ترمودینامیک، فرا نظریه‌ای در قلب فیزیک: از تابش پلانک تا ساختار آینده فضا_زمان

قدیر جعفری

ghadir.jafari@gmail.com

کانال فیزیک نظری:

@Theoretical_Physics_News

چکیده

در این مقاله جایگاه بی‌بدیل ترمودینامیک در ساختار نظری فیزیک مورد بررسی قرار گرفته است. از نقش آن در پیدایش نظریه کوانتوم گرفته تا کاربردهای نوین آن در تحلیل ساختار فضا_زمان، گرانش و نظریه کوانتومی. ما استدلال می‌کنیم که ترمودینامیک نه فقط یک نظریه، بلکه زبان پایه‌ای فیزیک آینده می تواند باشد.

۱ مقدمه

ترمودینامیک یکی از نظریه‌های بنیادین فیزیک است که با وجود تحولات اساسی در فیزیک، از جمله پیدایش مکانیک کوانتومی و نسبیت عام، همچنان ساختار خود را حفظ کرده است. این نظریه، به‌ویژه از منظر قانون دوم ترمودینامیک، چنان اعتبار و سخت‌گیری‌ای دارد که هیچ نظریه فیزیکی جدیدی بدون سازگاری با آن، جدی گرفته نمی‌شود. این پایداری شگفت‌انگیز، ممکن است ما را به این اندیشه برساند که ترمودینامیک نه صرفاً یک نظریه، بلکه یک "فرانظریه" است: چارچوبی کلی که دیگر نظریه‌ها باید درون آن قرار گیرند و با آن سازگار باشند.

یکی از دلایل پایداری ترمودینامیک این است که برخلاف بسیاری از نظریه‌های دیگر، بر مدل خاصی از ماده یا ساختار دقیق میکروسکوپی تکیه ندارد. بلکه چارچوبی کلی برای توصیف سیستم‌های فیزیکی در تعادل ترمودینامیکی فراهم می‌کند که در آن مفاهیم کلیدی مانند **انرژی** و **آنتروپی** نقش محوری دارند. ترمودینامیک فقط به گازها محدود نمی‌شود. حتی در سیستم‌های مغناطیسی، ابررساناها، و مدل‌های کیهان‌شناسی نیز می‌توان کمیت‌هایی مانند انرژی و آنتروپی را تعریف و تحلیل کرد. در واقع، این مفاهیم، مستقل از پارامترهای خاص هر سیستم، در هسته اصلی نظریه حضور دارند.

۱.۱ پلانک و پیدایش نظریه کوانتومی: روایت تاریخی یک انگیزه ترمودینامیکی

روایت مرسوم از پیدایش مکانیک کوانتومی، آن را حاصل ناسازگاری نظریه‌های کلاسیک با طیف تابش جسم سیاه می‌داند. اما بررسی دقیق‌تر تاریخی نشان می‌دهد که این ناسازگاری، در واقع، بیشتر بین نظریات کلاسیک تابش و

اصول ترمودینامیک، به‌ویژه قانون اول و دوم، بوده است. در حقیقت انگیزه های پلانک عموما نظری (و نه تجربی) بوده است و مرتبط با نظریه ترمودینامیک. بنابراین نقش ترمودینامیک در پیدایش مکانیک کوانتومی پررنگ‌تر از آن چیزی است که معمولاً تصور می‌شود. پلانک هنگام بررسی تابش جسم سیاه، نه از روی ناسازگاری داده‌های تجربی با نظریه‌های کلاسیک، بلکه به دلیل ناسازگاری آن‌ها با اصول ترمودینامیکی به دنبال فرمول جدیدی برای تابش گشت. [۱–۳] او رابطه‌ای میان آنتروپی و انرژی را مبنا قرار داد و از این مسیر به فرمول معروف خود رسید.

