دما ی سطح سیّاره‌ها

احمد شریعتی

چکیده: دما ی سطح سیّاره‌ها ی منظومه ی شمسی به چند عامل بسته‌گی دارد: فاصله از خورشید، سفیدی ی سطح، ترکیب جو، آزاد شدن انرژی در درون سیّاره.

1 تابش گرمایی

اگر جسم سیاه ی گرم باشد در تمام طولِ‌موج‌ها تابش می‌کند. این تابش، تابش گرمایی نام دارد. شدّت موج ی که از واحد سطح جسم سیاه در گستره ی طولِ‌موج λ تا $\lambda + d\lambda$ گسیل می‌شود dI است که برابر است با $R(\lambda)\,d\lambda$. تابع $R(\lambda)$، که به فرمول پلانک معروف است، این است:

$$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right)\left(\frac{8\,\pi}{\lambda^4}\right)\left[\left(\frac{h\,c}{\lambda}\right)\frac{1}{e^{h\,c/\lambda\,k\,T}-1}\right] \tag{1}$$

در این جا h ثابت پلانک، و k ثابت بُلتسمان است. با انتگرال‌گیری معلوم می‌شود که

$$I = \int_0^\infty R(\lambda)\,d\lambda = \sigma\,T^4, \tag{2}$$

که در این جا

$$\sigma := \frac{2\,\pi^5\,k^4}{15\,c^2\,h^3} = 5.670 \times 10^{-8}\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}} \tag{3}$$

ثابت ی است موسوم به ثابت شْتفان ـ بُلتسمان. پس اگر کره ای به شعاع a دما یش T باشد، در کل با توان $4\,\pi\,a^2\,\sigma\,T^4$ تابش می‌کند.

خورشید کره ای است به شعاع $R_\odot = 7.0 \times 10^8\,\mathrm{m}$ که دما ی سطح آن $5785\,\mathrm{K}$ است. بنا بر قانون شْتفان ـ بُلتسمان، توان تابشی ی کل خورشید، که آن را درخشنده‌گی ی خورشید می‌نامیم و با $L_\odot$ نشان می‌دهیم، برابر است با

$$L_\odot = 4\,\pi\,R_\odot^2\,\sigma\,T_\odot^4 \tag{4}$$

اگر عددها را جاگذاری کنیم خواهیم دید

$$L_\odot = 3.9 \times 10^{26}\,\mathrm{W} \tag{5}$$

تابع ِ $R(\lambda)$ در $\lambda = 0$ و در $\lambda \to \infty$ صفر است، و در $\lambda_{\max}$ بیشینه می‌شود. $\lambda_{\max}$ به دما بسته‌گی دارد. می‌توان نشان داد که

$$\lambda_{\max}\, T = 2.898 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K} \tag{6}$$

در مورد ِ خورشید، بیشینه ی ِ تابش در طولِ‌موج ِ $\lambda_{\max} = 501\,\mathrm{nm}$ است (در ناحیه ی ِ مرئی) در حال ی که برا ی ِ جسم ِ سیاه ی که دما یش $250\,\mathrm{K}$ است، $\lambda_{\max}$ تقریباً $12\,\mu\mathrm{m}$ است (فروسرخ).

