده را ماده ی- تاریک نامیده. چند دهه بعد معلوم شد که جرم- کهکشان-ها ی- ماریپچی، از جمله کهکشان- راه- شیری هم چندین برابر- جرم- مرئی ی- آن-ها است. امروزه تصور- اکثر- منجم-ها و فیزیک-پیشه-ها این است که عمده ی- جرم- دنیا «تاریک» است. در این نوشته می-خواهیم استدلال- زویبکی را که به پذیرفتن- وجود- ماده ی- تاریک منتهی می-شود مرور کنیم. این استدلال را براساس- داده-ها ی- جدیدتر بیان می-کنیم.

### 2 مجموعه ای از کهکشان-ها

در آسمان- نیم-کره ی- شمالی، صورت- فلکی ای هست به نام- گیسوان- برنیکه<sup>(b)</sup>. این صورت- فلکی، از نظر- یونانی-ها و بعد مسلمانان در واقع- جزء ی- از صورت- فلکی ی- اسد (شیر) بوده است. در دوران- جدید، گویا نخستین بار مرکاتور<sup>(c)</sup> [1] مسّاح- فلیمیش- هلندی یا تیکو براهه<sup>(d)</sup> [2] به این صورت- فلکی هویت- مستقل ی- داده اند. به هر حال این صورت- فلکی در شرق- صورت- اسد (شیر)، در غرب- صورت- عوا، در شمال- صورت- سنبله، و در جنوب- صورت- سگان- شکاری است. قطب- شمال-

کهکشان‌های در این صورت فلکی است<sup>1</sup>. در این خوشه اشیاء نسبتاً کم‌ی از کهکشان‌ها راه شیری دیده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها یک خوشه‌ی باز ستاره‌ای (موسوم به خوشه‌ی ستاره‌ای‌ی گیسو)، و یک خوشه‌ی کروی (موسوم به M53 یا NGC 5024) است.

اما صورت فلکی‌ی گیسوان برنیکه شامل تعداد زیادی کهکشان است که نخستین بار ویلیام هرشل<sup>(6)</sup> متوجه آن‌ها شد. در ابتدا‌ی قرن بیستم معلوم شده بود که در این خوشه دست‌کم 100 کهکشان هست. امروزه با تلسکوپ‌های قوی، تقریباً هزار کهکشان در دایره‌ای به قطر تقریباً  $5^\circ$  دیده می‌شود. قطر ظاهری‌ی  $5^\circ$  واقعاً زیاد است، یعنی ده برابر قطر ظاهری‌ی ماه!

### 3 اطلاعات رصدی

فهرست‌های مختلف‌ی از کهکشان‌های خوشه‌ی گیسو منتشر شده است، مثلاً [5] که می‌توانید آن را با کم‌ی جست‌وجو در اینترنت بیابید.<sup>2</sup> در این فهرست اطلاعات 271 کهکشان که در مرکز این خوشه، یعنی در فاصله‌ی تقریباً  $0.5^\circ$  از مرکز خوشه هستند آمده است. یک خط از اطلاعات این فهرست به این شکل است:

3352 NGC4872      147      -86      14.79      1.78      7249      30      1      1

از سمت چپ، در نخستین ستون شماره‌ی کهکشان در یک فهرست خاص نوشته شده. در ستون دوم نام متداول‌تر این کهکشان آمده. در ستون‌های سوم و چهارم مختصه‌های  $x$  و  $y$  موضع کهکشان در آسمان آمده. نسبت به یک دستگاه دکارتی که مرکز آن نقطه‌ای مشخص در آسمان است. اعداد این دو ستون بر حسب ثانیه‌ی قوس اند. عدد بعدی، 14.79، قدر ظاهری‌ی این کهکشان است. (تعریف قدر در پاراگراف بعد آمده است.) عدد بعدی (1.78) شاخص رنگ کهکشان است که عبارت است از  $m_b - m_r$  یعنی تفاضل قدر ظاهری‌ی کهکشان در دو طول‌موج مختلف. این عدد نشان‌گر سن کهکشان است. عدد بعدی، 7249، سرعت دور شدن کهکشان از ما است، بر حسب km/s، و عدد بعدی (30) خطای این سرعت است. سرعت دور شدن کهکشان را

<sup>1</sup> منظور از قطب شمال کهکشان، امتداد محور کهکشان راه شیری در آسمان نیم‌کره‌ی شمالی است. و منظور از محور کهکشان راه شیری، محوری است که بر صفحه‌ی کهکشان عمود است.