۲ انرژی و آنتروپی در فیزیک کلاسیک

۱.۲ انرژي در فیزیک کلاسیک

در مکانیک کلاسیک، انرژی بیشتر به عنوان ابزاری ریاضی برای ساده‌سازی حل معادلات حرکت استفاده می‌شود. اما در ترمودینامیک، انرژی کمیتی بنیادی است که جنبه اصلی هر سیستم ترمودینامیکی است. نظریه کالری که گرما را نوعی سیال فرض می‌کرد، با تجربیاتی مانند تبدیل انرژی مکانیکی به گرما، به تدریج جای خود را به نظریه انرژی داد. به عنوان مثال، در آزمایش معروف جیمز جول، انرژی مکانیکی به گرما تبدیل شد و افزایش دمای آب به‌صورت تجربی اندازه‌گیری گردید.

اما انرژي در نظریات کلاسیک بعد از مکانیک که در آن ها مفاهیم میدان به صورت بنیادی ظاهر می شود جایگاه مهم تری پیدا می کند. در نظریه میدان‌ها انرژی بین ذرات و میدان های تبادل می شود بنابراین میدان دارای انرژی است. انرژی به صورت چگالی (به صورت محلی) در میدان توزیع می‌شود. برای مثال در الکترودینامیک،

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2\right). \tag{۱}$$

تابش که در ترمودینامیک ارتباط نزدیکی به مفهوم گرما داشت توسط انرژی امواج الکترومغناطیسی تعریف می شود.

نظریه الکترومغناطیس همچنین توضیح میداد که ذرات باردار چگونه با یکدیگر برهمکنش می کنند: **از طریق میدان واسطه.**

انتظار وجود یک نظریه میدان برای گرانش طبیعی بود. این نظریه میدان برای گرانش نسبیت عام نام دارد. اما در نسبیت عام، تعریف چگالی انرژی (به صورت محلی) برای میدان گرانشی با مشکل روبه‌رو می‌شود. در این حالت می توان گفت انرژي به صورت محلی در درجات آزادی از سیستم ذخیره می شود که به آن دسترسی نداریم. این موضوع شبیه به زمانی است که گرما را تعریف می کنیم. گرما انرژي ذخیره شده در درجات آزادی از سیستم است که به آن ها دسترسی نداریم. به صورت مشابه با تردمودینامیک فقط می توانیم راجع به کل سیستم و ارتباط آن با سایر کمیت ها صحبت کنیم و آن هم در شرایط تعادلی. شباهت های نظریه گرانش با ترمودینامیک فراتر از این می رود. به صورت خاص می فهمیم که برای سیستم های گرانشی یک کمیت مهم شبیه آنتروپی وجود دارد.

۲.۲ قوانین (ترمودینامیک) سیاه چاله ها

یکی نتیجه جالب در فیزیک گرانش شباهت قوانین مکانیک سیاه‌چاله‌ها با قوانین ترمودینامیک است [۴]. این قوانین عبارت‌اند از :

- **قانون صفرم**: گرانش سطحی روی افق سیاه‌چاله ها در حالت تعادل ثابت است.
- **قانون اول**: تغییرات جرم، سطح افق و بار الکتریکی به‌صورت زیر به هم مرتبط‌اند:

$$\mathrm{d}M = \frac{\kappa}{8\pi}\,\mathrm{d}A + \Phi\,\mathrm{d}Q + \Omega\,\mathrm{d}J\,. \qquad (۲)$$

- **قانون دوم**: مساحت افق سیاه‌چاله‌ها در فرایندهای فیزیکی افزایش می‌یابد:

$$\Delta A \geq 0. \qquad (۳)$$

- **قانون سوم**: نمی‌توان دمای سطح افق را در تعداد متناهی مراحل به صفر رساند.

اگر این معادلات را با قوانین ترمودینامیک مقایسه کنیم، M نقش انرژی داخلی، κ نقش دما، A نقش آنتروپی، و Φ, Ω نیز مشابه پتانسیل‌های ترمودینامیکی را بازی می‌کنند.