2 دما ی ِ مؤثر ِ یک سیّاره ی ِ خاکستری

فرض کنید زمین کاملاً پوشیده از برف باشد. در این صورت از دور چه طور به نظر می‌رسد؟ اوّلاً، نور ِ خورشید را باز می‌تاباند، و ثانیاً خود اش (که به هر حال به نوع ی یک جسم ِ سیاه است) تابش ِ گرمایی دارد. این دو تابش را می‌توان از هم تمیز داد. منجم ی که از دور دست زمین را نگاه می‌کند می‌تواند تشخیص بدهد که یک بخش از تابش ی که از زمین می‌گیرد بازتاب ِ نور ِ خورشید است (تقریباً تمام ِ آن چه در گستره ی ِ مرئی می‌بینند). امّا ضمناً پرتوها یی در گستره ی ِ فروسرخ هم از زمین می‌بینند، با قلّه ای در حدود ِ $12\,\mu\mathrm{m}$، و بسیار شبیه به طیف ِ یک جسم ِ سیاه. این طولِ‌موج متناظر است با $\lambda_{\max}$ ِ جسم ِ سیاه ی به دما ی ِ $250\,\mathrm{K}$. این دما چیز ی است که به آن دما ی ِ مؤثر ِ سطح ِ سیّاره می‌گوییم. در جدول، برا ی ِ چند سیّاره، مقدار ِ مشاهده‌شده ی ِ این دما در ستون ِ T_e^{obs} نوشته شده است. در همان جدول T_s دما ی ِ متوسط ِ سطح ِ سیّاره است. توجّه کنید که این دو دما با هم فرق دارند.

در عمل زمین هم‌گن نیست، و کاملاً پوشیده از برف نیست. می‌توان از دور تعیین کرد که زمین چه قدر سفید است. سفیدی ی ِ یک جسم، که عدد ی است بین ِ 0 و 1، یعنی نسبت ِ نور ی که از آن باز می‌تابد، به نور ی که به آن می‌رسد. سفیدی ی ِ ماه 0.07 است، در حال ی که سفیدی ی ِ زمین 0.3 است (این عدد تقریباً برابر است با کسر ی از سطح ِ زمین که پوشیده از یخ و ابر است). واضح است که سفیدی ی ِ زمین لحظه به لحظه تغییر می‌کند، و این 0.3 مقدار ِ متوسط ِ آن است.

سیّاره ای به شعاع ِ a در فاصله ی ِ d از خورشید در نظر بگیرید که بر مسیر ی بسته به دور ِ خورشید می‌گردد. می‌پرسیم: دما ی ِ مؤثر ِ سطح ِ چنین سیّاره ای، چیست؟

برا ی ِ ساده شدن ِ بحث فرض کنیم:

۱) مدار ِ سیّاره دایره باشد.

۲) سطح ِ سیّاره هم‌گن و خاکستری باشد، یعنی انرژی ای که از خورشید می‌گیرد برابر باشد با $(1-A)$ برابر ِ چیز ی که یک جسم ِ سیاه می‌گیرد. در این فرمول A سفیدی ی ِ سیّاره است.

۳) محور ِ حرکت ِ وضعی ی ِ سیّاره بر صفحه ی ِ مداری اش عمود باشد، و آن قدر تند دور ِ خود اش بچرخد که بتوان فرض کرد تمام ِ سطح ِ سیّاره یک دما دارد.

۴) چشمه ی ِ گرمایی ی ِ درونی (مثلاً مواد ِ پرتوزا) نداشته باشد.

از قانون ِ تابش ِ جسم ِ سیاه می‌دانیم که چنین سیّاره ای با آهنگ ِ $4\,\pi\,a^2\,\sigma\,T_e^4$ انرژی می‌تاباند، و با آهنگ ِ $(1-A)\,\pi\,a^2\,L_\odot/\left(4\,\pi\,d^2\right)$ از خورشید انرژی می‌گیرد. در حالت ِ تعادل، این دو باید برابر باشند، یعنی

$$4\,\pi\,a^2\,\sigma\,T_e^4 = (1-A)\,\pi\,a^2\,\frac{4\,\pi\,R_\odot^2\,\sigma\,T_\odot^4}{4\,\pi\,d^2}, \tag{7}$$

که اگر آن را ساده کنیم، می‌بینیم

$$T_e = \sqrt[4]{1-A}\,\sqrt{\frac{R_\odot}{2\,d}}\,T_\odot. \tag{8}$$

در جدول، مقدار ِ این T_e برا ی ِ چند سیّاره ی ِ مختلف محاسبه شده و در ستون ِ $T_e^{(\mathrm{model})}$ نوشته شده. جز برا ی ِ مشتری، $T_e^{(\mathrm{model})}$ و $T_e^{(\mathrm{obs})}$ به هم نزدیک اند.