<sup>2</sup> مثلاً مراجعه کنید به <http://cdsweb.u-strasbg.fr/>

«سرعتِ گریز از ناظر زمینی» - آن می‌نامیم<sup>3</sup>. این سرعت را با مطالعه ی طیفِ کهکشان و سنجیدنِ انتقال به سرخ یا انتقال به آبی ی- آن می‌توان سنجید. عددِ بعدی (که 1 است) نشان می‌دهد که این سرعت را چه گروه ی سنجیده است، و عددِ بعد (که 1 است) نشان می‌دهد که کیفیتِ طیف ی که سرعت با استفاده از آن سنجیده شده است چه گونه است. آن چه ما فعلاً به آن علاقه مند ایم سرعتِ دور شدنِ کهکشان از ما و قدرِ ظاهری ی- آن است.

قدرِ ظاهری معیاری لگاریتمی از شارِ انرژی ی- نورانی ی- شیء در روی زمین است. اگر  $L$  درخشندگی ی- جسم (بر حسب وات) و  $d$  فاصله ی- جسم از ما (بر حسب متر) باشد، شارِ انرژی ی- نورانی ی- جسم در روی زمین می‌شود

$$\Phi = \frac{L}{4\pi d^2}.$$

این  $\Phi$  بر حسب قدرِ ظاهری ( $m$ ) هست:

$$\Phi = 2.52 \times 10^{-8} \times 10^{-2m/5} \text{ W m}^{-2}.$$

بنا بر این

$$L = 4\pi d^2 \times 10^{-2m/5} \times 2.52 \times 10^{-2}$$

اگر  $d$  فاصله بر حسب Mpc =  $3.09 \times 10^{22}$  m باشد فرمول بالا به شکل زیر در می‌آید:

$$L = 3.02 \times 10^{44} \times 10^{-2m/5} d^2.$$

دقت کنید که هر چه قدرِ ظاهری بزرگ‌تر باشد، شارِ نوری که به ما می‌رسد کوچک‌تر است. قدرِ ظاهری ی- کم‌سوترین ستاره‌ها بی که در شب تاریک با چشم می‌توان دید 6 است.

## 4 توزیع سرعتِ گریز از ناظر زمینی

ببینیم نمودارِ توزیع سرعت‌ها ی- این 271 کهکشان چه گونه است. برای این کار محورِ افقی را محورِ سرعت می‌گیریم و سرعت‌ها را به ترتیبِ صعودی مرتب می‌کنیم. اگر  $v_i$  سرعت  $v_i$  باشد، در <sup>3</sup> این را با سرعتِ فرار اشتباه نکنید. منظور از سرعتِ فرار یک جسم سرعت ی است که آن جسم باید داشته باشد تا از میدانِ گرانشی ای که در آن اسیر است بگریزد. منظور از سرعتِ گریز از ناظر زمینی، سرعتِ جسم در امتدادِ خطِ دید است.

محل  $v = v_i$  یک خط قائم می کشیم. به این ترتیب نموداری شبیه به طیف یک جسم به دست می آید (شکل ۱ را ببینید).

همان طور که در شکل دیده می شود، سرعت گریز این 271 کهکشان توزیع خاصی دارد. 30 تا از کهکشانها در پایین ترین بخش نمودار اند، یعنی در منتهی البه سمت چپ نمودار پایین اند. از این 30 تا، 12 تا به سمت ما می آیند ( $v_r < 0$ ). پس از آن مجموعه ای از 192 کهکشان است که توزیع سرعتها ی آنها خیل ی شبیه به یک نمودار گاوسی یا ماکسولی است. و پس از آن بقیه ی کهکشانها توزیع شده اند. توزیع سرعت 181 تا از این کهکشانها در بالاترین نمودارها ی شکل ۱ کشیده شده است. برای این که این توزیع را بهتر درک کنیم، بهتر است که توزیع «هموار شده» ای را رسم کنیم. دقت کنید، توزیع ی که به دست آمده،  $f(v)$ ، یک توزیع گسسته است، درست مانند قرار گرفتن تعداد ی بار نقطه ای. برای هموار کردن توزیع می توان یک بازه ی سرعت مثل  $[v - \delta v, v + \delta v]$  اختیار کرد و میان گین  $f(v)$  روی این بازه را در نظر گرفت:

$$\bar{f}(v) = \frac{1}{2\delta v} \int_{v-\delta v}^{v+\delta v} f(v') dv'$$

در شکل ۱، در نمودار پایین  $\delta v = 1000 \text{ km/s}$ ، و در نمودار بالا  $\delta v = 5 \text{ kms}$  بوده است.

## 5 سرعت گریز و انبساط کیهان

بنا بر کیهان شناسی ی متعارف، کیهان در حال انبساط است، به نحو ی که کهکشانها ی دور دست با سرعتها ی متناسب با فاصله شان دارند از ما دور می شوند.

