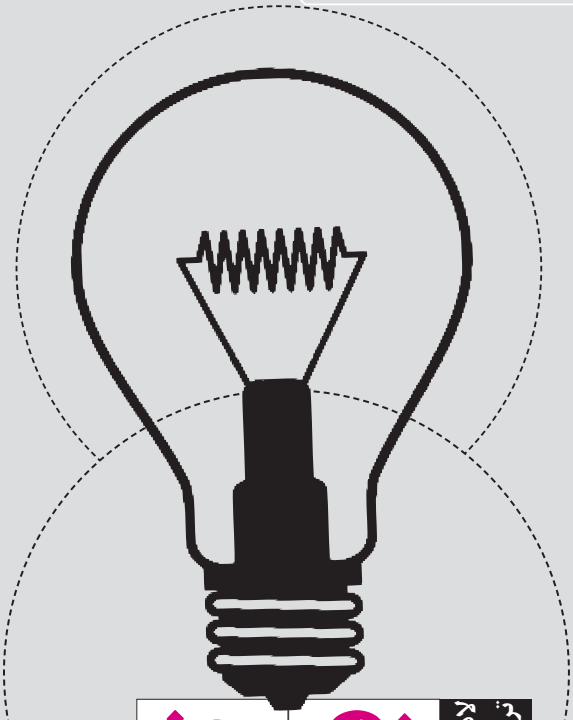


تابش سنج کروکس به‌عنوان ماشین گرمایی

لادکو بسکی و پین چوک
ترجمهٔ احمد توحیدی

در حالی‌که تابش‌سنج به‌عنوان یک وسیلهٔ سرگرمی (آزمایشگاهی) در دسترس همه قرار دارد، اما وودراف[1] خاطرنشان می‌کند که تابش‌سنج وسیلهٔ بسیار مفیدی هم هست که به ما کمک می‌کند تا مسائل علمی معینی را حل کنیم. بسیاری از فیزیک‌دان‌ها فکر می‌کنند طرز کار تابش‌سنج را می‌دانند، اما در واقع فقط تعداد کمی با طرز کار آن آشنا هستند. در این مقاله آزمایشی ارائه شده است که نشان می‌دهد تابش‌سنج را می‌توان یک ماشین گرمایی درنظر گرفت.

تابش‌سنج پره‌هایی دارد که یک طرف آن به رنگ سیاه (تاریک) و طرف دیگر آن براق (روشن) است. این وسیله را ویلیام کروکس[2] شیمی‌دان در سال ۱۸۷۳/۱۲۵۲ اختراع کرد. نظر نادرست او دربارهٔ طرز کار این وسیله آن بود که با استفاده از فشار نور می‌توان نیروهایی که باعث چرخیدن پره‌ها می‌شوند را توضیح داد. ابتدا جمیز کلارک ماکسول[3] که نیروی نور را پیش‌بینی کرده بود نظر کروکس را تأیید کرد. این توضیح هنوز حتی گاهی در کتابچه‌های راهنمای وسایل آزمایشگاهی دیده می‌شود. در سال ۱۸۷۶/۱۲۵۵ آرتورشوستر[4] نظر کروکس را نپذیرفت. او در آزمایش‌هایش متوجه شد نیرویی که نور روی پره‌ها وارد می‌کند در خلاف جهت چرخش آن‌ها است. جهت چرخش پره‌ها همواره طوری است که سطح براق پیشرو و سطح سیاه به دنبال آن است. اگر فشار نور عامل اصلی چرخش باشد هرچه در حباب خلاء بالاتری ایجاد شود، چون مقاومت هوا در مقابل حرکت پره‌ها کمتر می‌شود پس پره‌ها باید سریع‌تر بچرخند. در سال ۱۹۰۱/۱۲۸۰ پیوتر لبدُف[5] دانشمند روسی با استفاده از تلمبه خلاء اصلاح‌شده‌ای تابش‌سنج کروکس را از هوا تخلیه کرد. او ثابت کرد فقط در حالی‌که فشار هوای درون حباب پایین است تابش‌سنج کار می‌کند. پره‌ها در حالت خلاء کامل کار نمی‌کنند. بنابراین، اگر فشار نور، نیروی محرک بود، تابش‌سنج باید خلاف جهت معمول بچرخد. فوتونی که از پرهٔ براق بازتابیده می‌شود به آن گشتاور بیشتری نسبت به فوتونی می‌دهد که درطرف سیاه جذب شده است. بنابراین فشار نور بسیار پایین‌تر از آن است که بتواند باعث حرکت پره‌ها شود.