چند نکته

- حرکت ِ وضعی ی ِ تیر بسیار کند است، به طور ی که هر دو بار که به دور ِ خورشید می‌گردد، سه بار به دور ِ خود اش می‌گردد. بنا بر این در مورد ِ تیر، دما ی ِ بخش ِ روز خیل ی بیش‌تر از دما ی ِ بخش ِ شب است.
- محور ِ حرکت ِ وضعی ی ِ اورانوس و پلوتون تقریباً در صفحه ی ِ مداری ی ِ آن‌ها است. به این ترتیب هر یک از قطب‌ها در نیم ی از " سال " رو به خورشید است.
- اگر فاصله ی ِ سیّاره از خورشید تغییر کند و مثلاً $(1+\alpha)\,d$ بشود، T_e در $(1-\frac{1}{2}\alpha)$ ضرب می‌شود. آن چه در جدول برا ی ِ d نوشته شده، در واقع نیم‌قطر ِ بزرگ ِ بیضی ی ِ مدار است. پس فاصله ی ِ سیّاره از خورشید بین ِ $(1-\epsilon)\,d$ تا $(1+\epsilon)\,d$ تغییر می‌کند. پس T_e در حضیض $(1+\frac{1}{2}\epsilon)$ برابر ِ چیز ی است که فرمول ِ (8) می‌گوید، و در اوج $(1-\frac{1}{2}\epsilon)$ برابر ِ آن است. برا ی ِ زمین با خروج از مرکز ِ 0.017، این متناظر است با T_e بین ِ $253\,\mathrm{K}$ در اوج و $258\,\mathrm{K}$ در حضیض. در مورد ِ پلوتون، که بیش‌ترین خروج از مرکز را دارد، $\epsilon = 0.250$، و $d = 59\times10^{11}\,\mathrm{m}$، و از این جا T_e بین ِ $34\,\mathrm{K}$ تا $43\,\mathrm{K}$ به دست می‌آید. ضمناً، سرعت ِ سیّاره در نزدیکی‌ها ی ِ حضیض بیش‌تر است. پس زمان ِ کم‌تر ی در حضیض است، و بنا بر این متوسط ِ دما بیشه‌تر به دما ی ِ کم‌تر (متناظر با اوج) نزدیک است.

سیاره	$d\ [10^{11}\ \mathrm{m}]$	A	$T_e^{(\mathrm{model})}$	$T_e^{(\mathrm{obs})}$	T_s	$P\ [10^5 \mathrm{Pa}]$
ناهید	1.1	0.77	$227\,K$	$230\,K$	$750\,K$	90
زمین	1.5	0.30	$256\,K$	$250\,K$	$280\,K$	1
مریخ	2.3	0.15	$216\,K$	$220\,K$	$218\,K$	0.006
مشتری	7.8	0.58	$98\,K$	$130\,K$	$134\,K$	2

جدول ۱: d فاصله از خورشید (بر حسب ِ $10^{11}\,\mathrm{m}$) است. A سفیدی است. P فشار ِ جو در سطح ِ سیّاره است (بر حسب ِ $10^5\,\mathrm{Pa}$). T_s دما ی ِ متوسط ِ سطح ِ سفت ِ سیّاره است. T_e دما ی ِ مؤثر ِ سیّاره است.

3 دما ی ِ سطح

دما ی ِ سطح ِ سیّاره، که در جدول با T_s مشخص شده، با T_e فرق دارد. علّت آن است که تمام ِ این سیّاره‌ها جو دارند، و جو می‌تواند دما ی ِ سطح ِ سیّاره را تغییر دهد. دقّت کنید که در مورد ِ مریخ، که جو ِ بسیار رقیق ی دارد، $T_s \simeq T_e$، امّا در مورد ِ ناهید این دو دما، T_e و T_s، بسیار متفاوت اند. علّت ِ این گرم‌تر بودن اثر ی است به نام ِ اثر ِ گل‌خانه‌ای.