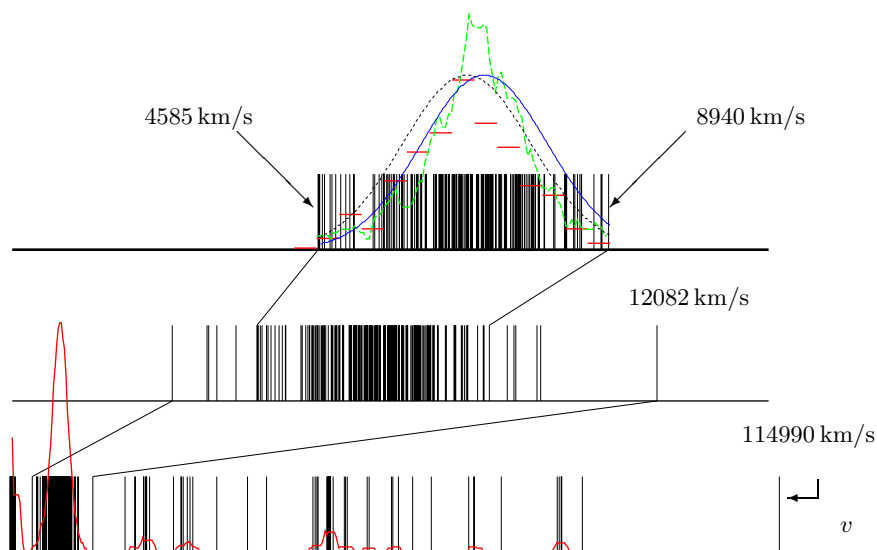
$$v = Hd$$

در این فرمول، که فرمول هابل<sup>(f)</sup> نام دارد  $H$  ثابت هابل است. بنا بر سنجشها ی اخیر  $H = 71 \text{ km/(s Mpc)}$  است. رسم بر آن است که می نویسیم

$$H = h_{100} \times 100 \text{ km/(s Mpc)}$$

$h_{100}$  عدد ی در حدود 1 است.<sup>4</sup> آن را در فرمولها ننگه می داریم تا بتوانیم با اصلاح شدن مقدار  $H$  همه چیز را اصلاح کنیم.

میان گین سرعت دور شدن 181 کهکشان ی که انتخاب کرده ایم  $\bar{v} = 6796 \text{ km/s}$  است. با استفاده از فرمول هابل، این سرعت متناظر است با فاصله ی  $68 h_{100}^{-1} \text{ Mpc}$  که برای  $h_{100} = 0.71$   
<sup>4</sup> زیر نویس 100 نشان گر آن است که واحد ثابت هابل  $100 \text{ km/(s Mpc)}$  است.



شکل ۱: توزیع سرعت‌ها در تعدادی از کهکشان‌ها ی خوشه ی گیسو. در پایین‌ترین نمودار، هر خط نشان‌دهنده ی یک کهکشان است. محل خط، روی محور افقی، سرعت گریز آن کهکشان است. تابع توزیع سرعت‌ها با خط پُر رسم شده است. این تابع توزیع با یک فرآیند متوسط‌گیری روی بازه ی  $[v - \delta v, v + \delta v]$  هم‌وار شده است ( $\delta v = 1000 \text{ km/s}$ ). در نمودار بالاتر (نمودار وسط) توزیع کهکشان‌ها بی که سرعت آن‌ها در انباشته‌گی ی اول است کشیده شده است. در نمودار سوم (نمودار بالا) توزیع دسته ای خاص از این کهکشان‌ها (که در شکل مشخص است) کشیده شده. نموداری که با خط چین کشیده شده، توزیع سرعت‌ها است که البته با متوسط‌گیری هم‌وار شده ( $\delta v = 5 \text{ km/s}$ ). نموداری که با نقطه‌چین کشیده شده یک منحنی ی گاوسی است با  $\bar{v} = 6800 \text{ km/s}$  و  $\sigma = 1000 \text{ km/s}$ . نموداری که با خط پُر کشیده شده یک توزیع ماکسولی است با  $\sigma = 1000 \text{ km/s}$  و  $v_{\text{max}} = 6800 \text{ km/s}$ .

برابر 96 Mpc است. آیا باید بقیه‌ی سرعت‌ها‌ی این گروه را نیز سرعتِ هابلی تعبیر کنیم؟ به عبارتِ دیگر، آیا درست است که برای هر عضوِ این مجموعه از کهکشان‌ها سرعت را سرعتِ هابلی در نظر بگیریم؟ اگر چنین کنیم دیده می‌شود که این مجموعه از کهکشان‌ها در حد فاصل  $46 h_{100}^{-1}$  Mpc تا  $89 h_{100}^{-1}$  Mpc قرار دارند. دقت کنید

$$\begin{aligned} v_{min} &= 4585 \text{ km/s} & d_{min} &= 46 h_{100}^{-1} \text{ Mpc} \\ v_{max} &= 8940 \text{ km/s} & d_{max} &= 89 h_{100}^{-1} \text{ Mpc}. \end{aligned}$$

طولِ این مجموعه  $43 h_{100}^{-1}$  Mpc است. اگر چنین باشد، اثرِ گرانشی‌ی این کهکشان‌ها بر هم بسیار ناچیز است، و قاعدتاً هیچ هم‌بسته‌گی ای بین آن‌ها نیست.

