

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 46

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۴۶

مترجم: مسعود هاشمی

ویراستار: مژگان اروجلو

حروفچین: گلشن لیرایی

نسخه‌ی ۱۰۰ تابستان ۱۳۹۹

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید.

www.Zharfa90.ir

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

فصل ۴۶

چرخ ضامن دار^۱

۱.۴۶ چرخ ضامن دار چگونه کار می کند؟^۲

در این فصل درباره‌ی چرخ ضامن دار، دستگاه بسیار ساده‌ای که اجازه می‌دهد یک میل گردان^۳ فقط در یک جهت بچرخد، بحث می‌کنیم. امکان داشتن چیزی که فقط در یک جهت بچرخد، به تجزیه و تحلیل مفصل و دقیق نیاز دارد، و پیامدهای بسیار جالبی نیز دارد.

طرح این بحث از تلاش برای توضیح بنیادی این واقعیت، از دیدگاه مولکولی یا جنبشی، ناشی می‌شود که برای کاری که می‌تواند از یک ماشین گرما استخراج شود مقدار بیشینه‌ای وجود دارد. البته ما ماهیت استدلال کارنو^۴ را فهمیده‌ایم، اما خوب است توضیحی بیاوریم که بنیادی باشد به این معنی که بتوانیم آنچه از نظرفیزیکی اتفاق می‌افتد را بفهمیم. اکنون، برای نشان دادن اینکه وقتی گرما از یک مکان به مکان دیگر منتقل می‌شود، می‌توانیم فقط مقدار معینی کار بدست آوریم؛ برهان‌های ریاضی پیچیده‌ای وجود دارد که از قوانین نیوتن پیروی می‌کنند، اما تبدیل آن به برهان‌های بنیادی مشکل است. به طور خلاصه، ما آن را درک نمی‌کنیم، اگرچه می‌توانیم ریاضیات آن را بفهمیم.

در استدلال کارنو، این واقعیت که بیش از مقدار معینی از کار را نمی‌توان در رفتن از یک دما به دمای دیگر استخراج کرد، از اصل موضوع^۵ دیگری استنتاج شده است، یعنی اینکه اگر همه چیز در دمای یکسانی باشد، گرما نمی‌تواند به وسیله فرآیند چرخه‌ای^۶ تبدیل به کار شود. اول بیاورید به عقب برگردیم و سعی کنیم حداقل در یک مثال بنیادی، ببینیم که چرا این بیان ساده‌تر درست است.

بیاورید سعی کنیم دستگاهی بسازیم که قانون دوم ترمودینامیک را نقض کند، یعنی ابزاری^۷ که کار را از یک

¹Ratchet and pawl

²How a ratchet works

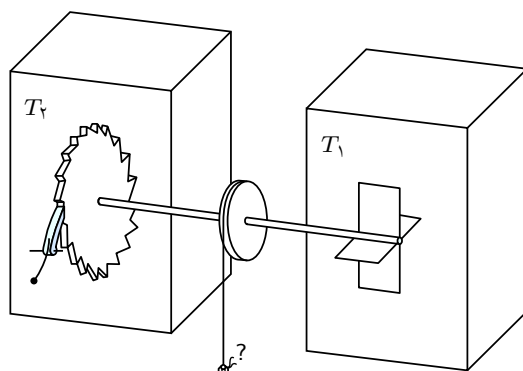
³shaft

⁴Carnot's argument

⁵axiom

⁶cyclic process

⁷gadget



شکل ۱۰۴۶: ماشین چرخ ضامن دار.

مخزن گرما تولید می‌کند در حالی که دمای همه‌ی اشیاء یکسان می‌باشد. فرض کنید جعبه‌ی گازی در دمای معین داریم که داخل آن محوری با پره هایش وجود دارد. (شکل شماره ی ۱۰۴۶ را ببینید اما $T_1 = T_2 = T$ در نظر بگیرید). به دلیل بمباران پره توسط مولکول‌های گاز، پره نوسان می‌کند و آهسته تکان می‌خورد. تمام آنچه باید انجام دهیم اینست که در انتهای دیگر محور، چرخ‌ی را آویزان کنیم که فقط در یک جهت می‌تواند بچرخد؛ این دستگاه، همان چرخ ضامن دار است. پس وقتی میل‌گردان سعی می‌کند در یک جهت جابجا شود نمی‌چرخد، و هنگامی که به جهت دیگر جنبش نماید می‌چرخد. بنابراین چرخ به آرامی می‌چرخد، و حتی شاید ککی را روی فنی که از غلتک^۸ روی میل‌گردان آویزان است متصل کنیم، و کک را بالا ببریم! اکنون می‌پرسیم آیا این ممکن است؟ طبق فرضیه‌ی کارنو، غیرممکن است. اما اگر صرفاً به آن نگاه کنیم، می‌بینیم در نظر اول کاملاً ممکن به نظر می‌رسد. بنابراین باید دقیقتر نگاه کنیم. در واقع، اگر به چرخ ضامن دار نگاه کنیم، یچیدگی‌هایی را مشاهده می‌کنیم.