حتماً دیده اید که اگر خودرو یی در آفتاب مانده باشد، و پنجره‌ها یش بسته باشد، درون اش بسیار گرم‌تر از محیط ِ بیرون است. علت آن است که نور ِ آفتاب از شیشه‌ها ی ِ پنجره به درون نفوذ می‌کند، در وسائل ِ درون ِ خودرو جذب می‌شود، و آن‌ها را گرم می‌کند. امّا این تمام ِ قصّه نیست، زیرا این اتفاق در نبود ِ شیشه‌ها ی ِ پنجره‌ها هم می‌افتد. مسئله این است که اجسام ِ گرم ِ داخل ِ خودرو تابش می‌کنند. عمده ی ِ این تابش در ناحیه ی ِ فروسرخ است و شیشه نسبت به پرتوها ی ِ فروسرخ کدر است. این باعث می‌شود گرما از درون ِ خودرو به بیرون نرود. این درست همان اثر ی است که باعث می‌شود درون ِ گل‌خانه بسیار گرم‌تر از محیط ِ اطراف باشد.

جو ِ سیاره‌ها گاز است. این گازها بعض ی برا ی ِ پرتوها ی ِ فروسرخ کدر اند (یعنی پرتوها ی ِ فروسرخ را به خوبی جذب می‌کنند). هر چه مقدار ِ این گازها (که به آن‌ها گازها ی ِ گل‌خانه‌ای می‌گویند) بیش‌تر باشد، سطح ِ سیّاره گرم‌تر می‌شود. این که ملکول‌ها ی ِ گازها ی ِ مختلف کدام پرتوها را جذب می‌کنند مسئله ای است که مکانیک ِ کوانتمی به آن جواب می‌دهد. تحلیل ِ مسئله معمولاً پیچیده است، امّا این نتیجه ی ِ نسبتاً ساده از آن به دست می‌آید:

ملکول‌ها یی مثل ِ H_2O، CO_2، O_3^-، بخش‌ها یی از پرتوها ی ِ فروسرخ را جذب می‌کنند، در حال ی که ملکول‌ها یی مثل ِ O_2، N_2، He، H_2 پرتوها ی ِ فروسرخ را کم‌تر جذب می‌کنند. وجود ِ آب، اُزُن، و کربن‌دی‌اکسید در جو زمین باعث شده که سطح ِ زمین گرم شود. اگر زمین جو نداشت، دما ی ِ متوسط ِ سطح اش حدود ِ $250\,\mathrm{K}$ می‌بود. 96% ِ جو ِ ناهید کربن‌دی‌اکسید، و 4% ِ آن N_2

است. این جو ِ گل‌خانه‌ای باعث شده سطح ِ ناهید داغ باشد. جو ِ مریخ هم گل‌خانه‌ای است، (95% کربن‌دی‌اکسید، 3% نیتروژن) امّا آن قدر رقیق است که تأثیر ِ چندان ی ندارد. جو ِ مشتری گل‌خانه‌ای نیست (90% هیدروژن، 10% هلیم). علّت ِ گرم بودن ِ سطح ِ مشتری تولید ِ انرژی در داخل ِ مشتری است.

4 انقباض ِ گرانشی ی ِ غول‌ها ی ِ گازی

از دور، می‌توان تشخیص داد که آیا در درون ِ سیّاره چشمه ی ِ گرمایی هست یا نه. برا ی ِ این کار کافی است توجّه کنیم که آهنگ ِ جذب ِ انرژی ی ِ خورشیدی در سیّاره هست

$$P_{\mathrm{abs}} = (1 - A)\,\pi\,a^2\,\frac{4\,\pi\,R_\odot^2\,\sigma\,T_\odot^4}{4\,\pi\,d^2} \tag{9}$$