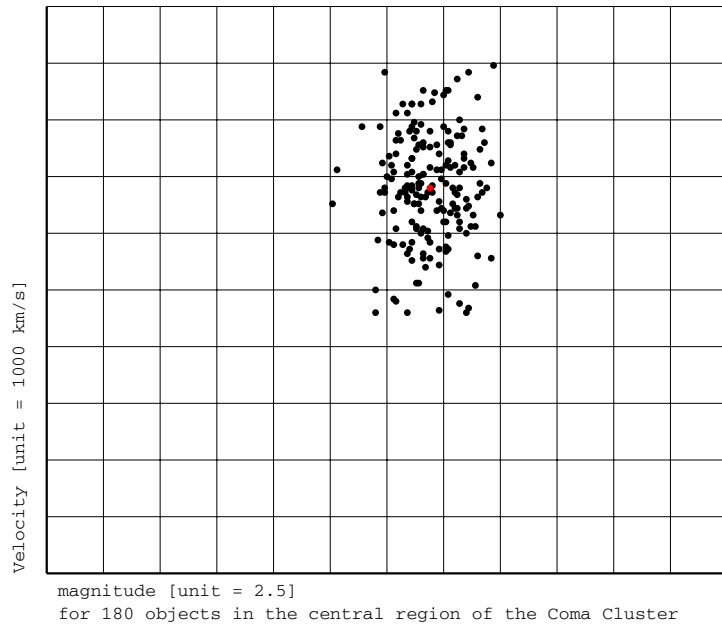
اکنون به نمودارِ شکل ۲ نگاه کنید. در این نمودار محورِ افقی قدرِ ظاهری‌ی کهکشان، و محورِ قائم سرعتِ دور شدنِ آن از ما است. هر نقطه نشان دهنده‌ی یک‌ی از 180 کهکشانِ مجموعه‌ی بالا است. چون برای یک‌ی از کهکشان‌ها مقدارِ قدر در جدول نیامده آن را حذف کرده ایم.

دقت کنیم که نقاط در این نمودار تقریباً به طورِ یک‌نواخت در یک مستطیلِ قائم توزیع شده اند. اگر قرار باشد همه‌ی سرعت‌ها را هابلی تعبیر کنیم، محورِ قائم مضرب‌ی از فاصله‌ی کهکشان از ما خواهد بود، و تعبیرِ نمودار این می‌شود که با دور شدنِ کهکشان‌ها‌ی این مجموعه از ما، توزیع و متوسطِ قدرِ ظاهری‌ی کهکشان‌ها‌ی آن تغییر نمی‌کند؛ که تنها در صورت‌ی ممکن است که بپذیریم کهکشان‌ها‌ی دورتر درخشان‌تر اند. چیزی که پذیرفتن ش ساده نیست. ساده‌تر آن است که بگوییم این 181 کهکشان در فاصله‌ی تقریباً یک‌سان از ما هستند ( $\delta d \simeq \pm 1 \text{ Mpc}$ ). به این ترتیب این مجموعه یک خوشه‌ی واقعی از کهکشان‌ها است. میان‌گینِ سرعتِ این کهکشان‌ها  $\bar{v} = 6800 \text{ km/s}$  است که متناظر است با فاصله‌ی  $68 h_{100}^{-1}$  Mpc، که اگر  $h_{100}$  را 0.71 بگیریم 96 Mpc می‌شود.

تصویرِ این مجموعه از کهکشان‌ها در آسمان در دایره‌ای به قطرِ تقریباً  $0.012 \text{ Rad} = 0.7^\circ$  است که در فاصله‌ی 96 Mpc می‌شود دایره‌ای به قطرِ تقریباً  $D = 1 \text{ Mpc}$ . تصوّر این که این مجموعه از کهکشان‌ها در کره‌ای به شعاعِ تقریباً  $D = 1 \text{ Mpc}$  توزیع شده اند تصوّر بسیار معقول‌ی است.