۳.۲ آنتروپی سیاه‌چاله‌ها و معنای بنیادی آن

یک کشف شگفت‌انگیزترین در فیزیک نظری، این نکته بود که این شباهت ها بین قوانین سیاه چاله ها و ترمودینامیک بی دلیل نیست و در حقیقت ما ناچار هستیم که به سیاه‌چاله‌ها آنتروپی نسبت دهیم. این ایده برای اولین بار به صورت جدی توسط بکنشتاین مطرح شد [۵] . او استدلال کرد که اگر قانون دوم ترمودینامیک بخواهد در حضور سیاه‌چاله‌ها نیز برقرار باقی بماند، آنگاه باید به سیاه‌چاله‌ها نیز آنتروپی نسبت داد، به‌گونه‌ای که این آنتروپی متناسب با مساحت افق رویداد باشد:

$$S \propto A. \qquad (۴)$$

هاوکینگ در ادامه نشان داد که این تناسب دقیق‌تر است و ضریب آن برابر است با یک چهارم، در واحدهایی که $\hbar = c = G = k_B = 1$:

$$S = \frac{A}{4}. \qquad (۵)$$

همچنین نشان داد که سیاه‌چاله‌ها دارای دمایی هستند که به شتاب سطحی آن‌ها (سطح گرانش) مربوط می‌شود [۶] :

$$T = \frac{\kappa}{2\pi}. \qquad (۶)$$

این کشف ، قانون دوم ترمودینامیک را در قالب سیاه‌چاله‌ها نیز تعمیم داد و نشان داد که مفهوم آنتروپی بسیار فراتر از سیستم‌های ترمودینامیکی معمول است.

۴.۲ از ترمودینامیک تا معادلات میدان

در پیشرفت های ارتباط ترمودینامیک با گرانش ایده‌هایی شکل گرفته که نشان می‌دهند ممکن است معادلات اینشتین را بتوان از اصول ترمودینامیکی استخراج کرد. برای مثال، فرض این که آنتروپی سیاه‌چاله متناسب با مساحت افق آن است و رفتار افق‌های نوری مانند سیستم‌های ترمودینامیکی عمل می‌کند، به استخراج معادلات میدان گرانش منجر شده است. [۷–۹] برای مثال در مقاله تد جاکوبسون، نشان داده شده است که اگر فرض کنیم هر نقطه از فضا–زمان از دید یک ناظر شتاب‌دار دارای آنتروپی و دما است، آنگاه می‌توان معادلات میدان اینشتین را به عنوان رابطه سازگاری بین آنتروپی، دما و شار انرژی استخراج کرد. به طور خاص، از رابطه زیر بین تغییر آنتروپی و انرژی گذرنده از افق:

$$\delta Q = T\delta S, \qquad (۷)$$

با استفاده از هندسه افق‌ها و تغییرات شعاع افق می‌توان نشان داد که معادلات اینشتین از آن نتیجه می‌شود.

شباهت ساختار علی فضازمان با ترمودینامیک هم می تواند جالب باشد. در ترمودینامیک مرزهای سیستم دسترسی به درجات آزادی آن را محدود می کند. به صورت مشابه در نظریه نسبیت افق ها مرزهای علی هستند که ناظرهای مختلف را از دسترسی به درجات آزادی سیستم کل محدود می کنند.

هر چند عموما این نتایج این گونه تفسیر می شود که گرانش را نه یک نیرو، بلکه یک پدیده برآمده [1] ناشی از رفتار آماری درجات آزادی میکروسکوپی می‌دانند. اما ممکن است تفسیر دیگری را بپذیریم و آن اینکه ترمودینامیک در قلب همه نظریات فیزیکی وجود دارد فقط باید بدانیم که متغییر های حالت هر سیستمی مانند انرژی و آنتروپی چه هستند و چگونه تعریف می شوند.