و آهنگ ِ تابش اش هست

$$P_{\mathrm{rad}} = 4\,\pi\,a^2\,\sigma\,T_{\mathrm{e}}^4 \tag{10}$$

اختلاف ِ این دو برابر است با آهنگ ِ تولید ِ انرژی در سیّاره. مثلاً در مورد ِ مشتری، با محاسبه ای ساده می‌بینیم

$$P_{\mathrm{rad}} \;=\; 1.0 \times 10^{18}\,\mathrm{W} \tag{11}$$

$$P_{\mathrm{abs}} \;=\; 3.3 \times 10^{17}\,\mathrm{W} \tag{12}$$

که یعنی مشتری با توان ِ

$$P = P_{\mathrm{rad}} - P_{\mathrm{abs}} = 7 \times 10^{17}\,\mathrm{W} \tag{13}$$

انرژی تولید می‌کند. دیگر غول‌ها ی ِ گازی، یعنی کیوان و اورانوس و نپتون هم چنین اند. آن‌ها هم با توان‌ها یی بین ِ 10^{15} W تا 10^{17} W انرژی تولید می‌کنند. (از این جا نتیجه می‌گیریم که عامل ِ مهم ِ فعالیت‌ها ی ِ جوّی در غول‌ها ی ِ گازی، تولید ِ انرژی در درون ِ سیّاره است، بر خلاف ِ زمین، که عامل ِ اصلی ی ِ فعالیت‌ها ی ِ جوّی اش آفتاب است.)

منشاء ِ این انرژی، انقباض ِ گرانشی است. محاسبه کنیم: اگر کره ای به جرم ِ M و چگالی ی ِ ثابت ِ $\rho = 3\,M/(4\,\pi\,R^3)$ داشته باشیم، پتانسیل ِ گرانشی در نقطه ای به فاصله ی ِ r از مرکز برابر است با

$$\psi(r) = \begin{cases} \dfrac{G\,M}{2\,R}\left(\dfrac{r^2}{R^2} - 3\right) & r < R \\ -\dfrac{G\,M}{r} & r > R \end{cases} \tag{14}$$

در این عبارت، پتانسیل ـ بی‌نهایت صفر فرض شده. می‌توان نشان داد که انرژی ی‌ـ پتانسیل ـ گرانشی ی‌ـ چنین کره ای هست

$$\frac{1}{2}\int \rho\,\psi\,dv = \frac{1}{2}\,4\,\pi\,\rho\,\frac{G\,M}{2\,R}\int_0^R dr\,r^2\left(\frac{r^2}{R^2} - 3\right) = -\frac{3\,G\,M^2}{5\,R}. \tag{15}$$

در واقعیّت چگالی ی‌ـ سیاره‌ها و ستاره‌ها ثابت نیست، و این باعث می‌شود ضریب ـ عددی ی‌ـ این فرمول عوض شود، امّا مرتبه ی‌ـ بزرگی ی‌ـ آن عوض نمی‌شود. بنا بر این، برا ی‌ـ محاسبه، انرژی ی‌ـ بسته‌گی ی‌ـ گرانشی ی‌ـ یک گوی را $-G\,M^2/R$ می‌گیریم.

اگر R تغییر کند، این انرژی تغییر می‌کند. اگر R کم شود، این انرژی منفی‌تر می‌شود، که یعنی مقدار ی‌ـ انرژی آزاد می‌شود. این انرژی ی‌ـ آزاد شده گوی را گرم می‌کند. با دیفرانسیل‌گیری از معادله ی‌ـ بالا می‌بینیم

$$\Delta E = \frac{G\,M^2}{r^2}\,\Delta r \tag{16}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{G\,M^2}{r^2}\,\frac{dr}{dt} \tag{17}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dE}{dt}\cdot\frac{r^2}{G\,M^2} \tag{18}$$