## 6 درخشنده‌گی‌ها

اگر درخشنده‌گی‌ی یک ستاره یا کهکشان  $L$  باشد (بر حسب  $W$ )، قدرِ مطلقِ آن  $M$  است که در زیر تعریف می‌شود:



شکل ۲: هر نقطه نشان‌گر یک کهکشان است. محور افقی (جهت از چپ به راست) قدر ظاهری است. محور قائم (جهت از پایین با بالا) سرعت گریز است. اگر سرعت گریز را به انبساط هابلی ی- کیهان نسبت بدهیم، محور قائم مضرب ی از فاصله ی- کهکشان تا ما خواهد بود. در این صورت باید بپذیریم که کهکشان‌ها ی- دورتر- این مجموعه به طور- میان‌گین درخشان‌تر از کهکشان‌ها ی- نزدیک اند، و این عجیب است.

$$L = 3.02 \times 10^{28} \times 10^{-2M/5} \text{ W} \simeq 84 \times 10^{-2M/5} L_{\odot},$$

که در این جا  $L_{\odot} = 3.6 \times 10^{26} \text{ W}$  درخشندگی ی. خورشید است.  
 بین قدر ظاهری ( $m$ )، قدر مطلق ( $M$ )، و فاصله ( $d$  بر حسب Mpc) این رابطه برقرار است:

$$M = m - 5 \log \frac{10^5 d}{\text{Mpc}},$$

که برای دو فاصله ی.  $d_{\min} = 95 \text{ Mpc}$  و  $d_{\max} = 97 \text{ Mpc}$  می شود<sup>5</sup>

$$d = d_{\min} \quad M = m - 34.89$$

$$d = d_{\max} \quad M = m - 34.93$$

بنا بر این کاملاً معقول است که برای تمام کهکشانها ی. این مجموعه بگیریم  $M = m - 34.9$  و به این ترتیب می توانیم میان گین، انحراف معیار، کمینه، و بیشینه ی.  $M$  را حساب کنیم. دیده می شود که

$$\bar{M} = -18.2, \quad \sigma_M = 2.23, \quad M_{\min} = -22.3, \quad M_{\max} = -14.9$$

این مقادارها متناظر اند با درخشندگی ها ی.

$$\bar{L} = 1.6 \times 10^9 L_{\odot}, \quad L_{\max} = 7.0 \times 10^{10} L_{\odot}, \quad L_{\min} = 7.7 \times 10^7 L_{\odot}$$

دقت کنید که هر چه قدر مطلق بزرگتر باشد درخشندگی کوچکتر است، پس  $L_{\min}$  متناظر است با  $M_{\max}$  و  $L_{\max}$  متناظر است با  $M_{\min}$ .

## 7 تخمین ی از انرژی ی جنبشی در چارچوب مرکز جرم

کهکشان ی در نظر بگیریم که در آن  $N$  ستاره باشد با جرم میان گین  $\frac{\mathcal{M}}{N}$  -  $\bar{m}$  این  $\bar{m}$  را با قدر ظاهری اشتباه نکنید. درخشندگی ی میان گین ستاره ها ی. آن را هم  $\bar{l} = \frac{L}{N}$  می نامیم. می نویسیم  $\bar{m} = \mu \mathcal{M}_{\odot}$  و  $\bar{l} = \lambda L_{\odot}$  که در این جا  $\mu$  و  $\lambda$  دو عدد بی بُعد اند،  $\mathcal{M}_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$  جرم خورشید است، و  $L_{\odot}$  هم درخشندگی ی خورشید است. دو عدد بی بُعد  $\mu$  و  $\lambda$  عددها یی از مرتبه ی. 1 اند و چندان به کهکشان ی که انتخاب کرده ایم بسته گی ندارند. این فرض ی است که معلوم نیست درست است یا نه و باید با رصد تعداد زیاد ی کهکشان آن را بیازماییم. فعلاً فرض کنیم

<sup>5</sup> منجمها  $m - M = \mu$  را مدول فاصله می نامند، که یک ی از مشاهده پذیرها ی. مهم در نجوم است.



نسبت  $M/L$  تقریباً ثابت است ببینیم چه می‌شود. اگر این فرض درست باشد، برای ککهکشان‌ها نسبت جرم به درخشندگی تقریباً ثابت و عددی از مرتبه  $M/L_{\odot} = 5 \times 10^3 \text{ kg/W}$  است. پس با این فرض می‌توانیم برای 180 ککهکشان‌ها که در فهرست داریم جرم‌ها را تخمین بزنیم:

$$\begin{aligned} M &\sim 3 \times 10^{28} \times 10^{-2M/5} \times 5 \times 10^3 \text{ kg} \\ &\sim 10^{46-0.4m} \text{ kg}. \end{aligned}$$

در فرمول‌های بالا  $M$  و  $m$  به ترتیب قدرها می‌مطلق و ظاهری اند.

