

چرا ستاره‌ها چشمک می‌زنند؟

mamwad@mailaps.org

محمد خرمی

چشمک زدن - ستاره‌ها بررسی می‌شود. علت - این پدیده آن است که طول - هم‌دوسی ی نور - ستاره‌ها، از طول - مشخصه ی ناهم‌گنی‌ها ی جو بیش‌تر است. طول - هم‌دوسی بر حسب - اندازه ی زاویه‌ای ی جسم و طول‌موج - تابش - گسیلیده از آن به دست می‌آید.

0 مقدمه

یک ی از راه‌ها ی ساده ای که برا ی تشخیص - ستاره از سیاره پیش‌نهاد می‌شود این است که ستاره‌ها چشمک می‌زنند و سیاره‌ها چشمک نمی‌زنند. علت - چشمک زدن آن است که جو - زمین کاملاً هم‌گن نیست و نور را می‌پراکند. اگر نوری که به جو می‌رسد، در مقیاس ی بزرگ‌تر از طول - مشخصه ی ناهم‌گنی ی جو هم‌دوس باشد، جو مثل - یک توری ی پراش عمل می‌کند و این نور را در فقط زاویه‌ها ی خاص ی می‌گذراند. جو - زمین (ونا هم‌گنی‌ها یش) ساکن نیست و به همین خاطر جهت - انتشار - نور - چشمه، پس از گذشتن از جو با زمان تغییر می‌کند. این یعنی جهت - ظاهری ی چشمه، با زمان جابه‌جا می‌شود: در یک لحظه چشمه را در یک جهت می‌بینیم و کم ی بعد در یک جهت - نزدیک به آن. انگار چشمه ی قبلی خاموش شده و چشمه ی جدید ی در یک جهت -

چرا ستاره‌ها چشمک می‌زنند؟

دیگر (نزدیک به جهت - قبلی) روشن شده است. این چشمک‌زدن است. برای چشمک‌زدن، نور - حاصل از چشمه باید در جو پراشیده شود، و برای این لازم است طول - هم‌دوسی ی این نور در جو بیش از طول - مشخصه ی ناهم‌گنی‌ها ی جو باشد. نورها ی حاصل از نقطه‌ها ی مختلف - یک چشمه ی بزرگ (در مقایسه با طول موج) علی‌الاصول رابطه ی فازی ی معین ی با هم ندارند. خواهیم دید با وجود - این موج‌ها ی حاصل از یک چشمه ی بزرگ در دو نقطه ی فضا رابطه ی فازی ی مشخص با هم دارند (یعنی یک ی مضرب ی از دیگری است) به شرط - آن که فاصله ی این دو نقطه از هم از حد - معین ی کم‌تر باشد. به این حد طول - هم‌دوسی می‌گویند.

1 طول - هم‌دوسی

چشمه ی یک موج در نقطه ی \mathbf{r}' را با $S(\mathbf{r}')$ نشان می‌دهیم. خود - موج در نقطه ی \mathbf{r} را با $\psi(\mathbf{r})$ نشان می‌دهیم. در این صورت داریم

$$\psi(\mathbf{r}) = \int d^3 r' \frac{e^{i k |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} S(\mathbf{r}'). \quad (1)$$

انتگرال‌گیری روی چشمه است. این رابطه برای فضا ی سه‌بعدی نوشته شده و ψ و S هم تبدیل - فوریه [a] ی زمانی ی موج و چشمه اند. k هم عدد - موج است:

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad (2)$$

که ω بس آمد - زاویه‌ای و c سرعت - انتشار - موج است. این‌ها را می‌شود در مثلاً [1] پیدا کرد.

هدف مقایسه ی $\psi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})$ با $\psi(\mathbf{r})$ است. دور از چشمه، (که فرض می‌شود جای‌گزیده است) عبارت - (1) می‌شود

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{e^{i k r}}{r} \int d^3 r' e^{i k (|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| - r)} S(\mathbf{r}'). \quad (3)$$

داریم

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}' + \Delta\mathbf{r}| = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| + \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \cdot \Delta\mathbf{r}, \quad |\Delta\mathbf{r}| \ll |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad (4)$$

اگر اندازه ی چشمه (که فرض می شود حول - مبدئ جای گزیده است) خیلی کوچک تر از فاصله تا چشمه باشد، طرف - راست را می شود ساده تر کرد:

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}' + \Delta\mathbf{r}| = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| + \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \cdot \Delta\mathbf{r} + O\left(\frac{r'}{r} |\Delta\mathbf{r}|\right), \quad |\Delta\mathbf{r}| \ll |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, r' \ll r. \quad (5)$$

حالا فرض کنید

$$k \frac{r'}{r} |\Delta\mathbf{r}| \ll 2\pi. \quad (6)$$

در این صورت از (3) نتیجه می شود

$$\psi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \Delta\mathbf{r}} \frac{e^{ikr}}{r} \int d^3r' e^{ik(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| - r)} S(\mathbf{r}'), \quad (7)$$

که

$$\mathbf{k} := \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} k. \quad (8)$$

