تعادل، دور از تعادل

علی نجفی
najafi@iasbs.ac.ir

۲۲ آبان ۱۴۰۵

مقدمه

در مورد مفاهیم تعادل و دور از تعادل و قانون حاکم بر فرآیندهای دور از تعادل بحث می‌شود.

تعادل

تعادل یک مفهوم بزرگ‌مقیاس، پدیده‌شناختی و ترمودینامیکی است که به حالت ترمودینامیکی سامانه‌ها نسبت داده می‌شود. در سامانهٔ تعادلی هیچ حرکت یا جریان بزرگ مقیاس از ماده یا انرژی وجود ندارد. سامانهٔ در تعادل هیچ حافظه‌ای نیز ندارد. در عمل ممکن است به سختی حالت تعادل واقعی در دسترس باشد. گاهی ممکن است به تقریب سامانه‌ای را در حالت تعادل بگیریم. مثلا یک لیوان آب که مدتی در یک اتاق آرام قرار گرفته، با آن اتاق به تعادل رسیده است. اگر خیلی دقیق نگاه کنیم، البته این لیوان نیز هنوز در حال مبادلهٔ ذره با اتاق است (بخار می‌شود) در نتیجه هنوز به تعادل نرسیده است. سامانه‌های بسته (ایزوله) معمولا بعد از گذشت زمانی زیاد (متناسب با آن سیستم) به حالت تعادل بسیار نزدیک می‌شوند. علاوه بر حالت‌های تعادل، گاهی در مورد فرآیندهای تعادلی نیز صحبت می‌شود. فرآیندی که بسیار آرام صورت می‌گیرد و در هر لحظه ازمجاورت یک حالت تعادل لحظه‌ای می‌گذرد یک فرآیند تعادلی به حساب می‌آید. بسیار آرام بودن یک فرآیند، مفهومی است که وابسته به آن سامانه است و معمولا جزییات ریز مقیاس آن سامانه تعیین کنندهٔ معیار آرامی و تندی هستند.

دور از تعادل

سامانهٔ دور از تعادل، لزوماً سامانه‌ای است که در آن یک فرآیند دینامیکی دور از تعادل رخ می‌دهد. قانون دوم ترمودینامیک قانون حاکم بر فرآیندهای ترمودینامیکی دور از تعادل است که بیان می‌کند در این فرآیندها آنتروپی افزایش می‌یابد. آنتروپی لحظه‌ای مجموعهٔ سامانه و محیط را با $s(t)$ و نرخ تغییرات آن را با $\dot{s}$ نشان دهیم، مطابق قانون دوم داریم:

$$\dot{s} \geq 0. \qquad (1)$$

مطابق این رابطه، در فرآیندهای غیر تعادلی آنتروپی همواره تولید می‌شود. مساوی در رابطهٔ بالا مختص فرآیندهای تعادلی است که در آنها آنتروپی ثابت می‌ماند. در فرآیندهای دور از تعادل نرخ تولید آنتروپی مثبت است.

ارتباط موضوع با ناوردایی تحت تبدیل وارونی زمان جالب است. وارونی زمان، تبدیلی است که جهت گذر زمان را وارون می‌کند. ایدهٔ خوبی است که تصور کنیم یک فیلم از یک حرکت دلخواه مثلا افتادن سیب، بسته شدن در اتاق و ... در دست داریم. اِعمال وارونی زمان به پدیده‌ای که از آن فیلم گرفته‌ایم مشابه این است که این فیلم را از انتها به ابتدا پخش کنیم. تحت وارونی زمان، مکان و شتاب لحظه‌ای تغییری نمی‌کنند ولی سرعت به منفی خودش تبدیل می‌شود. اگر بار الکتریکی بود، میدان الکتریکی که به مکان بستگی دارد تغییری نمی‌کند ولی میدان مغناطیسی که به سرعت ذره‌ها بستگی‌دارد به منفی خودش تبدیل می‌شود.

حالت تعادل تقارن وارونی زمان دارد ولی حالت و فرآیندهای دور از تعادل، تقارن وارونی زمان ندارند. در واقع قاون دوم ترمودینامیک این تقارن را می‌شکند. توجه کنید مقدار لحظه‌ای آنتروپی تحت وارونی زمان تغییری نمی‌کند، در این صورت قانون دوم تحت وارونی زمان بصورت زیر تغییر می‌کند:

$$\dot{s} \geq ۰ \quad \xrightarrow{\text{time reversal}} \quad \dot{s} \leq ۰, \tag{۲}$$

که به وضوح با شکل اصلی و درست و تجربی قانون دوم در تناقض است. برای درک اینکه چرا آنتروپی لحظه‌ای تحت وارونی زمان زوج است، در نظر بگیرید که آنتروپی از لحاظ آماری به لگاریتم تعداد حالت‌ها وابسته است. یک موضوع مهم این است که معادلات ذره‌ای (نیوتن یا شرودینگر) و نیروهای بنیادی مهمی که اطرافمان می‌شناسیم، تحت وارونی زمان متقارن رفتار می‌کنند. در واقع در نگاه میکروسکوپیک و ذره‌ای، قوانین طبیعت تقارون وارونی زمان دارند. پس چه اتفاقی می‌افتد که در مقیاس بزرگ و ترمودینامیکی، قوانین طبیعت (قانون دوم ترمودینامیک) این تقارن را ندارند؟ یا بصورتی دیگر، مگر نمی‌توان قوانین بزرگ مقیاس و ترمودینامیک را از قوانین میکروسکوپیک و ذره‌ای به دست آورد، پس این تقارن چه می‌شود؟ فقط اشاره شود که این موضوع به چالش‌هایی که بولتزمان در استخراج معادلهٔ مشهور خود، امروزه موسوم به معادلهٔ بولتزمان، داشت باز می‌گردد. خوانندهٔ علاقه‌مند به پیگیری دقیق این موضوع، به مباحث مربوطه در کتاب‌های مربوط به نظریهٔ جنبشی مراجعه کند.

مثال‌ها

همواره می‌توانیم رد نیروها یا اثرهایی که باعث دور شدن سامانه از وضعیت تعادل شده‌اند را پی‌بگیریم. مثال‌های زیر از حالت‌های دور از تعادل را در نظر بگیرید:

- قطرهٔ روغن میلیکان که در هوا با سرعت حدی ثابت سقوط می‌کند. یک دانه نخود که در بطری حاوی روغن سقوط می‌کند. در هر دو مورد نیروی وزن باعث حرکت و دور از تعادل شدن می‌شود. یک سیم رسانا که مقاومت الکتریکی دارد و اختلاف پتانسیل الکتریکی به دو سوی آن اعمال شده است، نیروی الکتریکی باعث حرکت بارها و تولید جریان می‌شود. آب درون یک لوله که به خاطر اختلاف فشاری که توسط یک پمپ ایجاد شده به آرامی و بصورت لایه‌ای جریان پیدا می‌کند. یک قطعه آجر که روی یک رادیاتور داغ قرار گرفته است، اختلاف دمای بین بالا و پایین آجر با جاری شدن جریان انرژی و گرما در آجر همراه خواهد شد. ظرف آب که روی منبع گرما قرار گرفته به سبب اختلاف دمای بین کف ظرف و بالاترین لایه‌های آب، جریانی از گرما از پایین به بالا برقرار می‌شود. در این مورد ممکن است جریان‌های همرفتی آب نیز درون ظرف مشاهده شود. بیشتر واکنش‌های شیمیایی اصطلاحا نوع اول، فرآیندهای ترمودینامیکی دور از تعادل هستند. در این مورد بسته به آفینیتی مولکول‌های واکنش دهنده ، نرخ تولید محصولات کم یا زیاد خواهد بود. نرخ تولید محصولات به صورتی سرعت واکنش و در واقع میزان دور از تعادل بودن را مشخص می‌کند.
- لایهٔ نازک آب که روی یک دشت کویری صاف قرار دارد و بخاطر تابش آفتاب گرم شده و بخار می‌شود. در این سیستم دور از تعادل، هم جریان گرما و جریان همرفتی آب هر دو برقرار می‌شوند. پس از خشک شدن آب طرح‌های زیبای سلولی روی کف زمین باقی می‌ماند. این ساختارهای سلولی متقارن‌اند و اندازه‌های مشخصی دارند و با نام سلول‌های همرفتی ریلی بنارد شناخته می‌شوند. مثال دیگر: فضای بین دو صفحهٔ شیشه‌ای موازی که در فاصلهٔ نیم میلیمتری از هم قرار دارند توسط گلیسیرین پر شده، اکنون سعی می‌کنیم از درون یک حفرهٔ میلیمتری روی یکی از شیشه‌ها، کمی محلول رنگی به فضای بین شیشه‌ها تزریق کنیم. ویسکوزیتهٔ جوهر از گلیسیرین کمتر است. نیروی خارجی که عامل تزریق جوهر است با ایجاد جریان شارشی بین شیشه‌ها، سامانه را غیر تعادلی می‌کند. جالب است که توجه کنیم تودهٔ جوهر تزریق شده، بصورت متقارن و دایروی گلیسیرین را پس نمی‌زند و طرح‌های فراکتالی جالبی تشکیل می‌شود و به ناپایداری سافمن ـ تیلور موسوم است. مثال دیگر: در برخی واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌تر، سرعت واکنش بصورت غیر خطی به غلظت واکنش‌دهنده‌ها وابسته است و همچنین قسمت‌های مختلف واکنش به هم کوپل می‌شوند. مثلا واکنش مشهور Belousov-Zhabotinsky که شامل اکسایش اسید مالونیک (یا اسید سیتریک) توسط برومات در محیط اسیدی و در حضور یک کاتالیزور فلزی (مانند سریم یا فروئین) است. سینتیک غیرخطی این واکنش با رفتار نوسانی در