اولاً، چرخ ضامن دار^۹ ایده‌آل‌مان در حد امکان ساده است، اما حتی در این صورت هم ضامن^{۱۰} وجود دارد، و باید فنی در ضامن باشد. ضامن باید بعد از به انتها رسیدن یک دندانه^{۱۱} برگردد، بنابراین فنر لازم است. ویژگی دیگر این چرخ ضامن دار، که در شکل نشان داده نشده است، بسیار ضروری است. فرض کنید دستگاه از قطعات کاملاً کشسان^{۱۲} ساخته شده است. بعد از اینکه ضامن از انتهای دندانه بالا می‌رود و توسط فنر به عقب رانده می‌شود، در برابر چرخ^{۱۳} نوسان^{۱۴} می‌کند و به نوسان ادامه می‌دهد. سپس هنگامی که افت‌وخیز^{۱۵} دیگری پیش بیاید، چرخ می‌تواند به طرف دیگر بچرخد، زیرا در لحظه‌ای که ضامن بالاست دندانه می‌تواند به پایین برسد! بنابراین یک بخش ضروری از برگشت‌ناپذیری این چرخ سازوکار میرایی^{۱۶} یا ساکن کردن^{۱۷} است

⁸drum

⁹Ratchet

¹⁰pawl

¹¹tooth

¹²elastic

¹³wheel

¹⁴bounce

¹⁵fluctuation

¹⁶damping

¹⁷deadening

که نوسان را متوقف می‌نماید. البته وقتی میرایی اتفاق می‌افتد، انرژی‌ای که در ضامن بود به چرخ منتقل می‌شود و به صورت گرما نمایان می‌شود.

بنابراین همانطور که چرخ می‌چرخد، گرمتر و گرمتر خواهد شد. برای ساده‌سازی بیشتر، می‌توانیم یک گاز را در اطراف چرخ قرار دهیم تا بخشی از گرما را بگیرد. به هر حال، فرض می‌کنیم دمای گاز، همراه با چرخ، در حال افزایش است. آیا افزایش دما برای همیشه ادامه خواهد یافت؟ نه! ضامن و چرخ، هر دو در دمای T ، حرکت براونی^{۱۸} نیز دارند. این حرکت به این صورت است که، هر از گاهی به طور تصادفی، درست در لحظه‌ای که حرکت براونی روی پره‌ها می‌خواهد محور را به عقب برگرداند، ضامن خود را بالا و روی دندانه می‌کشد. و همینکه اشیاء داغ‌تر می‌شوند این اتفاق بیشتر رخ می‌دهد. بنابراین، دلیل اینکه این دستگاه حرکت دائمی ندارد همین است. وقتی پره‌ها ضربه می‌خورند، گاهی اوقات ضامن بلند می‌شود و روی قسمت انتهایی محور می‌رود. اما گاهی اوقات، هنگامی که دستگاه می‌خواهد به سمت دیگر بچرخد، ضامن به دلیل افت و خیز حرکت‌ها در سمت چرخ، قبلاً بلند شده و چرخ به سمت دیگر بر می‌گردد! نتیجه‌ی خالص عدم حرکت است. مشکل نیست نشان دهیم که وقتی دما در هر دو طرف برابر است، هیچ حرکت میانگین خالصی برای چرخ وجود نخواهد داشت. البته چرخ مقدار زیادی به این طرف و آن طرف نوسان می‌کند، اما کاری که ما می‌خواهیم که چرخیدن در یک جهت است را انجام نمی‌دهد.

بیایید به دلیل آن نگاه کنیم. برای اینکه ضامن را به بالای دندانه برسانیم، لازم است در مقابل فنر کار انجام دهیم. فرض کنیم این انرژی را ϵ بنامیم، و θ زاویه‌ی بین دندانه‌ها باشد. شانس اینکه دستگاه بتواند برای رسیدن ضامن به بالای دندانه انرژی کافی ϵ را انباشته نماید، $e^{\frac{-\epsilon}{kT}}$ است. اما احتمال اینکه ضامن به طور تصادفی بالا باشد نیز $e^{\frac{\epsilon}{kT}}$. بنابراین تعداد دفعاتی که ضامن بالا است و چرخ می‌تواند آزادانه به عقب برگردد، برابر با تعداد دفعاتی است که وقتی ضامن پایین است انرژی کافی برای چرخش آن به جلو دارد. بنابراین به «تبادل» می‌رسیم و چرخ نمی‌چرخد.