[1] Emergent

۳ ترمودینامیک و نظریه کوانتومی

در مکانیک کوانتومی نیز مفهوم آنتروپی جایگاه مهمی دارد. یکی از تعاریف اصلی آنتروپی در سیستم‌های کوانتومی، آنتروپی فون نویمان است که برای حالت میکس تعریف می‌شود:

$$S = -\operatorname{Tr}(\rho \log \rho), \tag{۸}$$

که ρ ماتریس چگالی حالت سیستم است. حتی اگر کل سیستم در حالت خالص باشد، زیرسیستم‌ها معمولاً به صورت حالت‌های میکس ظاهر می‌شون و بنابراین می توان برای آنها آنتروپی تعریف کرد. این ویژگی نظریه کوانتومی به پدیده درهم‌تنیدگی مرتبط است.

این نکته جالب است که برخلاف ترمودینامیک کلاسیک که آنتروپی را فقط برای مجموعه‌ای از ذرات می‌توان تعریف کرد، در مکانیک کوانتومی می‌توان حتی برای زیرسیستم‌های کوچک نیز علی الااصول می توان آنتروپی تعریف کرد. این امر تفاوتی اساسی بین دو نظریه است و نشان‌دهنده آن است که آنتروپی در نظریه کوانتومی جنبه بنیادی و ساختاری‌تری دارد.

شباهت های جالبی بین اینگونه تعریف آنتروپی در نظریه کوانتومی با فیزیک گرانش و سیاه چاله ها کشف شده است. از جمله اینکه سهم عمده این آنتروپی در نظریات میدان متناسب با مساحت است [۱۰].

همچنین در اینجا مفهوم جداسازی سیستم ها است که باعث می شود مغهوم آنتروپی به وجود بیاید. در نظریه نسبیت دیدم که افق ها یک حد نهایی برای جدا سازی سیستم ها تعریف می کنند. در نظریه کوانتومی چگونه می توانیم سیستم ها را از یکدیگر جدا کنیم؟ جواب نهایی این است که نمی توانیم. اینکه در حد کلاسیکی سیستم ها را از یکدیگر جدا می کنیم نشان دهنده دینامیک مخصوصی برای (آنتروپی) درهمتندیگی است که ممکن است که ساختار برآمدی فضازمان مرتبط باشد.

پیشرفت های زیادی در رابطه با ارتباط ساختار فضازمان و درهمتندیگی به وجود آمده است. [۱۱]

۴ ترمودینامیک اصول موضوعی

در ترمودینامیک مفاهیمی چون انرژی و آنتروپی نقش توابع حالت را بازی می‌کنند. این ویژگی اجازه می‌دهد تا بدون دانستن کامل دینامیک سیستم، بتوان روابطی میان حالت‌های ممکن آن نوشت. این ویژگی شبیه به ساختار کلی نظریات فیزیکی است یعنی پیدا کردن روابطی بین متغییر هایی که نماینده حالت سیستم هستند. در نظریات فیزیکی یک نمایش ریاضی از سیستم در فضای حالت ها ارائه می شود و قوانین در حقیقت قیدهایی در این فضای حالت ها هستند. این قید های در ساختار ریاضی ترمودینامیک در روابطی نظیر قانون اول ترمودینامیک

$$dU = TdS - PdV$$

ظاهر می شوند در این بیان دما و فشار در حالت تعادل تعریف می شوند.

$$T = \frac{\partial U}{\partial S}, \quad , P = -\frac{\partial U}{\partial V}$$

این ویژگی ها باعث شده است که رویکردهای مدرن‌تر تلاش کنند ترمودینامیک بر پایه اصول موضوعی بنا کنند. بیان اصول موضوعی و ساختار ریاضی ترمودینایک طوری که در مراجعی مانند [۱۲، ۱۲–۱۴] ارائه شده است، این پتانسیل را برای این شاخه می تواند فراهم کند که ترمودینامیک به چارچوب کلی و سازگار برای همه پدیده ها در نظر گرفته شود. در این رویکرد ها ترمودینامیک را با استفاده از مفاهیم ریاضی مانند مجموعه حالت‌ها، ترتیب آدیاباتیکی، و توابع هموتروپیک بازنویسی کرده‌اند. در این رویکرد، به‌جای آن‌که قوانین ترمودینامیک را به صورت تجربی بیان کنیم، آن‌ها را از یک سری اصول پایه‌ای درباره ساختار حالت‌ها، تابع آنتروپی، و رفتار سیستم‌های ترکیبی نتیجه می‌گیریم. این رویکرد امکان تعمیم بهتر ترمودینامیک به سیستم‌های پیچیده‌تر، از جمله سیستم‌های گرانشی و کوانتومی را می تواند فراهم کند.