زمان و تشکیل طرح‌های فضایی جالب همراه می‌شود. در یک ظرف هم‌زده، رنگ محلول به طور متناوب بین رنگ‌ها (مثلاً زرد و بی‌رنگ در حضور سریم، یا قرمز و آبی در حضور فروئین) تغییر می‌کند. اگر واکنش در یک لایه نازک (مثلاً در پتری‌دیش) و بدون هم‌زدن انجام شود، به جای تغییر رنگ یکنواخت، موج‌های مارپیچی و حلقه‌های هم‌مرکز بسیار زیبایی در آن شکل می‌گیرند.

- یک تخم مرغ که پوستهٔ آن می‌شکند، یک تکه چوب که بریده می‌شود و یک قطعه آهن که چندین بار خم‌وصاف می‌شود.
- یک باکتری که با تکان دادن تاژک‌هایش حرکت می‌کند، یک سلول که تقسیم می‌شود، یک آنزیم که درون سلول منتقل می‌شود و تمام دیگر اتفاقاتی که در موجودات زنده رخ می‌دهند.
- جریان متلاطم درون یک شاره.

در تقسیم بندی بالا سعی شده ترتیب به صورتی باشد که به ترتیب میزان دوری از تعادل را نشان دهند. در واقع قطرهٔ روغن میلیکان و دیگر پدیده‌های مشابه، پدیده‌های خطی هستند و کمترین فاصله را از حالت تعادل دارند. از طرف دیگر ادعا می‌شود که شارش متلاطم بیشترین حد فاصله از تعادل را داراست. در پدیده‌های خطی که کمترین فاصله را از حالت تعادل دارند، معمولا درک خوبی از میزان تولید آنتروپی داریم. در این پدیده‌ها نرخ تولید آنتروپی از حاصلضرب جریان تولید شده (از انرژی یا ماده) در نیرویی که عامل غیرتعادلی شدن است به دست می‌آید:

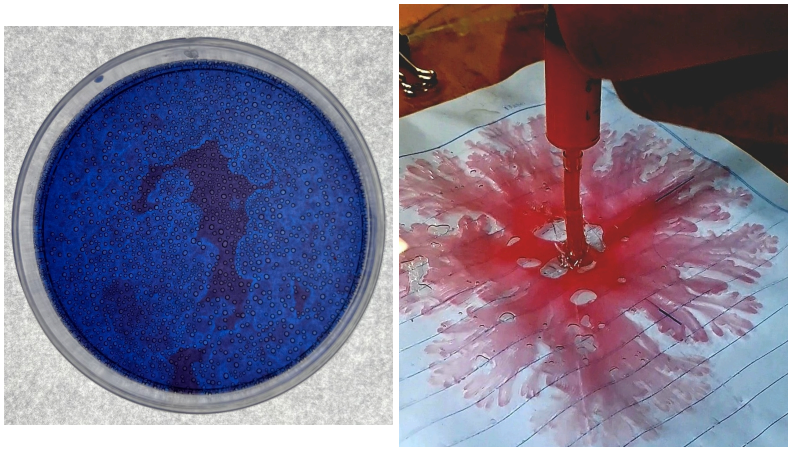
$$T\dot{s} = \text{force} \times \text{current}, \quad \text{current} \sim \mu \times \text{force}, \quad \rightarrow \quad \dot{s} = \mu \times \text{force}^{۲} \geq ۰. \tag{۳}$$

توجه کنید که در سامانه‌های خطی بصورت پدیده‌شناختی می‌دانیم که جریان تولید شده با نیروی اعمالی متناسب است و ضریب پدیده‌شناختی مربوطه را با ثابت μ نشان داده‌ایم. مثلا در مسالهٔ قطرهٔ روغن، جریان تولید شده در واقع همان سرعت ذره v است، نیرو هم برابر با نیروی گرانش mg است. مطابق رابطهٔ استوکس ضریب اصطکاک بصورت $\mu^{-۱} = \zeta = ۶\pi\eta R$ به ویسکوزیتهٔ شاره η و شعاع قطره R وابسته است:

$$T\dot{s} = \mu(mg)^{۲}, \quad \mu = ۱/(۶\pi\eta R). \tag{۴}$$

در مقابل پدیده‌های خطی، پدیده‌های غیرخطی مانند تشکیل سلول‌های همرفتی بنارد و ناپایداری سافمن ـ تیلور قرار دارند. در فرآیندهای خیلی دور از تعادل، آنقدر دور که اثرهای غیر خطی بتوانند خود را نشان دهند، گاهی تقارن به صورت خودبخودی و به نفع تولید نظم شکسته می‌شود. شکست خودبخودی تقارن در مثال‌های مورد اشاره به این معنی است که در آنها یک طول مشخصه انتخاب می‌شود. در آزمایش تیلور ـ سافمن، حالتی که در آن جوهر بصورت دایره‌ای گلیسیرین را پس بزند، حالتی متقارن خواهد بود. ولی در عمل این تقارن با انتخاب یک طول موج خاص و رشد آن طول موج و ایجاد طرح‌های زیبای فراکتالی شکسته می‌شود. به این دلیل می‌گوییم تقارن بصورت خودبخودی شکسته شده است. در آزمایش سلول همرفتی بنارد هم وضع به همین صورت است. موضوع شکست خودبخودی تقارن، در گذارفازهای تعادلی هم، مثلا یخ زدن آب، ابررسانا شدن فلز، چگالش ماده در جهان اولیه، چگالش کروموزوم‌های سلولی و بینهایت مثال دیگر، دیده می‌شود و از مهیج‌ترین اتفاقات طبیعت است. موضوع مورد نظر ما در این بحث به صورتی تعمیم ایدهٔ شکست تقارن در سامانه‌های اتلافی ـ دینامیکی است. طرح و بررسی سامانه‌های زندهٔ دور از تعادل موضوعی بروز محسوب می‌شود. سازوکارها و میزان تولید آنتروپی در این سامانه‌ها از موضوعات چالشی است.

در انتها اشاره می‌کنیم به پدیدهٔ تلاطم که ادعا می‌شود دورترین فاصله را از تعادل دارد و بصورتی غیر تعادلی ترین سامانه است. یک سامانهٔ شاره‌ای با مرزهای متحرک را در نظر بگیرید. مثلا قاشق همزن درون لیوان، ماشین متحرک در هوا، هواپیمای متحرک و دیگر مثال‌های مشابه. حرکت مرزها باعث شارش شاره و به دور از تعادل شدن سامانه می‌شود. ویسکوزیته و چگالی شاره را به ترتیب با η و ρ و طول خطی و سرعت مشخصهٔ مرزها را به ترتیب با L و V نشان می‌دهیم. عدد بدون بعد رینولدز بصورت $\mathrm{Re} = \rho LV/\eta$ است و برای شارش‌هایی که این عدد بسیار بزرگ و مثلا از مرتبهٔ ۱۰۰۰۰ می‌شود، شارش متلاطم می‌شود. هوای پشت اتومبیل و هواپیما از این نوع است، لیوان چای هم با همزن سریع متلاطم می‌شود. شارش متلاطم نقطهٔ مقابل شارش لایه‌ای است. در یک شارش لایه‌ای مثلا شارش آرام درون لوله، اگر یک مقدار بسیار کمی جوهر به نقطه‌ای درون آن تزریق شود، رد آن بصورت یک خط باریک مشخص می‌شود ولی اگر شارش متلاطم باشد، مثلا شارش درون همان



شکل ۱: راست: ناپایداری تیلور–سافمن، فضای بین دوشیشه از قبل توسط گلیسیرین پرشده و از طریق یک حفرهٔ کوچک مقداری جوهر به آن تزریق می‌شود. حالت رشد دایره‌ای و متقارن ناپایدار شده و با شکسته شدن تقارن، رشد فراکتالی حادث می‌شود. چپ: طرح‌های فضایی در آزمایش بلوزوف–ژابوتینسکی نشان داده شده است. سمت راست توسط رضا محمدی و سمت چپ توسط رژین صحافی، سعید ملایی در آزمایشگاه سیالات دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان ۱۴۰۵، تولید شده است.