مشتری با توان ـ $P \simeq 10^{18}\,\mathrm{W}$ انرژی تولید می‌کند. این می‌تواند با از دست دادن ـ انرژی ی‌ـ گرانشی با توان ـ $-P$ باشد. از این جا

$$\frac{dr}{dt} = -10^{18}\frac{(7\times10^7)^2}{6.7\times10^{-11}\times(1.9\times10^{27})^2} \simeq -2\times10^{-11}\,\mathrm{m\,s^{-1}} \simeq -1\,\mathrm{mm/yr} \tag{19}$$

شعاع ـ مشتری $7\times10^7\,\mathrm{m}$ است. اگر مشتری هم‌واره با این آهنگ کوچک شود، از مرتبه ی‌ـ 10^{11} سال زمان لازم است تا شعاع ـ مشتری تغییر ـ قابلِ‌ملاحظه ای بکند. این صد بار بیش‌تر از سن ـ منظومه ی‌ـ شمسی است! پس مشتری، از هنگام ـ پیدایش اش، تغییر ـ محسوس ی نکرده.

خورشید هم با توان ـ $L_\odot \simeq 4\times10^{26}\,\mathrm{W}$ تابش می‌کند. اگر فرض کنیم منشاء ـ انرژی‌ـ خورشید هم انقباض ـ گرانشی است، آهنگ ـ انقباض ـ خورشید می‌شود

$$\frac{dr}{dt} \simeq -10^{-6}\,\mathrm{m\,s^{-1}} \sim 10\,\mathrm{m/yr}. \tag{20}$$

مرتبه ی ِ بزرگی ی ِ زمان ِ انقباض ِ خورشید (اگر سازوکار ِ تولید ِ انرژی در آن انقباض ِ گرانشی باشد) می‌شود $10^{15}\,\mathrm{s}$ یعنی حدود ِ 10^7 سال! این عدد بسیار کوچک است، و البته سازوکار ِ تولید ِ انرژی در خورشید چیز ِ دیگر ی است.

5 دما ی ِ یو (Io)

فاصله ی ِ متوسط ِ ماه ِ یک سیّاره از خورشید، با فاصله ی ِ متوسط ِ سیّاره از خورشید برابر است. پس تنها عامل ی که در فرمول ِ (8) بین ِ ماه و سیّاره فرق می‌گذارد سفیدی ی ِ آن دو است. مشتری ماه ی دارد به نام ِ یو (Io) که تقریباً هم‌اندازه است با ماه ِ زمین. سفیدی ی ِ یو 0.61 است که تقریباً برابر است با سفیدی ی ِ مشتری. پس قاعدتاً باید دما ی ِ یو هم $98\,\mathrm{K}$ باشد. امّا آن چه می‌بینیم این است که دما ی ِ سطح ِ یو یک‌نواخت نیست. نقطه‌ها یی دارد که نسبتاً داغ اند (تا $2000\,\mathrm{K}$) با متوسط ِ $T \sim 300\,\mathrm{K}$، و باقی ی ِ سطح ِ آن هم تقریباً $135\,\mathrm{K}$ است. در ناحیه ی ِ داغ فعّالیت‌ها ی ِ آتش‌فشانی هست، که نشان می‌دهد درون ِ یو داغ است. علّت ِ داغ بودن ِ درون ِ یو، کشندها ی ِ ناشی از دو ماه ِ دیگر ِ مشتری به نام‌ها ی ِ اروپا و گانیمِد، و کشند ِ ناشی از خود ِ مشتری است. عدد ِ $135\,\mathrm{K}$ خیل ی نزدیک به دما ی ِ سطح ِ مشتری است. آیا می‌توان آن را ناشی از جذب ِ تابش ِ مشتری دانست؟ نه. زیرا توان ِ جذب ِ تابش ِ مشتری در یو حد اکثر برابر است با

$$\pi\, a^2\, \sigma T_{\mathrm{J}}^4\, \frac{4\,\pi\, R_{\mathrm{J}}^2}{4\,\pi\, d'^2} \tag{21}$$