با یک برنامه‌ی ساده‌ی کامپیوتری می‌توان دید که برای 180 ککهکشان‌ها که در فهرست داریم، مجموع این انرژی‌ها در حدود  $10^{55} \text{ J}$  است که یعنی انرژی‌ی جنبشی‌ی میان‌گین هر ککهکشان تقریباً

$$\langle K \rangle \sim \frac{10^{55}}{200} \sim 5 \times 10^{52} \text{ J}$$

است.<sup>6</sup>

بگذارید یک جور دیگر هم این انرژی‌ی جنبشی‌ی میان‌گین را تخمین بزنیم. میان‌گین مجذور سرعت در دست‌گاہ مرکز جرم (برای این 180 ککهکشان) تقریباً  $3 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}^2$  است. (ضریب 3 در این فرمول را کم‌ی جلوتر توجیه خواهیم کرد.) جرم میان‌گین ککهکشان‌ها را می‌توانیم (با توجه به  $\bar{L}$  که در بالا حساب شد)  $2 \times 10^9 M_{\odot} \simeq 4 \times 10^{39} \text{ kg}$  بگیریم، و از این جا

$$\langle K \rangle \sim \frac{1}{2} \times 3 \times 10^{12} \times 4 \times 10^{39} = 6 \times 10^{51} \text{ J}$$

این مقدار یک دهم عددی است که بالاتر به دست آوردیم. به توجه به این دو عدد، تخمین

$$\langle K \rangle \sim 10^{52} \text{ J}$$

تخمین معقول‌ی است.

## 8 تخمین‌ی از انرژی‌ی پتانسیل

جرم کل این 180 ککهکشان تقریباً  $10^{42} \text{ kg} \sim 7 \times 10^{41} M_{180}$  است (این را هم با استفاده از  $\bar{L}$  می‌توان حساب کرد، و هم با جمع زدن جرم همه‌ی ککهکشان‌ها‌ی فهرست). این جرم در کره‌ای به

<sup>6</sup> نحوه‌ی محاسبه ساده است. برای هر ککهکشان قدر ظاهری ( $m$ ) و سرعت گریز ( $v_r$ ) را داریم. سرعت میان‌گین گریز را هم داریم ( $\bar{v}$ ). پس مؤلفه‌ی شعاعی‌ی سرعت در چارچوب مرکز جرم را داریم. و  $K \sim \mathcal{M}(v_r - \bar{v})^2$  است.

قطر - تقریباً 1 Mpc توزیع شده است. اگر توزیع یک نواخت باشد، انرژی ی - پتانسیل - گرانشی ی - کل - این توده ی - جرم می شود

$$U = -\frac{2}{5} \frac{GM^2}{R} \simeq -2 \times 10^{51} \text{ J.}$$

دقت کنید که این مقدار تقریباً یک پنج هزارم - انرژی ی - جنبشی ی - کل - توده است و این است که بسیار عجیب است. این نتیجه عجیب است، زیرا می گوید که این خوشه ی - کهکشانی یک سیستم - مقید نیست. یعنی اگر زمان ی از مرتبه ی -

$$T \sim \frac{R}{\delta v} \simeq 2 \times 10^{16} \text{ s} \simeq 500 \text{ My}$$

صبر کنیم، شعاع - این خوشه تقریباً دو برابر می شود. این سؤال مطرح می شود که چند میلیارد سال پیش این خوشه چه شکل ی داشته است؟ چند صد کهکشان در جاها ی - مختلف، بی هیچ همبسته گی ای چنان در کیهان پرتاب شده اند که پس از مدتی همه گی در یک جا جمع شده اند! احتمال - چنین اتفاق ی بسیار کم است، و این باعث می شود به این گمان برسیم که این خوشه باید قاعداً مقید باشد. (برا ی - دیدن - استدلال به [۸] رجوع کنید.)

مثل - زویبکی، به دنبال - راه - گریزی از این ناسازگاری می گردیم. دقت می کنیم که اگر جرم - کهکشان ها را  $k$  برابر کنیم، انرژی ی - جنبشی  $k$  برابر و انرژی ی - پتانسیل  $k^2$  برابر می شود. پس راه - گریز این است که فرض کنیم جرم - کهکشان ها بیش تر از چیزی است که بالاتر تخمین زدیم؛ یا به بیان - دیگر فرض کنیم نسبت  $M/L$  برا ی - کهکشان ها ی - خوشه ی - گیسو بسیار بزرگ تر از  $M_{\odot}/L_{\odot}$  است. در واقع می توان با استفاده از میان گین - انرژی ی - جنبشی ی - کهکشان ها ی - خوشه ی - گیسو، و این فرض که این سیستم در یک حالت - تعادل - دینامیکی است، تخمین ی از جرم - کهکشان ها ی - این خوشه به دست آورد. این کاری است که زویبکی در مقاله ی - 1937 اش انجام داده است.

## 9 قضیه و جرم - ویريال

بنا بر قضیه ی - ویريال، که اثبات - آن را می توانید در [۷] ببینید، اگر سیستم ی متشکل از  $N$  جسم - نقطه ای به جرم ها ی -  $m_i$ ، با برهم کنش - گرانشی بین - همه ی - اجزاء ش در تعادل - دینامیکی<sup>7</sup> باشد،

<sup>7</sup> منظور از تعادل ی - دینامیکی این است که میان گین - کمیت ها یی مثل - انرژی ی - جنبشی، با گذشت - زمان تغییر نکند. مثلاً، در یک گاز که در تعادل - ترمودینامیکی است، انرژی ی - جنبشی ی - هیچ اتم ی ثابت نیست، اما میان گین - انرژی ی - جنبشی ی - هر اتم ی در زمان ها ی - طولانی ثابت است.