لوله وقتی که سرعت شارش بسیار بزرگ باشد، کمترین تزریق جوهر با پخش شدگی کامل آن همراه خواهد بود. در شارش لایه‌ای و در گذر زمان، فاصلهٔ بین ذرات شاره قابل پیش‌بینی است ولی در حالت متلاطم، رفتار زمانی فاصلهٔ بین ذرات خارجی که به شارش متلاطم تزریق می‌شوند قابل پیش‌بینی نیست و در واقع همهٔ قسمت‌ها و در همهٔ مقیاس‌های طولی پخش شدگی داریم.

از نظر تجربی دو پدیده‌ی مهم، یکی قانون $\frac{2}{3}$ و دیگری متناهی شدن نرخ اتلاف انرژی بر واحد جرم در حد $\eta \to \infty$، مشخصات اصلی تلاطم هستند. درون یک شارش کاملا متلاطم، متوسط توان دوم اختلاف سرعت دو نقطه به فاصله‌ی R از یکدیگر بصورت $\langle(\delta\mathbf{u}(R)\cdot\hat{R})^2\rangle \sim R^{\frac{2}{3}}$ رفتار می‌کند. این موضوع با اندازه‌گیری مستقیم مولفه‌های سرعت در نقاط مختلف و مطالعه‌ی همبستگی بین آنها قابل بررسی است و به قانون $\frac{2}{3}$ موسوم است. برای درک دومین پدیده‌ی مهم مرتبط با تلاطم می‌توانیم از رابطه‌ی ساده‌ای که بین ضریب درگ و نرخ اتلاف انرژی بر واحد جرم وجود دارد استفاده کنیم. نرخ اتلاف انرژی بر واحد جرم در یک شارش دلخواه که در حضور مجموعه‌ای از موانع جریان دارد به ضریب درگ آن مجموعه بصورت $\epsilon = \frac{1}{2}C_{\mathrm{D}}\frac{V^3}{L}$ بستگی دارد که در آن L اندازه‌ی خطی موانع و V سرعت مشخصه‌ی شارش است. بصورت تجربی معلوم شده است که در حد $\mathrm{Re} \to \infty$، ضریب درگ به یک عدد متناهی، کمی کمتر از یک، همگرا می‌شود. در این صورت در یک شارش متلاطم که پشت این موانع تشکیل شده است، با ثابت نگاه داشتن پارامترهای هندسی و سرعت‌های ورودی و با کاهش ویسکوزیته در حد $\eta \to 0$، نرخ اتلاف انرژی بر واحد جرم عددی ثابت و مستقل از η می‌شود. هر نظریه‌ی موفق که شارش متلاطم را توصیف می‌کند باید این دو واقعیت تجربی را بخوبی پاسخگو باشد. نظریه‌های موجود در بحث تلاطم و رفتار آماری که برای معادلهٔ ناویه استوکس به دست می‌آید، هنوز برای همهٔ فیزیکدان قانع کننده نبوده است.

در ادامهٔ این نوشته، مقالهٔ مشهور و قدیمی و الهام بخش اندرسون در مورد شکست تقارن در سامانه‌های تعادلی و غیر تعادلی ضمیمه شده است.

مجله فیزیک، ۱۳۷۲، ۳ و ۴، ۶۷ـ۷۳

تقارن شکسته، خواص برایندە، ساختارهای اتلافی، حیات: آیا به هم ربطی دارند؟*

ف. اندرسون* و د. استین*

واقعیت خواص برایندە را می‌پذیریم، زیرا جزئیات این فرایند را می‌دانیم: خواص برایندە قابلیت سیستمهای پیچیدۀ فیزیکی است در بروز دادن خواصی که ربطی به خواص اجزاء این سیستمها ندارد. اما قبول نداریم که می‌توان وجود "ساختارهای اتلافی "پایداری را در سیستمهای بی‌جان ثابت کرد که دوامشان را نیروهای محرکۀ دینامیکی تأمین می‌کنند.

هرچه فیزیکدانهای نظری بیشتر به‌اسرار نهایی سرشت میکروسکوپیکی عالم پی‌می‌برند، طرح عالم در نظرشان بیشتر به‌صورت نقشی بی‌اندازه ساده و متقارن جلوه می‌کند. چون قسمتهای جالب‌توجه عالم ــ دست‌کم قسمتهایی که جلب‌توجه ما را می‌کند، مانند بدن خودمان ــ به‌وضوح‌تمام پیچیده و غیرمتقارن‌اند، نخستین نتیجۀ درستی که گرفته می‌شود این است که ربط کاوش عمیق سرشت ماده (که فیزیکدانان کوششی عظیم و پولی عظیمتر را صرف آن می‌کنند) با ما پیوسته کمتر و کمتر می‌شود.اما در واقع امر، این‌مطلب برای هیچ دانشمندی عدول از هدف به حساب نمی‌آید؛ دانشمند امیدوار است به هدف غایی علم، که ما آن را فهم واقعی دنیای حول‌وحوش او براساس اصول اولیه می‌دانیم، دسترسی پیدا کند. کار اساسی از نظر او، توضیح عالم برحسب اجزاء بنیادی ساده‌تری است که عالم از آنها ساخته شده است. براستی که بخت با او یار بوده است، زیرا عالَم، با کشف هر مرحلۀ زیرینی، ساده‌تر می‌نماید ــ اگر اوضاع برخلاف این منوال بود، دانشمند وظیفه‌ای بس شاقتر می‌داشت.

البته، منظور ما از سادگی، توفیق اخیر نظریه‌پردازان ذرات بنیادی است، که معادلات اجزاء بنیادی ماده را به معادلاتی کاملاً متقارن تحویل کرده‌اند و همۀ اجزاء تشکیل‌دهنده به‌نحوی کاملاً همانند و هم‌ارز وارد این معادلات می‌شوند و همۀ برهم‌کنشها هم از اصلی استنتاج می‌شوند که خود تجلی نوع خاصی از تقارن کامل است. اما کسانی که با این تحولات آشنا نیستند، نباید بیمی به دل راه بدهند، زیرا مطالبی که ما می‌گوییم به هیچ‌وجه تابع این تحولات نیست؛ فقط می‌خواهیم به این نکته اشاره کنیم که میان شکست این تقارن غایی، که به طیف پیچیدۀ برهم‌کنشها و ذراتی که می‌شناسیم می‌انجامد، و پیچیدگیهای ملموستری، که به‌زودی شرحشان خواهیم داد، تشابهی دقیق و روشن وجود دارد.

در بیست‌وچند سال‌گذشته بتدریج مفاهیمی پیدا شده‌اند که به طرق‌پیدایش پیچیدگی از سادگی در طبیعت مربوط می‌شوند. بعضی ازاین مفاهیم، اساسی دقیق و محکم در فیزیک نظریِ سیستمهای بزرگ و پیچیده دارند، در حالی که گسترۀ بعضی دیگر از آنها به مرزهای نظرپردازانۀ فیزیک و فلسفه کشانده می‌شود.

اساسی‌ترین مسئله‌ای که این ساختار مفهومی، خیالِ پرداختن به آن را می‌پرورد، این است که حیات را به‌طوری بامعنی در چارچوب فیزیک قرار بدهد: یعنی پیدایش حیات از مادۀ بیجان را به اصل عامی در فیزیک مربوط‌کند. آیا می‌توان وجود و یا حتی پیدایش حیات را در قالبی صرفاً فیزیکی درک کرد؟

با طی چهار مرحله به این مسئله نزدیک می‌شویم. روشن است که سعی ما بر این است که حیات را به مثابه چیزی بشماریم که فیلسوفان آن را خاصیت برآینده می‌نامند، یعنی خاصیتی از یک سیستم پیچیده که در اجزاء آن سیستم موجود نیست. پس از این سؤال بسیار ساده شروع می‌کنیم که آیا چنین خواصی اصلاً وجود دارند؟

در مورد پیدایش پیچیدگی از سادگی، توصیفی که متوجهِ فیزیک و در اساس از دقت بیشتری برخوردار است، توصیفی است که نظریۀ تقارن شکسته نامیده می‌شود.

آیا ممکن است از یک سیستم پیچیده‌تر، خواصی بروزکند که در زیرلایۀ

---

* مطالب این مقاله بدواً به‌صورت خطابۀ یادبود چرول‌ـسایمون در سال ۱۹۸۰ در دانشگاه آکسفورد ارائه شده است. مؤلفان عضو دانشگاه پرینستون‌اند. اندرسون در سال ۱۹۷۷ جایزۀ نوبل فیزیک گرفته است.