۲۰۴۶ چرخ ضامن دار به عنوان ماشین^{۱۹}

اکنون بیایید پیشتر برویم. این مثال را در نظر بگیرید که دمای پره‌ها T_1 و دمای چرخ، یا چرخ ضامن دار، T_2 باشد، و T_2 کمتر از T_1 باشد. چون چرخ سرد است و افت و خیزهای ضامن نسبتاً کم تکرار^{۲۰} است، برای ضامن به دست آوردن انرژی ϵ بسیار دشوار خواهد بود. با توجه به دمای بالای T_1 ، پره‌ها غالباً انرژی ϵ به دست می‌آورند، بنابراین ابزار ما، همانطور که طراحی شده است، در یک جهت حرکت خواهد کرد.

اکنون می‌خواهیم ببینیم آیا این دستگاه می‌تواند وزنه‌ها را بالا ببرد. یک فنر در وسط غلتک قرار می‌دهیم و وزنه‌ای، مانند کک، را بر روی فنر قرار می‌دهیم. فرض می‌کنیم گشتاور نیروی^{۲۱} ناشی از وزنه L باشد. اگر L

¹⁸Brownian motion¹⁹The ratchet as an engine²⁰infrequent²¹torque

خیلی بزرگ نباشد، ماشین وزنه را بلند می‌کند چون نوسانات براونی باعث می‌شود با احتمال بیشتری در یک جهت حرکت کند تا جهت دیگر. می‌خواهیم بدانیم چقدر وزنه می‌تواند بردارد، با چه سرعتی دور می‌زند، و غیره. ابتدا حرکت رو به جلو را در نظر می‌گیریم، روش معمولی که انسان چرخ ضامن دار طراحی می‌کند. برای اینکه چرخ یک گام^{۲۲} به جلو رود، چقدر انرژی باید از انتهای پره قرض گرفته شود؟ برای بالا بردن ضامن باید انرژی قرض بگیریم. چرخ با زاویه θ در برابر گشتاور نیروی L می‌چرخد، بنابراین انرژی $L\theta$ را نیز نیاز داریم. بنابراین مقدار کل انرژی که باید قرض بگیریم $\epsilon + L\theta$ است. احتمال اینکه این انرژی را بدست آوریم متناسب است با $e^{-\frac{(\epsilon + L\theta)}{kT_1}}$. در واقع، فقط مسئله بدست آوردن انرژی نیست، بلکه می‌خواهیم تعداد دفعات در ثانیه که این انرژی را دارد نیز بدانیم. احتمال در هر ثانیه متناسب با $e^{-\frac{(\epsilon + L\theta)}{kT_1}}$ است، و ثابت تناسب را با $\frac{1}{\tau}$ نشان می‌دهیم. به هر حال این ثابت در نهایت حذف خواهد شد. هنگامی که یک گام رو به جلو می‌رود، کار انجام شده روی وزنه $L\theta$ است. انرژی گرفته شده از پره $\epsilon + L\theta$ است. انرژی ϵ به فنر می‌رسد، سپس فنر تولید صوتی کرده، و این انرژی تبدیل به گرما می‌شود. تمام انرژی گرفته شده برای بلند کردن وزنه و راندن ضامن صرف می‌شود، که بعداً ضامن عقب می‌رود و گرما را به طرف دیگر می‌دهد.

اکنون به حالت معکوس نگاه می‌کنیم که حرکت رو به عقب است. در این مورد چه اتفاقی می‌افتد؟ برای اینکه چرخ به عقب حرکت کند تمام آنچه باید انجام دهیم این است که برای اینکه ضامن به اندازه کافی بالا رود تأمین انرژی نماییم، به طوری که چرخ ضامن دار بلغزد. این انرژی باز هم ϵ است. اکنون احتمال در هر ثانیه برای اینکه ضامن تا این ارتفاع بالا رود $(\frac{1}{\tau})e^{-\frac{\epsilon}{kT_1}}$ است. ثابت تناسب همان است، اما این بار kT_1 به دلیل دمای متفاوت افزایش نشان می‌دهد. وقتی این اتفاق می‌افتد، کار انجام می‌شود زیرا چرخ به عقب می‌لغزد. چرخ یک دندانه^{۲۳} عقب می‌رود، بنابراین کار $L\theta$ را انجام می‌دهد.