از مقایسه ی (7) با (3) نتیجه می شود

$$\psi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \Delta\mathbf{r}} \psi(\mathbf{r}). \quad (9)$$

این نشان می دهد رابطه ی بین $\psi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})$ و $\psi(\mathbf{r})$ شبیه - رابطه ی بین - مقدار - یک موج - هم دوس با بردار موج - \mathbf{k} در نقطه ها ی \mathbf{r} و $(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})$ است. توجه کنید که برای رسیدن به (9) از شکل - $S(\mathbf{r}')$ استفاده نشده. در واقع چیزی که به دست آمده آن است که اختلاف فاز - نقطه ی $(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})$ با هر یک از نقطه ها ی چشمه، برابر است با اختلاف فاز - نقطه ی \mathbf{r} با همان نقطه ی چشمه به اضافه ی مقداری که به نقطه ی چشمه بسته گی ندارد.

البته شرط - درستی ی (9) آن است که (6) برقرار باشد. رابطه ی اخیر را می شود چنین نوشت.

$$|\Delta\mathbf{r}| \ll \ell_c, \quad (10)$$

که

$$\ell_c := \frac{\lambda}{\theta}. \quad (11)$$

چرا ستاره‌ها چشمک می‌زنند؟

ℓ_c طول - هم‌دوسی، λ طول‌موج، و θ اندازه‌ی زاویه‌ای‌ی چشمه است. خلاصه این که موج حاصل از چشمه، در فاصله‌ها‌یی کوچک‌تر از طول - هم‌دوسی مثل - یک موج - هم‌دوس رفتار می‌کند.

2 ناهم‌گنی‌ها‌یِ جَو و چشمک‌زدن

ناهم‌گنی‌ها‌یِ جَو باعث - پراکنده‌گی‌ی نور - گذرنده از جَو می‌شود. مقیاس - طولی‌ی این ناهم‌گنی‌ها (ℓ_1) از مرتبه‌ی متر است [2]:

$$\ell_1 \sim 1 \text{ m.} \quad (12)$$

اگر طول - هم‌دوسی‌ی نور - حاصل از چشمه بزرگ‌تر از این طول باشد، ناهم‌گنی‌ها‌یِ جَو این نور را پراش می‌دهند و باعث می‌شوند این نور در زاویه‌ها‌یِ خاص‌ی پراکنده شود. البته ناهم‌گنی‌ها‌یِ جَو وابسته به زمان اند و به همین خاطر جهت - انتشار - نور - پراکنده، با زمان تغییر می‌کند. همین باعث می‌شود به نظر برسد جا‌یِ چشمه، با زمان تغییر می‌کند. از برابرگذشتن - ℓ_c با ℓ_1 یک مقیاس برای اندازه‌ی زاویه‌ای‌ی چشمه به دست می‌آید:

$$\theta_0 \sim \lambda m^{-1}. \quad (13)$$

اگر اندازه‌ی زاویه‌ای‌ی چشمه‌ای خیل‌ی کوچک‌تر از این حد باشد، این چشمه چشمک می‌زند. اگر اندازه‌ی زاویه‌ای‌ی چشمه‌ای خیل‌ی بزرگ‌تر از این حد باشد، این چشمه چشمک نمی‌زند. برای نور - مرئی با طول‌موج - از 400 nm تا 800 nm،

$$\theta_0 \sim 10^{-6}. \quad (14)$$

اندازه‌ی زاویه‌ای‌ی سیاره‌ها‌یی که با چشم - غیر - مسلح قابل‌دیدن اند، بین - 10^{-5} تا 10^{-4} است. (قطر - این سیاره‌ها و فاصله‌یشان از زمین، در مثلاً پی‌وست [3] آمده است.) فاصله‌ی نزدیک‌ترین ستاره از ما 1.3 pc (حدود - 4×10^{16} m) است مثلاً پی‌وست [3] از 13). اگر قطر - این ستاره را از مرتبه‌ی قطر - خورشید (1.4×10^9 m) بگیریم، اندازه‌ی زاویه‌ای‌ی آن از مرتبه‌ی 10^{-7} می‌شود. پس اندازه‌ی زاویه‌ای‌ی ستاره‌ها (جز خورشید) از 10^{-7} کم‌تر است.

به این ترتیب، اندازه ی زاویه‌ای ی سیاره‌ها یی که با چشم ـ غیر مسلح قابل دیدن اند بیش از θ_0 ، و اندازه ی زاویه‌ای ی ستاره‌ها کم‌تر از θ_0 است. سیاره‌ها چشمک نمی‌زنند و ستاره‌ها چشمک می‌زنند.

3 مرجع‌ها

- [1] John David Jackson; “Classical electrodynamics”, 3rd edition (John Wiley & Sons, 1998) chapter 9
- [2] F. Graham Smith & Terry A. King; “Optics and photonics: an introduction”, (John Wiley & Sons, 2000) section 2.16
- [3] George O. Abell, David Morrison, & Sidney C. Wolff; “Exploration of the universe”, fifth edition (Saunders College Publishing, 1987)

4 اسم ـ خاص

- [a] Fourier