ساده‌تری که این سیستم پیچیده از آن ساخته شده، موجود نیست؟

نظریه تقارن شکسته ، جواب این سؤال را با یک " آری" بی‌چون‌وچرا می‌دهد: در سیستمهای تعادلی که شامل تعداد زیادی اتم باشند، امکان دارد که خواص جدید ــ نظیر صُلبیت، ابررسانایی، و ساختارها یا هیئتهای پایدار جدید، مانند خطوط گردابی کوانتیده ــ پدیدار شوند که در سطح اتمی نه تنها وجود ندارند، بلکه حتی بی‌معنی‌اند.

متأسفانه خواص برآینده که بیش از همه موردتوجه جدی ماست، از این قبیل خواص سادهٔ سیستمهای تعادلی نیستند: بخصوص در موردِ حیات، باید بدانیم که آیا ممکن است حیات و به تبع آن شعور، از مادهٔ بی‌جان ناشی شود، و چیز بی‌چون‌وچرایی که دربارهٔ حیات می‌دانیم این است که حیات برای تأمین و دوام ساختار خود، پیوسته انرژی اتلاف می‌کند و آنتروپی ایجاد می‌کند. پس به دومین سؤال عمیق می‌رسیم:

آیا در سیستمهای اتلافی دور از تعادل، خواص برآینده وجود دارد؟

پاسخ، آری است: ناپایداریهای دینامیکی نظیر تلاطم و همرفت در طبیعت فراوان یافت می‌شوند و منشأ آنها نیز، از لحاظ ریاضی، کاملاً معلوم است. وقتی چنین پدیده‌هایی روی می‌دهند، آثار بارز شکست تقارن در آنها دیده می‌شود که خیلی شبیه ساختارهای تعادلی موجود در سیستمهای مادهٔ چگال است. این اثرها، "ساختارهای اتلافی" نام گرفته‌اند. مثالهای آنها، حجره‌های همرفتی یا گردابه‌ها در شاره‌های متلاطم است. اما این ساختارها همیشه خیلی ناپایدار و گذرا به‌نظر می‌رسند: آیا این پدیده‌ها می‌توانند حیات را که بسیار پایدار و باثبات است (دست‌کم در مقیاس اتمی زمان) توضیح بدهند؟

آیا نظریه‌ای برای ساختارهای اتلافی وجود دارد که قابل قیاس با نظریهٔ ساختارهای تعادلی باشد، و وجود خواص و سیستمهای پایدار جدید را در این قبیل سیستمها توضیح بدهد؟

برخلاف اظهار نظرهایی که در چندین کتاب و مقاله در این زمینه آمده است، ما بر این عقیده‌ایم که چنین نظریه‌ای وجود ندارد و حتی ممکن است که ساختارهایی از این نوع، که پریگوژین، هاکن و همکارانشان [۱و۲] تلویحاً وجودشان را قبول دارند، اصلاً وجود نداشته باشند. چیزی که در این حوزه وجود دارد با نظرپردازیهای پریگوژین فرق دارد و فعلاً موضوع تحقیقات نظری و آزمایشی وسیع است.

بنابراین جوابِ چهارمین سؤال عمیق که:

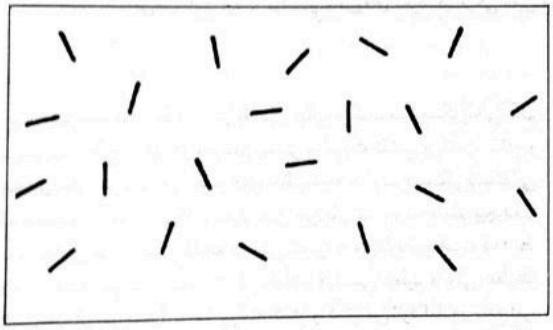
آیا راه یک نظریهٔ فیزیکی پیدایش حیات، که از این خطوط کلی تبعیت کند، بر ما مفهوم است؟

کاملاً روشن است: نه؛ زیرا هیچ نظریهٔ ساختارهای اتلافی وجود ندارد. ارتباط بهترین نظرپردازیهای موجود دربارهٔ حیات، یعنی نظریهٔ آیگن [۳]، با مفهوم ساختارهای اتلافی، اندک است؛ این نظریه‌ها صرفاً به ساختار مادهٔ زنده می‌پردازند؛ با وجود این ممکن است که متضمن مسائلی عمیق از نوع مسائلی باشند که مایهٔ اضمحلال افکار متداول دربارهٔ ساختارهای اتلافی را فراهم آورند. قصد ما این است که این مسئله را به تفصیل مطالعه کنیم.

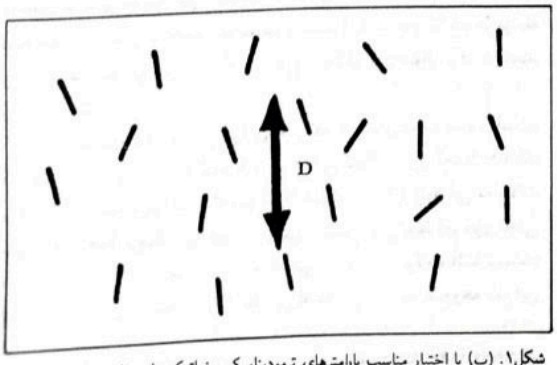
آنچه در بالا آمد خطوط اصلی مطالبی است که باید گفته شود؛ حال می‌خواهیم این طرح را در چارچوبی مشخصتر قرار بدهیم و به تفصیل بیشتر به آن بپردازیم.

نخست باید مطالبی دربارهٔ فیزیک واقعی یاد بگیریم: " تقارن شکسته" ــ یا درست‌تر بگوییم " تقارن خودبه‌خود شکسته " ــ چیست و چرا تقارن می‌شکند؟ جواب این سؤالها به‌قدری آسان است که تقریباً متوجه عمق و کلیت آنها نمی‌شویم. اول، تقارن شکسته چیست؟ فضا تقارنهای زیادی دارد ــ دست‌کم همسانگرد است، همگن است و علامت زمان برایش فرقی نمی‌کند. به تبع این امر، معادلاتی که ناظر بر رفتار ذرات و سیستمهای ذراتی هستند که در فضا حرکت می‌کنند، همهٔ این تقارنها را دارند. اما طبیعت متقارن نیست: " طبیعت از تقارن اکراه دارد ". بیشتر فازهای ماده نامتقارن‌اند؛ مثلاً همهٔ سنگها از بلور ساخته شده‌اند و این بلورها نه همگن‌اند و نه همسانگرد. مایعات ملکولی اغلب اوقات همسانگرد نیستند، بلکه بلور مایع‌اند (به شکل۱ نگاه کنید)؛ آهنرباها، نظیر آهن یا زنگار (که پادفرومغناطیس است) نسبت به وارونی زمان ناوردا نیستند. ابرشاره‌ها، یکی از تقارنهای پنهان طبیعت ــ تقارن پیمانه‌ای ــ را نقض می‌کنند. این تقارن اجازه می‌دهد که فاز توابع موج کوانتومی دلبخواه باشد، که این خود با قوانین بقای بار و تعداد ذرات مرتبط است.

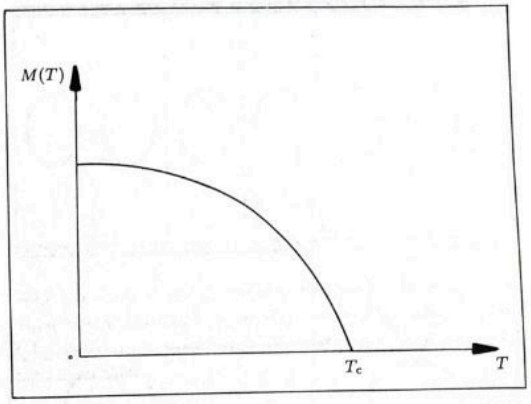
دوم، چرا تقارن می‌شکند؟ افت‌وخیزها، اعم ازکلاسیک یا کوانتومی، تقارن را ترجیح می‌دهند: گاز و مایع همگن‌اند و آهنربا در دمای زیاد مغناطیس خود را از دست می‌دهد. از طرف دیگر انرژی پتانسیل همواره آرایشهای



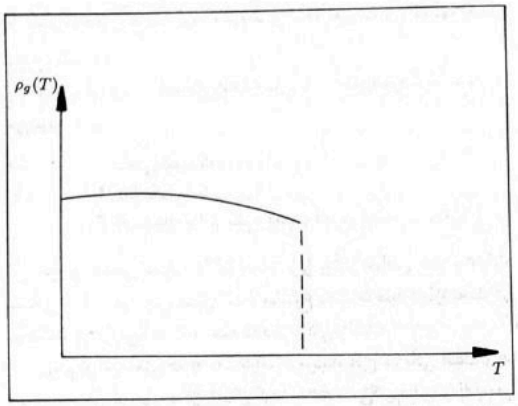
شکل۱. (الف) بلور مایع نماتیک در حالت بی‌نظم. پاره‌خطها نمایندهٔ مولکولهای میله‌مانند نماتیک است. اگر از سمتگیریهای مولکولی در ابعاد ماکروسکوپیکی متوسط بگیریم، حاصل صفر می‌شود.