بین میانگین انرژی جنبشی ی آن مجموعه با میانگین انرژی ی پتانسیل آن این رابطه برقرار است:

$$\langle T \rangle = -\frac{1}{2} \langle V \rangle.$$

اگر فرض کنیم که مجموعه ی کهکشان‌ها ی خوشه ی گیسو، یعنی این 180 کهکشان ی که انتخاب کرده ایم، در حالت تعادل دینامیکی باشند، آن وقت می‌توانیم با استفاده از این قضیه ی ویرال یک جرم، موسوم به جرم ویرال، به خوشه نسبت نسبت بدهیم. به این نحو: اگر  $M_{\text{vir}}$  جرم خوشه باشد، و اگر  $N$  تعداد کهکشان‌ها ی خوشه باشد، جرم میانگین هر کهکشان  $M_{\text{vir}}/N$  است. اگر  $\sigma$  انحراف معیار سرعت‌ها ی شعاعی باشد، انحراف معیار اندازه ی سرعت‌ها  $3\sigma$  خواهد بود، زیرا در چارچوب مرکز جرم داریم

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$$

و تقارن حکم می‌کند که

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle,$$

پس

$$\langle v^2 \rangle = 3 \langle v_x^2 \rangle = \langle v_r^2 \rangle.$$

به این ترتیب

$$\langle T \rangle \sim N \left( \frac{1}{2} \frac{M_{\text{vir}}}{N} 3\sigma^2 \right) = \frac{3}{2} M_{\text{vir}} \sigma^2.$$

اگر این  $N$  کهکشان کم و بیش یک‌نواخت در کره ای به شعاع  $R$  توزیع شده باشند، انرژی ی پتانسیل مجموعه تقریباً  $-\frac{3}{5} \frac{GM_{\text{vir}}^2}{R}$  است. حال اگر قضیه ی ویرال را به کار ببریم خواهیم داشت

$$\frac{3}{2} M_{\text{vir}} \sigma^2 \sim \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{5} \frac{GM_{\text{vir}}^2}{R}$$

که یعنی

$$M_{\text{vir}} \sim \frac{5R\sigma^2}{G}.$$

توزیع کهکشان‌ها در خوشه ی گیسو کاملاً یک‌نواخت نیست: در مرکز چگالی بیش‌تر است. بنا بر این بهتر است ضرب 5 در فرمول بالا را جدی نگیریم، و این البته تأثیر چندانی نخواهد داشت. برای

180 کهکشان ی که در خوشه ی گیسو انتخاب کردیم، خواهیم داشت:

$$M_{\text{vir}} \sim 10^{45} \text{ kg}$$

و این یعنی که میان گین-جرم این 180 کهکشان  $10^{12} M_{\odot} \simeq 10^{42} \text{ kg}$  است، که تقریباً صد برابر تخمین ی است که از درخشندگی ی این کهکشان ها به دست می آید. به عبارت دیگر: جرم این خوشه ی کهکشانی بسیار بزرگ تر از ماده ی درخشان آن است - قسمت عمده ی «ماده» ی تشکیل دهنده ی این مجموعه از کهکشان ها را نمی بینیم. بخش ی از این «ماده» ی نامرئی احتمالاً ابرها ی سرد هیدروژنی است؛ بخش ی از آن احتمالاً در کوتوله ها ی قهوه ای و ستاره ها ی بسیار کم نور است؛ و بخش ی از آن ممکن است اصلاً ماده ی باریونی (یعنی ماده ی متشکل از هسته ها ی اتمی و الکترون) نباشد.

## 10 چگالی ی ماده ی تاریک

جرم ی که برا ی این خوشه ی 180 تایی تخمین زدیم،  $10^{45} \text{ kg}$ ، در کره ای به شعاع 1 Mpc توزیع شده. حجم کره ای به شعاع 1 Mpc تقریباً  $10^{68} \text{ m}^3$  است. چگالی ی میان گین می شود تقریباً

$$\bar{\rho} \sim \frac{10^{45}}{10^{68}} = 10^{-24} \text{ kg/m}^3.$$

این چگالی بسیار کم تر از چگالی ی ماده در محیط زیست ما است - چگالی ی آب تقریباً  $10^{27}$  برابر این است. توجه به این نکته بسیار مهم است. فرض کنید بنا بر نظریه ای این ماده ی تاریک از ذره ها ی بنیادی ساخته شده که تا کنون در آزمایش گاه آن ها را ندیده ایم. فرض کنید جرم این ذره ها در حدود  $10^{-25} \text{ kg}$  باشد (یعنی در حدود صد برابر جرم پروتون). در این صورت انتظار داریم در هر متر مکعب از آزمایش گاه ها ی ما حدود 10 تا از این ذره ها باشد. این عدد در مقایسه با ذره ها ی معمولی ای که اطراف ما هست بسیار کوچک است. آشکارسازی ی این ذره ها در آزمایش گاه ها ی زمینی به دو علت سخت است. اول آن که این ذره ها برهم کنش بسیار ضعیف ی با ابزار آزمایش گاهی ی ما دارند، و دوم آن که تعداد آن ها در واحد حجم بسیار کم است.