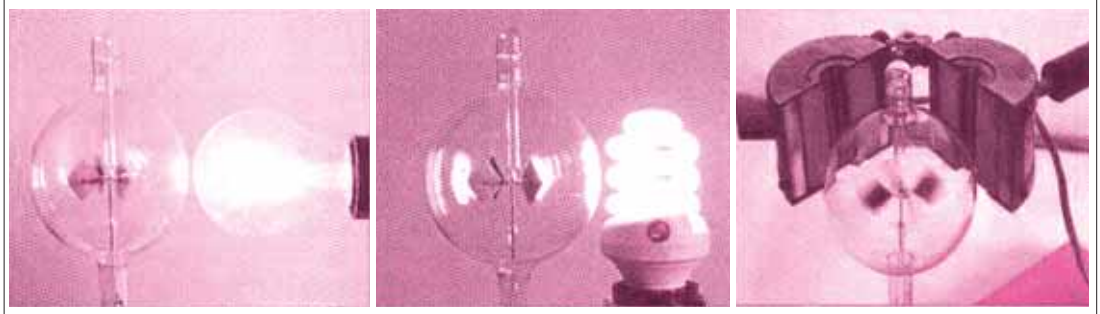
توضیح دیگری برای چرخش پره‌ها ارائه شد. مولکول‌های گاز (هوا) که به طرف سیاه پره برخورد

می‌کنند قسمتی از انرژی گرمایی آن‌را جذب کرده و با سرعت بیشتری از آن کمانه می‌کنند. عدم تعادل فشار میان طرف سیاه گرم و طرف براق سرد پرده بدین معناست که باید فشار خالصی روی طرف سیاه وارد شود و در نتیجه پره بچرخد در حالی‌که باید طرف براقِ پیشرو باشد. مشکل این نظریه آن است در حالی‌که واقعاً مولکول‌ها با سرعت بیشتر نیروی بیشتری وارد می‌کنند اما در عین‌حال باعث می‌شوند تعداد مولکول‌های کمتری به پره برخورد کنند. بنابراین، با آنکه نیروی خالص روی سطح سیاه پره به علت سرعت بالاتر مولکول‌های واپس‌زده بزرگ‌تر است، اما با کمتر شدن تعداد واقعی برخوردها نیروی وارد بر پره کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، استدلال نخست پذیرفتنی نیست زیرا اگرچه طرف سیاه پره دمای بالاتری دارد اما در نزدیک سطح آن چگالی مولکول‌ها هم پایین است. با این حال سال‌ها بعد آلبرت اینشتین ثابت کرد به علت اختلاف دما در لبهٔ پره‌ها هر دو فشار درست با یکدیگر برابر نیستند. نیرویی که اینشتین پیش‌بینی کرد باید برای حرکت دادن پره‌ها کافی باشد اما با سرعتی پایین‌تر از آنچه انتظار می‌رود.

ازبُرن رینولدز[6] تعرق گرمایی آخرین قسمت معمای مسئله را پیش‌بینی کرد. شایان توجه است که جیمز کلارک ماکسول اولین کسی بود که در آخرین کتاب خود به تعرق گرمایی اشاره می‌کند. رینولدز دریافت در حالتی که یک طرف صفحه متخلخلی داغ‌تر از طرف دیگر باشد به علت برهم کنش میان مولکول‌ها، گاز از طرف سرد به طرف داغ جریان پیدا خواهد کرد. با اینکه پره‌های تابش‌سنج متخلخل نیستند، اما فاصله میان لبه‌های آن‌ها و دیواره‌های حباب مانند حفره‌های صفحه رینولدز عمل می‌کنند. در نتیجه، وقتی که نسبت فشار مولکول‌های گاز کمتر از ریشه دوم نسبت دماهای مطلق‌شان است آن‌ها از طرف داغ به طرف سرد حرکت می‌کنند. اختلاف فشار باعث حرکت پره‌ها در جهت پیشرو بودن طرف سرد (براق) می‌شود. احتمالاً سازوکاری که اینشتین و رینولدز پیشنهاد کردند علت اصلی چرخش تابش‌سنج کروکس است. اگرچه تا به حال روشن نشده است که کدام‌یک از نیروها، برخورد بزرگ‌تری خواهند داشت.

در این مقاله یک آزمایش ابتکاری ارائه شده است که به دانش‌آموزان این توانایی را خواهد داد که ببینند در یک تابش‌سنج چگونه انرژی یک گرمکن گرمایی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. بنابراین تابش‌سنج را می‌توان به‌عنوان یک ماشین گرمایی در نظر گرفت.

با مقایسه عکس‌های شکل ـ ۱ می‌توانید اثر تابش‌سنجی را وقتی که پره‌ها به‌وسیلهٔ یک لامپ التهابی و یا یک گرمکن الکتریکی روشن می‌شوند ببینید. وقتی پره‌ها با تابش یک لامپ فلوئورسان فشرده با شدت نور یکسان با چشم‌های بالا روشن می‌شوند، نمی‌چرخند. دلیل پدیده مشاهده شده این است که نوار فروسرخ امواج الکترومغناطیسی سطح سیاه پره‌ها را بهتر از نوار مریی امواج الکترومغناطیسی گرم می‌کند.



شکل ۱. شکل ۱۰ مقایسه اثر سه منبع امواج الکترومغناطیسی در به چرخش درآوردن پره‌های تابش‌سنج. توان الکتریکی کل لامپ التهابی در حدود ۶۰ وات و توان تابشی کمینه آن ۸۰۰ لومن است، در حالی که توان لامپ فلوئورسان فشرده ۱۳ وات و توان تابشی آن ۸۰۰ لومن است. توان کل الکتریکی گرمکن در طرف راست ۶۰ وات است.

* A new way to Demonstrate the Radiometer as a Heat Engine

پی‌نوشت‌ها

1. Woodruff
2. William Crookes
3. James Clerk Maxwell
4. Arthur Schuster
5. Pyotr lebedev
6. Osborne Reynolds

منبع

The Physics Teacher. Vol.53, February 2015