شکل۱. (ب) با اختیار مناسب پارامترهای ترمودینامیکی، نماتیک وارد فاز منظم می‌شود و پارامتر نظم ماکروسکوپیکی (راستار D) پدید می‌آید. در این حالت، دیگر سیستم همسانگرد نیست بلکه امتداد خاص مرجعی دارد: تقارن دورانی شکسته شده است.



شکل۲. تغییرات مغناطش M برحسب دمای T در یک فرومغناطیس ساده. این یک گذار فاز نوعی مرتبه دوم است که در آن وقتی دما از دمای بحرانی T_c پایین می‌آید، پارامتر نظم به‌طور پیوسته از مقدار صفر شروع به زیادشدن می‌کند.



شکل۳. در گذار فاز مرتبهٔ اول، نظیر گذار مایع به جامد که در اینجا نشان داده شده است، پارامتر نظم در نقطه گذار دستخوش جهشی ناپیوسته می‌شود و بهمراه آن گرمای نهان آزاد (یا جذب) می‌شود.

خاصی را ترجیح می‌دهد: اتمها مایل‌اند که به فواصل مشخصی از هم قرار بگیرند، اسپینها دوست دارند که موازی هم باشند یا پادموازی، و جز اینها. به این طریق است‌که تقارنِ خودبه‌خود شکسته تعریف می‌شود.

تعریف: گرچه معادلاتی که حالت یک سیستم طبیعی را توصیف می‌کنند متقارن‌اند، خودِ حالت چنین نیست، زیرا حالت نامتقارن می‌تواند نسبت به ایجاد روابط خاصی میان اتمها، مولکولها یا الکترونهای تشکیل دهنده، ناپایدار شود.

تا اینجا فکر تقارن شکسته، مفهومی توصیفی است: وقتی بامعنی می‌شود که ببینیم پدیده‌های بظاهر متفاوت و نامرتبطی را به هم مربوط می‌کند و توضیح می‌دهد. این مفهوم را نخستین بار لانداؤ [۴] برای حل مسائلی که به ماهیت و معنی گذارهای فاز ترمودینامیکی مربوط می‌شد، وارد کرد، اما این مفهوم بسیاری خواص دیگر فازها (حالتها) ی تقارن شکسته را به هم مربوط می‌کند و توضیح می‌دهد. لانداؤ در جریان این کار مهمترین مفهوم کل نظریه را نیز مطرح کرد: مفهوم پارامترِ نظم.

پارامتر نظم، اندازه کمّی نقض و نبود تقارن است. پارامتری که از همه مرسوم‌تر است M (مغناطش) در یک فرومغناطیس است که گشتاور مغناطیسی متوسط $< \mu_i >$ یک اتم معین است. پارامترهای دیگر عبارت‌اند از

۱. راستار[1] $\mathbf{D}$ در یک بلور مایع نماتیک[2]
۲. دامنهٔ ρ_G موج چگالی در یک بلور
۳.میانگین میدان جفت‌در ابررسانا $< \psi(r) >$

لانداؤ : نقض تقارن مستلزم یک پارامتر ترمودینامیکی جدید است که مقدار آن در فاز (حالت) متقارن صفر است ــ مثل مغناطش یک فرومغناطیس (شکل ۲)، راستار در یک بلور مایع نماتیک، و جزآنها. اندازهٔ پارامتر نظم، η، میزان تقارن شکسته را می‌سنجد.

این مفهوم تبعات زیادی دارد. مثلاً بروز یک متغیر ترمودینامیکی کاملاً جدید، شرط لازم یک گذار فاز پیوسته (یا به اصطلاح مرتبهٔ دوّم) است. این متغیر، چه بسا که به‌طور ناپیوسته ظاهر شود، اما ضرورتاً این‌طور نیست ــ مثلاً نگاه کنید به $M(T)$ در شکل ۲ و برای مورد ناپیوسته نگاه کنید به $\rho_G(T)$ یک بلور نوعی در شکل ۳. علاوه بر این، چون پارامتری اضافی وارد شده است، انرژی آزاد و خواص ترمودینامیکی، صورتهای تابعی واحدی در دو فاز (با تقارن متفاوت) ندارند، در نتیجه فازهای مختلف را، برخلاف مورد آب و بخار، گذار فاز مشخصی از هم جدا و متمایز می‌کند.

پیامدهای ترمودینامیکی ناشی از دامنهٔ η، خود دلایل موجه مفهوم تقارن شکسته به‌شمار می‌روند. اما نتایج مهمتری از ویژگی دیگر پارامتر نظم منتج می‌شود، که لانداؤ به صورتبندی آن نپرداخت ولی در موادی به‌کار برد: پارامتر نظم کمیتی است که (علاوه بر دامنه) واجد فاز هم هست: انرژی آزاد $F(T,|\eta|)$ تابعی از قدرمطلق آن $|\eta|$ است ولی به دلیل وجود تقارن اولیه نباید به "فاز"، یا راستای آن بستگی داشته باشد. مثلاً انرژی نباید به راستای یک راستار بستگی داشته باشد (زیرا فضا همسانگرد است)، نباید به سمت یا وضعیت بلور، فاز ϕ تابع موج ابرشاره، بستگی داشته باشد. صورت دیگر بیان این مطلب این است که پارامتر نظم دارای فضایی است که در آن می‌تواند آزادانه حرکت کند، بی‌آنکه انرژی عوض شود. (در وازگان کوانتومی ــ حالت پایه بی‌اندازه واگن (چندگانه) است و این واگنی بازدارندهٔ تقارن اولیه هامیلتونی است (که تغییر نمی‌کند). و این امر با برخی از تبعات دینامیکی تقارن شکسته، نظیر مُدهای گلداستون و پدیدهٔ هیگز (که بزودی شرح داده خواهد شد) مرتبط است.

اگر پارامتر نظم را یک پارامتر ترمودینامیکی فیزیکی بشمار آوریم، دومین ویژگی η آشکار خواهد شد: پارامتر نظم ممکن است در فواصل ماکروسکوپیکی نمونه، تغییر کند، در این صورت آن را می‌توان به‌طور موضعی، $\eta(r)$، تعریف کرد (همانطور که در نمونه‌ای که چندان دور از تعادل نیست، می‌توان یک دما

1. director 2. nematic

یا فشار موضعی تعریف کرد. مشروط بر اینکه تغییرات این کمیتها چندان سریع نباشد.

از این مفهوم سه خاصیت برایندهٔ اصلیِ تقارنِ خودبه‌خود شکسته نتیجه می‌شود:

۱. سختی تعمیم یافته
۲. دینامیک جدید
۳. تکینگیهای پارامتر نظم و اهمیت آنها در فرایندهای اتلافی

این خواص همگی بسیار جالب‌توجه‌اند، زیرا بیشتر خواص مهم جامدات بستگی به آنها دارد، ولی ضیق‌وقت و موضوع بحث ما فقط اجازهٔ بحث در خاصیت اول را می‌دهد که از همه ساده‌تر و کلی‌تر است.

بازهم از این معنی که η یک پارامتر ترمودینامیکی فیزیکی است و به نحوی می‌توان نیرویی به آن اعمال کرد، استفاده می‌کنیم. این مطلب در مورد $\mathbf{D}$ ــ که با سمتگیری مرز سیستم جفت می‌شود ــ یا در مورد $\mathbf{M}$ یا جهتگیری بلور θ، ϕ، واضح است؛ اما در مورد پارامترهای نظم "پنهان" نظیر مغناطش زیرشبکه‌ای در پادفرومغناطیس یا ψ پارامتر نظم ابرشاره، با ابهام بیشتری همراه است. به هرحال، همیشه می‌توان η را در هر نقطهٔ سیستم در اختیار داشت. اگرچه F تابع زوایای فاز η نیست، اما به‌طور طبیعی تابعی از گرادیان این فازهاست، زیرا در غیر این صورت افت‌وخیزهای نسبیِ خیلی بزرگ فاز، پارامتر نظم را از بین خواهد برد. بنابراین

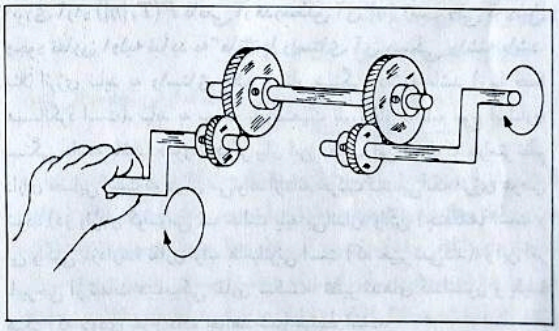
$$F = F(|\eta|, |\nabla \eta|^2, \dots)$$

و

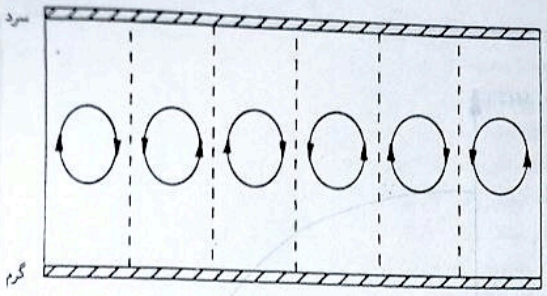
$$\frac{\delta^2 F}{\delta(\nabla\eta)^2} > 0$$

که حاکی از سختی مثبت سیستم در برابر تغییرات η است.