۵ نتیجه‌گیری

ترمودینامیک نه تنها یک نظریه کارآمد برای تحلیل سیستم‌های فیزیکی در تعادل است، بلکه چارچوبی است که در مرزهای پژوهش‌های مدرن فیزیک، از جمله سیاه‌چاله‌ها، اطلاعات، و حتی پیدایش مکانیک کوانتومی، نقش اساسی ایفا می‌کند. مطالعه عمیق‌تر مفاهیمی چون آنتروپی و انرژی، ممکن است کلید فهم ساختار بنیادی‌تر جهان باشد. شاید این مفاهیم بنیادی‌ترین مفاهیم در طبیعت و ترمودینامیک مهم ترین چارچوب برای آن باشد.

آیا می‌توان از اصول ترمودینامیک، قوانین فیزیک را نتیجه گرفت و قوانین جدید را پیدا کرد؟ در این دیدگاه جدید، نظریه‌های بنیادین آینده نه بر پایه معادلات حرکت، بلکه بر اساس قیود اطلاعاتی، انتروپیکی و تعادلی تعریف خواهند شد. نظریه گرانش کوانتومی، به جای تکیه بر ساختار لاگرانژی، ممکن است زبان خود را از ساختارهای انتروپیکی ترمودینامیکی بگیرد.

References

[1] H. Kragh, “Max Planck: the reluctant revolutionary,” *Physics World* **13** no. 12, (Dec, 2000) 31. https://dx.doi.org/10.1088/2058-7058/13/12/34. 2

[2] P. Marquet and M. Planck, “The history of the discovery of the physical quantum of action,”. https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10513021. 2

[3] Wikipedia contributors, “Planck’s law — Wikipedia, The Free Encyclopedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Planck's_law, 2025. 2

[4] J. M. Bardeen, B. Carter, and S. W. Hawking, "The Four Laws of Black Hole Mechanics," *Communications in Mathematical Physics* **31** no. 2, (1973) 161–170. 3

[5] J. D. Bekenstein, "Black holes and entropy," *Physical Review D* **7** no. 8, (1973) 2333–2346. 3

[6] S. W. Hawking, "Particle creation by black holes," *Communications in Mathematical Physics* **43** no. 3, (1975) 199–220. 4

[7] T. Jacobson, "Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State," *Physical Review Letters* **75** (1995) 1260–1263, gr-qc/9504004. 4

[8] E. P. Verlinde, "On the Origin of Gravity and the Laws of Newton," *Journal of High Energy Physics* **2011** no. 4, (2011) 29, 1001.0785 [hep-th]. 4

[9] T. Padmanabhan, "Thermodynamical Aspects of Gravity: New insights," *Reports on Progress in Physics* **73** no. 4, (2010) 046901, 0911.5004 [gr-qc]. 4

[10] M. Srednicki, "Entropy and area," *Physical Review Letters* **71** no. 5, (1993) 666–669. 5

[11] M. Van Raamsdonk, "Lectures on Gravity and Entanglement," in *New Frontiers in Fields and Strings*, p. 297–351. WORLD SCIENTIFIC, Nov., 2016. http://dx.doi.org/10.1142/9789813149441_0005. 5

[12] E. H. Lieb and J. Yngvason, "A Guide to Entropy and the Second Law of Thermodynamics," (1998) . 6

[13] A. Thess, *The Entropy Principle: Thermodynamics for the Unsatisfied*. Springer, 2011. 6

[14] H. B. Callen, *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. John Wiley & Sons, 2nd ed., 1985. 6