که در این جا $R_{\mathrm{J}} = 7 \times 10^7\,\mathrm{m}$ شعاع ِ مشتری، و $d' = 4.2 \times 10^8\,\mathrm{m}$ فاصله ی ِ یو از مشتری، و $T_{\mathrm{J}} = 130\,\mathrm{K}$ دما ی ِ مشتری است. اگر این را به سمت ِ راست ِ (7) اضافه کنیم، و از آن جا دما ی ِ مؤثر ِ سطح ِ یو را حساب کنیم، نتیجه تقریباً هیچ فرق ی نمی‌کند (زیرا این جمله تقریباً یک صدم ِ جمله ی ِ مربوط به جذب ِ انرژی ی ِ خورشید است). آیا بازتاب ِ نور ِ خورشید از مشتری می‌تواند یو را این قدر گرم کرده باشد؟ باز هم نه. تخمین بزنیم: شار ِ انرژی ی ِ خورشیدی، در سطح ِ مشتری هست

$$\frac{4\,\pi\, R_\odot^2\, \sigma\, T_\odot^4}{4\,\pi\, d^2} \simeq 50\,\mathrm{W\,m^{-2}} \tag{22}$$

کسر ِ $A = 0.58$ ِ این مقدار از مشتری باز می‌تابد. این بازتاب مثل ِ یک موج ِ کروی که مرکز ِ آن مرکز ِ مشتری ی است منتشر می‌شود. وقت ی به یو می‌رسد، شدّت ِ این نور هست

$$A \left(\frac{R_{\mathrm{J}}}{d}\right)^2 \times 50\,\mathrm{W\,m^{-2}} \simeq 1\,\mathrm{W\,m^{-2}} \tag{23}$$

که تقریباً دو صدم ِ توان دریافت ِ مستقیم از خورشید است.

پس یو هم انرژی تولید می‌کند. توان ِ تولید ِ انرژی در یو را هم می‌توان حساب کرد (همان طور که برا یِ مشتری حساب کردیم). این توان 10^{15} W است. معقول‌ترین نظریه ای که فعلاً هست این که این توان تماماً مربوط است به اصطکاک ِ ناشی از نیروها یِ کشندی.

مرجع‌ها

جدول را از منبع ِ 1، و بقیّه یِ عددها را از دو مرجع ِ دیگر برداشته ام. دقّت کنید که مرجع ِ سوّم تا حد ی قدیمی است.

1. John Houghton: *The Physics of Atmospheres*, 3ed edition, Cambridge, 2002.
2. David Darling: *The Universal Book of Astronomy*, Wiley, 2004.
3. Martin Harwit: *Astrophysical Concepts*, 2ed edition, Springer, 1988.

یک روز که [من و بورکهارد درودہ[1] در گوتینگن] داشتیم در بارهٔ مشکلات مفهوم مدار الکترون صحبت می‌کردیم، او گفت که علی‌الاصول باید بتوان میکروسکپی ساخت با چنان قدرت تفکیکی که بتواند مسیر الکترون را در داخل اتم مشاهده یا عکسبرداری کند. واضح بود که چنین میکروسکپی با امواج معمولی نور نمی‌تواند کار کند، اما شاید بتواند با پرتوهای گاما کار کند. ولی این امر با فرضیهٔ من مغایر بود، زیرا فرضیهٔ من می‌گفت که حتی بهترین میکروسکپها هم نمی‌تواند از حدودی که اصل عدم‌قطعیت تعیین می‌کند، پا بیرون بگذارد. پس لازم بود ثابت کنم که حتی در این مورد هم اصل عدم‌قطعیت برقرار است. این کار را انجام دادم و ثابت شدن آن اعتقاد مرا به انسجام تعبیر جدید تقویت کرد. بعد از چند محاسبه از این نوع، نشستم و نتایج کارم را در نامهٔ مفصلی برای ولفگانگ پاؤلی خلاصه کردم. پاسخ دلگرم کنندهٔ او بسیار باعث خوشحالی من شد.

ورنر هایزنبرگ: جزء و کل، مرکز نظر دانشگاهی، ۱۳۶۸، ص ۸۰

[1] Burkhard Drude