به‌این ترتیب تضمین می‌شود که اگر نیرویی در یک نقطهٔ نمونه بر $\eta(r)$ وارد شود، $\eta(r')$ در نقطهٔ دیگر سیستم به آن پاسخ خواهد داد. اساساً می‌توان η را به‌صورت میل‌گاردانی دانست که نیرو را از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌کند، یعنی از دور نیرو وارد می‌آورد (شکل ۴). تأکید می‌کنیم



شکل۴. سختی تعمیم‌یافته به‌صورت طرحوار. نیروی خارجی (هِندل) به پارامتر نظم در یک طرف سیستم (چرخ‌دنده‌ها) جفت می‌شود. تغییری در پارامتر نظم در یک نقطه سیستم منظم به همهٔ نقاط دیگر آن منتقل می‌شود(دندهٔ اول، دنده‌دوم را می‌چرخاند)، دندهٔ دوم، هندل دوم را می‌چرخاند. نیرو از یک طرف سیستم، از طریق پارامتر نظم، به‌انتهای دیگر سیستم منتقل می‌شود.



شکل۵. ناپایداری بنار در سیستمی با هندسهٔ مستطیلی. یک لایه شاره که بین دو صفحهٔ افقی موازی هم قرار دارد، از زیر گرم می‌شود. وقتی بین صفحه بالایی و صفحه پایینی گرادیان گرمایی به‌اندازهٔ کافی برسد، همرفت به‌صورت حلقه، به‌وجود می‌آید. در این برش کناری، پیکانها، نمایندهٔ سرعت شاره‌اند.

که این سختی یک خاصیت برایندهٔ است. هیچ یک از نیروهای بین ذرات واقعی نمی‌تواند از دور خود را اعمال کند. معنی ضمنی این حرفها این است که پیوند دوسر سیستم را نمی‌توان بدون از بین بردن نظم مولکولی در ناحیهٔ وسیع بین آنها، از هم گسست.

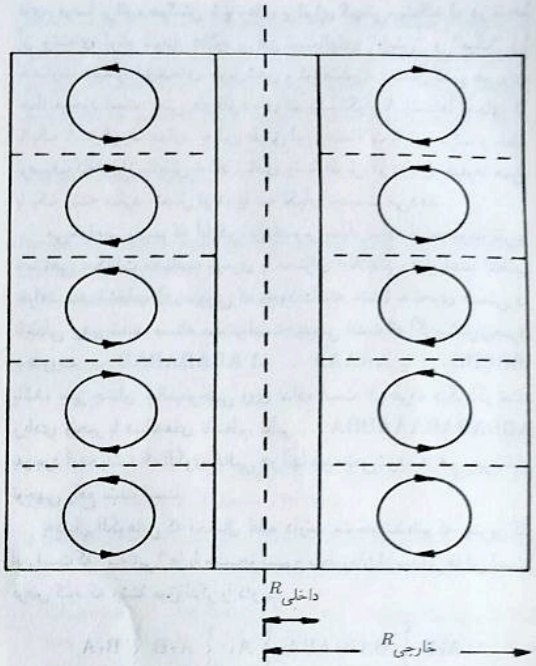
پس سختی اجسام جامد، مدلی است برای ردهٔ وسیعی از انواع سختیهای دیگر نظیر مغناطیس دائم، فروالکتریسته، و ابررسانایی و ابرشارگی. از کشف اثر جوزفسن به این طرف بر ما معلوم شده است که دو مورد اخیر را باید سختی فاز پارامتر نظم $\psi(r)$ دانست [۵].

دو خاصیت برایندهٔ اصلی دیگر نیز پیامدهای این آزادی فاز در سیستمهایی است که دارای تقارن شکسته‌اند: یکی وجود حرکات جمعی پارامتر نظم با طول‌موج بلند است، نظیر فونونها و امواج اسپینی که مدلهایی برای پدیده‌های گلداستون و هیگز در فیزیک ذرات بنیادی به‌شمار می‌روند؛ و دیگری وجود و رده‌بندی تکینگیها و بافتهای پارامتر نظم است: کدام میدانهای پارامتر نظم $\eta(r)$ مجازند وقتی ناحیه‌هایی با بُعد کمتر ــ نظیر خطوط گردابی و ناجابه‌جاییها، دیواره‌های حوزه، نقاط تکینه و غیره ــ از آنها حذف شده باشند؟ تقارن شکسته منجر به بروز مقیاسهای طول جدید می‌شود که در فاز متقارن وجود نداشتند.

حالا به موضوع اصلی این بحث می‌پردازیم: نظریه‌ای از این نوع برای ساختارهای اتلافی وجود ندارد. نخست انواع آزمایشهایی را شرح می‌دهیم که در نگاه اول گویی به گونه‌های مشابهی از تقارن شکسته در حالت اتلافی منجر می‌شوند و از آنها با همین عنوان یاد شده است. مثال اصلی، در این مورد ناپایداری بِنار[1] است: یک لایه شاره را از زیر گرم می‌کنیم و وقتی آهنگ گرمادهی از یک حد بحرانی فراتر می‌رود، "حلقه"های بسیار شبه‌منظم همرفت با اندازه یا طول‌موج نسبتاً ثابت، خودبه‌خود در آن پدیدار می‌شود (به شکل ۵ نگاه کنید).

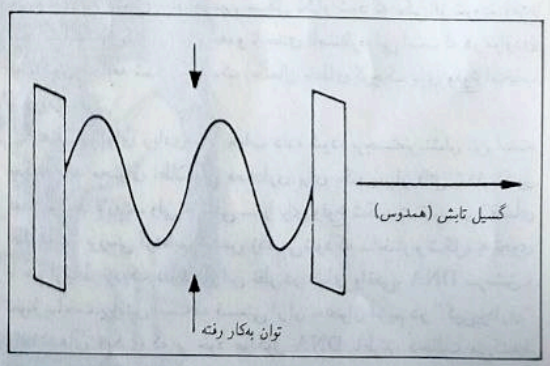
مثالهای دیگر زیادند، از جمله ناپایداری کوئت در یک شارهٔ چسبندهٔ واقع در بین استوانه‌های دوار (شکل ۶)، یا همین لیزر که در آن موج متناوبِ چگالی برانگیختگی، ظاهر می‌شود (شکل ۷).

1. benard



شکل ۶. جریان گوئت. شاره‌ای بین دو استوانه با سرعتهای دورانی متفاوت حول محورهایشان، قرار داده می‌شود. وقتی گرادیان سرعت از مقدار بحرانی معینی بیشتر شود حلقه‌های گردابی تشکیل می‌شوند. در این شکل، استوانه در امتداد طول برش داده شده است.

روشن است که در همهٔ این سیستمها تقارن شکستهٔ نوع ساده‌ای پدیدار می‌شود، مثلاً به این معنی که، هر مورد علامت دلبخواه است و نیز اینکه حالتی که بدواً همگن بوده است ناگهان به حالتی ناهمگن تغییر پیدا می‌کند. گذار اولیه در اغلب موارد پیوسته است، درست مانند یک گذار فاز مرتبهٔ دوم متعارف؛ بسیار گفته شده است که نوعی مشابهت عمیق میان این دو نوع سیستم وجود دارد. در واقع امر، دست‌کم از یک جنبهٔ ریاضی، شباهت موجود است: هر دو مواردی از ناپایداری دینامیکی‌اند، که برای آن نظریهٔ



شکل ۷. در یک لیزر موج ایستاده چگالی برانگیختگی بین دو صفحه یا دو آینه، ایجاد می‌شود که به گسیل باریکهٔ تابش همدوس می‌انجامد.