## 11 چند تذکر

(۱) زویبکی در دهه ی ۱۹۳۰ از ثابت هابل که آن موقع خود هابل سنجیده بود استفاده کرد، ثابت ی که متناظر بود با  $h_{100} = 55.8$  (مقایسه کنید با مقدار کنونی ی  $h_{100} = 0.71$ ). به این ترتیب فاصله ی خوشه ی گیسو تقریباً ۸۰ بار کوچک تر به دست می آید. تعداد کهنکشان ها بی که زویبکی با استفاده از آن ها انحراف معیار سرعت ها را تخمین زد نزدیک به ۱۰ بود (مقایسه کنید با فهرست تقریباً ۲۰۰ تایی ای که ما استفاده کردیم). با استفاده از همین چند کهنکشان، زویبکی حد پایینی ی  $\sigma = 710 \text{ km/s}$  را به دست آورد (معادله ی ۳۴ [۱]). با استفاده از این عددها بود که زویبکی مدعی شد در خوشه ی گیسو مقدار زیاد ی ماده ی تاریک هست. این عددها از آن موقع تا کنون تغییرات زیاد ی کرده اند، و البته در این جهت که فرض ماده ی تاریک روز به روز تقویت شده است.

(۲) فرض مقید بودن این خوشه نیاز به توجیه دارد. برای دیدن استدلال زویبکی به [۸] رجوع کنید. فرض تعادل دینامیکی ی این خوشه بسیار مقیدکننده تر از فرض بسته بودن آن است. ممکن است خوشه ی گیسو محل برخورد چند خوشه ی کوچک تر باشد. در این صورت هیچ دلیل ی نداریم که کل خوشه به تعادل دینامیکی رسیده باشد. یک ی از مسائل ی که بعضی از پژوهش گران دنبال می کنند این است که با تحلیل داده ها ی صدی ی این خوشه (و خوشه ها ی دیگر) ساختارها ی ریزتر خوشه ی گیسو را تعیین کنند.

برای دیدن یک مرور مختصر از آن چه درباره ی خوشه ی گیسو می دانیم به [۴]، و برای دیدن یک مرور تاریخی ی مفصل درباره ی آن به [۶] رجوع کنید؛ دقت کنید که این مرور اخیر بیش از یک دهه قدیمی است.

## مراجع

- [1] F. Zwicky, "On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae", *The Astrophysical Journal*, vol 86, no. 3 (Oct 1937), pp. 217–246.
- [2] David Darling (ed), *The Universal Book of Astronomy*, John Wiley & Sons, 2004, p. 110.

- [3] Jacqueline Mitton, *A Concise Dictionary of Astronomy*, Oxford University Press, 1991, p. 79.
- [4] Matthew Colless, "Coma Cluster", in *Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics*, P. Murdin (editor), IOP Publishing 2006 (DOI: 10.1888/0333750888/2600)
- [5] A. Biviano *et al.*, "A catalogue of velocities in the central regions of the Coma cluster", *Astronomy & Astrophysics Supplement*, vol 111, pp. 265–274 (1995).  
<http://citeseer.ist.psu.edu/> مقاله را می‌توانید در این منزل گاه بیابید:
- [6] A. Biviano, "Our Best Friend, The Coma Cluster (A Historical Review)", Published in "Untangling Coma Berenices: A New Vision of an Old Cluster", Proceedings of the meeting held in Marseilles (France), June 17-20, 1997, Eds.: Mazure, A., Casoli F., Durret F. , Gerbal D., Word Scientific Publishing Co Pte Ltd. Available from <http://arXiv.org/abs/astro-ph/9711251>
- [7] H. Goldstein, *Classical Mechanics* 2<sup>ed</sup> ed., Addison Wesley, 1980, pp. 82–85.
- [8] F. Zwicky, *Morphological Astronomy*, Springer, 1957.1

## نام‌های خاص

- <sup>a)</sup> Fritz Zwicky (1898–1974); <sup>b)</sup> Coma Bernices; <sup>c)</sup> Gerardus Mercator (1512–1594);  
<sup>d)</sup> Tycho Brahe (1546–1601); <sup>e)</sup> Frederick William Herschel (1738–1822); <sup>f)</sup> Edwin Powell Hubble (1889–1953).