ریاضی عامی به نام " نظریهٔ فاجعه" وجود دارد که توم [۶] واضع آن است و در سالهای اخیر ریاضیدانان زیادی به بسط و تفصیل آن پرداخته‌اند که از میانشان شاید نام روئل [۷] بالاخص قابل ذکر باشد. اما گذارهای فاز ترمودینامیکی فقط با ساده‌ترین نوع فاجعه، یعنی "دوشاخه‌شدگی"، و با ساده‌ترین نوع حالت، یعنی " نقطهٔ ثابت" متناظرند، حال آنکه ظاهراً ناپایداریهای دینامیکی، حتی در مدلهای ریاضی بیش از حد ساده، همیشه به جانب انواع پیچیده‌تر و پیچیده‌تر تحول پیدا می‌کنند و سرانجام به رفتاری کاملاً آشوبناک می‌انجامند. تحول آشوب در این قبیل سیستمها، به زیبایی تمام در مقالات گولوب [۸] و درکتاب معروف ر. آبراهام و ج. مارسدن [۹] آمده است. جای تأسف است که در اینجا نمی‌توانیم به جزئیات کار زیبایی که در این منابع توصیف شده است بپردازیم و ناپایداریها را یکی بعد از دیگری، از دینامیک کلاسیک تا حلقه‌های دائمی و سپس دینامیک تک‌دوره‌ای و بس‌دوره‌ای و سرانجام تا آشوب کلی، دنبال کنیم.

وضع کار تجربی از این هم پیچیده‌تر است. بخصوص که اهلرز [۱۰] نشان داده است که حتی رفتار پیچیده‌ای که گولوب [۸] مشاهده کرد و ریاضیدانان پیش‌بینی کردند، ممکن است محصول یک سیستم بیش از حد مقیدی باشد که شدیداً از شرایط مرزی‌اش متأثر است. آنها حتی آشوب یا شبه‌آشوب خرد ـ مقیاس را در ناحیهٔ ظاهراً آرام سیستم بنار می‌بینند. ما سعی کرده‌ایم ثابت کنیم که از این امر گزیری نیست، و ساختارهای اتلافی در یک سیستم باز فیزیکی واقعی که مقید به شرایط مرزی مصنوعی نباشد، ناگزیر آشوبناک و ناپایدار خواهد شد. (مثلاً لیزر را فقط با دشواری و تدبیرهای متعدد می‌توان مجبور کرد که در یک مُد منفرد نوسان کند. این کار به تعبیهٔ درست صفحات یا آینه‌های انتهایی وابسته است، بنابراین در اینجا تقارن شکسته بشدت تابع شرایطی مرزی است که از بیرون اعمال شده است. لیزرهایی که به‌طور طبیعی وجود دارد ــ مثلاً در برخی چشمه‌های اخترفیزیکی ــ ظاهراً انتخاب مُد از خود بروز نمی‌دهد.)

پریگوژین و مکتب او تلاشهای متعددی کرده است تا مشابهتی میان این سیستمها و انرژی آزاد لانداؤ و بستگی آن به پارامتر نظم، که منجر به خواص مهم سیستمهای تعادلی با تقارن شکسته می‌شود، پدید بیاورد. اساس این تلاش تعمیم اصل تولید آنتروپی بیشینه بوده است، که در مورد سیستمهای اتلافی با رژیم دائمی در نزدیکی تعادل صادق است. تا آنجا که به نظر ما می‌رسد، این فکر در موارد معدودی که می‌توان معنای غیرمجرد ملموسی برایش قائل شد، غلط است، و بهرحال بدیهی است که در مورد رفتار آشوبناک مشهود در سیستمهای اتلافی واقعی، ربطی به اصل قضیه ندارد.

نتیجه‌ای که می‌گیریم این است که میان پایداری، سختی، و خواص برایندهٔ دیگر در سیستمهای تعادلی تقارن شکسته و خواص سیستمهای اتلافی خیلی دور از وضعیت تعادل، شباهتی مشهود نیست. هرگز دیده نشده است که سیستمهای نوع اخیر، سختی و پایداری و دوامی که شاخص سیستمهای پایدار (از لحاظ ترمودینامیک) با تقارن شکسته است، از خود بروز بدهند و هیچ دلیل ریاضی هم موجود نیست که چنین باشد. (یک مثال شایان توجه از سیستم واداشته‌ای که می‌بایست تقارن شکسته از خود بروز بدهد ولی نمی‌دهد در مراجع ۱۱ و ۱۲ شرح داده شده است.)

آنچه مایهٔ تأسف است این است که برخی از مؤلفان برآن شده‌اند که سیستمهایی نظیر لیزر و ناپایداری بنار را به‌عنوان مدلهایی برای سرشت و پیدایش حیات ــ به‌مثابه خاصیت برایندهای از مادهٔ بیجان ــ به‌کار ببرند.

این که حیات می‌تواند پایداری، کلیت، و هویّت مادهٔ ژنتیک خود را، به قیمت افزایش آهنگ تولید آنتروپی کل دنیا حفظ کنند، واقعیتی آشکار است که از زمان انتشار کتاب شرودینگر [۱۳] در سال ۱۹۴۰ با آن آشنا شده‌ایم. حیات دست‌کم به آن معنی یک ساختار اتلافی پایدار است: یک دلیل وجودی از طریق ارائهٔ یک نمونه.

مدتها پیش، تورینگ [۱۴] متوجه شد که یکی از منابع زایندهٔ ناپایداریهای دینامیکی، واکنش شیمیایی خود ـ کاتالیزوری است که در آن محصولات واکنش در مقام کاتالیزورهای واکنش نیز عمل می‌کنند. سازوکار جفت‌شدن بازی در DNA یک مثال واضح و خوب از این پدیده است. آیگن [۳] سعی کرده است که نظریه‌ای برای ناپایداریهای خود ـ کاتالیزوری در شوربای آغازین ارائه بدهد که توضیح جزئیات پیدایش حیات باشد.

تحقق "پارامتر نظمی در فضای اطلاعات مولکولی" که به‌وسیلهٔ یک ناپایداری دینامیکی خودکاتالیزوری واداشته شود و به نحوی مرموز به نیروی جادویی تکامل داروینی، خود ـ پایدار شود، براستی که چشم‌اندازی باشکوه برای تخیل است. بعید نیست که همین واقعه روی داده باشد ــ زیرا تصور چیزی خلاف آن دشوار است! ــ با این حال دلائلی موجود است که آدمی را نسبت به این ادعا، که به کل قضیه پی برده‌ایم، مشکوک می‌کند. چرا باید ناپایداری دینامیکی در همهٔ سیستمهای اتلافی دیگر، جز این یک مورد بسیار بااهمیت، قاعدهٔ کلی باشد؟ ما دست‌اندرکار شبیه‌سازی کامپیوتری مدلی برای پیدایش ماکرومولکولهای حامل اطلاعات هستیم. این برنامه هم‌اکنون به نتایج کاملاً جالب‌توجهی از نظر تولید خودجوش مولکولهای پیچیده، انجامیده است (به پیوست مراجعه کنید).

در پایان نکتهٔ اصلی را مجدداً تکرار می‌کنیم: واقعیت خواص برآینده را می‌پذیریم، زیرا جزئیات این فرایند را می‌دانیم. غرض از خواص برآینده، قابلیت سیستمهای پیچیدهٔ فیزیکی است در بروز دادن خواصی که ربطی به خواص اجزاء آنها ندارد. اما قبول نداریم که می‌توان وجود "ساختارهای اتلافی" پایداری را در سیستمهای بی‌جان ثابت کرد که دوامشان را نیروهای محرکهٔ دینامیکی تأمین می‌کنند. بنابراین نمی‌دانیم چگونه نظرپردازی دربارهٔ این ساختارها و تقارن شکستهٔ آنها می‌تواند ربطی به مسئلهٔ باز پیدایش و ماهیت حیات داشته باشد.

پیوست

در تصویر ساده‌ای که ما به‌کار می‌بریم، شروع کار با "شوربا"یی است از تکپار [مونومر]هایی که از دو نوع متفاوت A و B اند و شار انرژیی موجود است که از بیرون تأمین می‌شود و سیستم را به سمت تشکیل رشته‌هایی از این تکپارها می‌راند و این کار را مطابق قواعد ساده‌ای برای طویل شدن یا کوتاه شدن زنجیره‌ها انجام می‌دهد. این فرایند متکی‌بر دور دمایی است: در فاز دمای کم دو رشته (یا یک رشته و تکپارها) از طریق جاذبهٔ AB به سستی به هم متصل می‌شوند (مانند بندسازی هیدروژنی بین جفت پورین-پیریمیدین). در حالی که در این وضع قرار دارند، ممکن است بندسازی قویتری بین دو رشتهٔ مجاور نامتصل صورت بگیرد. در فاز دمای زیاد بندهای هیدروژنی می‌شکنند، اما بندهای قویتری که در طول رشته‌ها دست‌اندرکارند، نمی‌شکنند و رشته‌های نوساخته (یا طویل‌شده) از هم جدا می‌شوند تا دور بعدی شروع شود. احتمال بندسازی قوی بین تکپارهای ناهمانند اندکی بیش از بندسازی تکپارهای همانند است. احتمالی هم وجود دارد که در فاز دمای زیاد، بندی قوی، فرضاً بر اثر برهم‌کنش با پرتوهای پر انرژی کیهانی، بشکند (و در نتیجهٔ آن رشته‌ای کوتاه شود). علاوه بر این احتمالهای "زایش" و "مرگ" (یا به‌عبارت دقیقتر، فرایندهای طویل‌شدن و کوتاه‌شدن)، احتمال کمی هم برای خطا موجود است: یعنی در فاز دمای کم یک تکپار A اشتباهاً به‌جای B با یک A دیگر بند بسازد. به این طریق این احتمالات زایش، مرگ، و خطا، توصیف کاملی از ساختن تعداد زیادی رشتهٔ طویل، از دریای تکپارها همراه با یک رشته منفرد متصل از دو یا سه تکپار، به‌دست می‌دهد.

می‌خواهیم ببینیم که آیا در این تصویر بسیار ساده از مجموعهٔ تقریباً نامتناهی امکانات مختلف، پلیمری با محتوای اطلاعاتی قابل اعتنا انتخاب خواهد شد: انتخاب (درصورتی که وجود داشته باشد) به نحوی ضمنی در ناخطی بودن شدید مسئله مستتر است. بدیهی است که اگر بیشتر زنجیرها به‌صورت ABABABAB... (یا AAAAA... یا BBBBB...) باشد، چیز چندان جالب‌توجهی روی نداده است. از طرف دیگر اگر تعداد زیادی زنجیر با دنباله‌های نامنظم، نظیر ABBABABAAABBA... به‌وجود آمده باشند که الگوی غالبی در آنها دیده نمی‌شود، باز هم چیز شایان توجهی واقع نشده است.

به‌دنبال الگوهایی که احتمال غلبه دارند، متوجه شده‌ایم که بهترین کار این است که "سه‌تایی"ها را جستجو کنیم و منظورمان از سه‌تایی‌ها این است: فرض کنید که رشتهٔ فوق‌الذکر را داریم.

$$A_2B \left\{ \right. BAB_6ABA \left\{ \right. A_1 \left\{ \right. A_2B \left\{ \right. B_2A$$

هر وقت که دو تکپار همانند در مجاورت هم‌اند با خط دندانه‌داری به‌صورت فوق آنها را از هم جدا می‌کنیم. سپس طول دنباله‌های متناوبی را که هر بسپار را به‌وجود می‌آورند می‌شماریم (اعدادی که در هر دنباله دیده می‌شوند شاخص این طول‌اند). "سه‌تایی"، سه‌تاییِ طولهایِ سه دنبالهٔ پیاپی است. در مثال بالا داریم (۲,۶,۱)، (۶,۱,۲) و (۱,۲,۲). توجه کنید که تصویر آینه‌ای بسپار نیز به همین نتیجه می‌انجامد. آنگاه می‌بینیم که آیا بدنهٔ اکثر بسپارهای بلند، از سه‌تایی خاصی تشکیل شده است یا نه. به نظر ما این کار مفیدتر از آنست که کل یک بسپار را به‌عنوان نمونهٔ اول چیزی که باید انتخاب شود، اختیار کنیم.

نتایج اولیهٔ ما حاکی از آن است که با اختیار بعضی مقادیر برای احتمالهای بندسازی، انتخاب بعضی از سه‌تایی‌ها صورت می‌پذیرد و حتی احتمالشان می‌تواند زیاد باشد (و در چندین سیکل تکرار شود که یکی از شروط وقوع انتخاب است). نکتهٔ جالب‌توجه، و تا حدی نامنتظره، این است که در مواردی که تاکنون مطالعه شده وجود یک احتمال خطای کوچک برای وقوع انتخاب ضرورت دارد.

هنوز سؤالهای زیادی باید جواب داده شود، برجسته‌ترینشان این است: چگونه باید محتوای اطلاعاتی معناداری برای یک بسپار قائل شد؟ تاکنون فقط شرایط لازم ــ ولی نه کافی ــ را برای وقوع شکست تقارن در "فضای اطلاعات" بررسی کرده‌ایم. حدس زده می‌شود که ساختار و شکل، به نحوی با هم ارتباط نزدیک دارند (از این نظر در دنیای واقعی، DNA سرمشق و نمونهٔ ساخت پروتئین است که قسمتی از آن به‌عنوان آنزیم در "کپی‌برداری" و فرایندهای دیگری که بر خود مولکول DNA ناظرند، دخالت می‌کنند). آیا راهی هست که بتوان این خصوصیت را در مدل ساده‌ای که ارائه شد دید؟ این یکی از اساسیترین مسائل درک منشأ حیات و برگردان نه‌چندان

ظریفانه‌ای از مسئلهٔ معروف "مرغ" و "تخم‌مرغ" است. [۳]، در حال حاضر کوشش ما متوجه جواب گفتن به این مسئله نیست، بلکه معطوف به موضوع فروتنانه‌تر ارتباط شکست تقارن و مسئلهٔ پیدایش حیات (فقط یک رمز ارثی اولیه) و زمینه‌ای است که در آن چنین چیزی امکانپذیر و بامعنی باشد.

ترجمهٔ محمدرضا خواجه‌پور

• Broken symmetry, emergent properties,dissipative structure life: are they related?
P W Anderson and D L Stein
Basic Notions of Condensed Matter Physics, W Benjamin, 1984, New York.

مراجع

بعضی از افکاری را که در این مقاله آمده است، می‌توان در

Anderson P W, 1972, *Science*, 177, 393.

یافت. بحث مفصلتری از رابطهٔ میان تقارن شکسته، سختی تعمیم یافته، مدهای گلداستون و غیره در یادداشتهای منتشرنشدهٔ اندرسون موجود است.

1. Glansdorff P and Prigogine I, 1971, *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*, Wiley, New York ; Nicolis G and Prigogine I, 1977, "Self-organization in non-equilibrium systems", Wiley, New York.
2. Haken H, 1977, *Synergetics: An introduction*, Springer-Verlag, Berlin.
3. Eigen M, 1971, *Naturwissenschaften*, **58**, 465.

برای آشنایی با پژوهشی در این زمینه‌ها رجوع کنید به

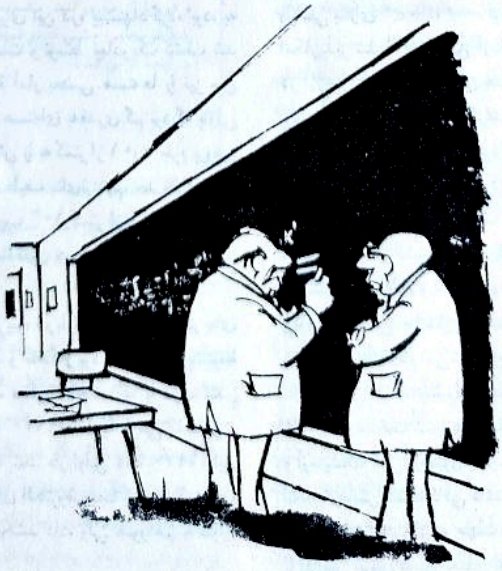
Eigen M and Schuster P, 1979, *The hypercycle: A principle of natural self-organization*, Springer-Verlag, Berlin.

4. Landau L D and Lifschitz E M, 1969,*Statistical physics*, Pergamon Press, Ltd, Elmsford, New York, .

۵. بحثی دربارهٔ بعضی از این نکات در مرجع زیر آمده است:

Anderson P W, 1966, *Rev Mod Phys*, **38**, 298.

6. Thom R, 1975, *Structural stability and morphogenesis*, W A Benjamin, Reading, Mass.
7. Ruelle D and Takens F, 1971, *Comm Math Phys*, **20**, 167.
8. Gollub J and Swinney H L, 1975, *Phys Rev Lett*, **35**, 927.
9. Abraham R and Marsden J, 1967, *Foundations of mechanics*, Benjamin W A, New York.
10. Ahlers G and Behringer R P, 1978, *Phys Rev Lett*, **40**, 712.
11. Anderson P W, 1978, "Can broken symmetry occur in driven systems?", Remarks at Solvay Conference, Brussels (to be published).
12. Stein D L, 1980, *J Chem Phys*, **72**, 2869.
13. Schrödinger E, 1945, *What is Life?*, University Press, Cambridge.
14. Turing A M, 1952, *Philos Trans Roy Soc*, London Ser B, **237**, 37.



" ... از طرف دیگر، احساس مسئولیت در قبال جامعه ناچارم می‌کند که درست همینجا دست نگه دارم."