انرژی گرفته شده از دستگاه چرخ ضامن دار ϵ است، و انرژی‌ای که در T_1 به گاز در سمت پره داده می‌شود $\epsilon + L\theta$ است. برای این که دلیل آن را بفهمید به کمی تفکر نیاز است. فرض کنید ضامن خود را به طور تصادفی توسط افت و خیز بالا کشیده است. سپس وقتی برمی‌گردد و آن را در مقابل دندانه به پایین فشار می‌دهد، نیرویی وجود دارد که برای چرخش چرخ تلاش می‌کند، چون دندانه بر روی سطح شیب دار فشار می‌آورد. این نیرو کار انجام می‌دهد، همین‌طور نیروی ناشی از وزنه‌ها. بنابراین هر دو با هم نیروی کل را تشکیل می‌دهند، و تمام انرژی‌ای که به آرامی آزاد می‌شود به صورت گرما در انتهای پره ظاهر می‌شود. (البته طبق قانون پایستگی انرژی، باید این‌طور باشد، اما باید مراقب باشید که مسائل را بطور همه جانبه بررسی کنید!). متوجه می‌شویم که تمام این انرژی‌ها دقیقاً یکسانند، اما معکوس شده‌اند. بنابراین، بسته به اینکه کدامیک از این دو آهنگ بیشتر است، وزنه یا به آرامی بالا می‌رود یا به آرامی آزاد می‌شود. البته، وزنه به طور مداوم به اطراف جست و خیز کرده، برای مدتی بالا و برای مدتی پایین می‌رود، اما ما در باره‌ی رفتار میانگین صحبت می‌کنیم.

فرض کنید برای یک وزنه‌ی خاص آهنگ‌ها^{۲۴} برابر می‌شوند. سپس یک وزنه‌ی فوق العاده کوچک را به فنر

²²step²³notch²⁴rate

جدول ۱۰۴۶: خلاصه‌ای از عملیات چرخ ضامن دار

حرکت رو به جلو:		انرژی $\epsilon + L\theta$ از پره نیاز می‌باشد.	$\frac{1}{T} e^{-(L\theta+\epsilon)/kT_1}$ آهنگ $\therefore$
انرژی گرفته شده از پره		$L\theta + \epsilon$	
کار انجام شده		$L\theta$	
انرژی داده شده به چرخ		ϵ	
حرکت رو به عقب:		انرژی ϵ از ضامن نیاز می‌باشد:	$\frac{1}{T} e^{-\epsilon/kT_2}$ آهنگ $\therefore$
مشابه بالا ولی با علامت منفی		انرژی گرفته شده از چرخ:	ϵ
		کار آزاد شده	$L\theta$
		انرژی داده به پره	$L\theta + \epsilon$
اگر دستگاه برگشت باشد، آهنگ‌ها برابرند، بنابراین $\frac{\epsilon}{T_2} = \frac{\epsilon + L\theta}{T_1}$			
گرما داده شده به چرخ ضامن دار $\frac{\epsilon}{L\theta + \epsilon}$ برابرین $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ بنابرین $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\epsilon + L\theta}{\epsilon}$ هستند. اگر وزنه را پایین بیاوریم، $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\epsilon + L\theta}{\epsilon}$ است.			

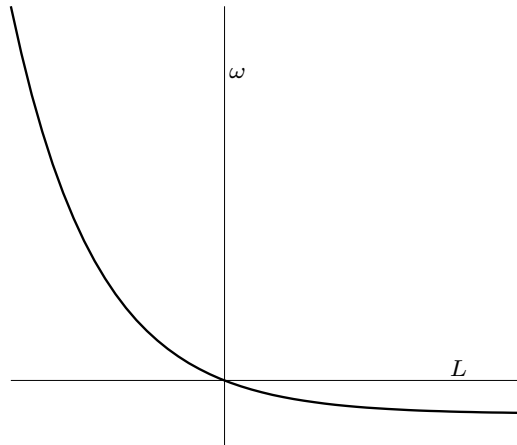
اضافه می‌کنیم. وزنه به آرامی پایین می‌آید، و کار بر روی ماشین انجام می‌شود. انرژی از چرخ گرفته خواهد شد و به پره‌ها داده می‌شود. اگر بجای این، مقدار خیلی کمی از وزنه کم کنیم آنگاه عدم توازن^{۲۵}، راه دیگر می‌باشد. وزنه بالا برده شده، و گرما از پره گرفته شده و به چرخ منتقل می‌شود. بنابراین به شرطی که وزنه دقیقاً طوری باشد که این دو آهنگ برابر باشند، ما شرایط چرخه‌ی برگشت‌پذیر کارنو^{۲۶} را داریم. واضح است که این شرط $\frac{\epsilon + L\theta}{T_1} = \frac{\epsilon}{T_2}$ است. فرض کنیم دستگاه به آرامی وزنه را بالا می‌برد. انرژی Q_1 از پره‌ها گرفته شده و انرژی Q_2 به چرخ منتقل می‌شود، و این انرژی‌ها به نسبت $\frac{\epsilon + L\theta}{\epsilon}$ هستند. اگر وزنه را پایین بیاوریم، $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\epsilon + L\theta}{\epsilon}$ را نیز داریم.

بنابراین (جدول ۱۰۴۶) داریم:

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2.$$

علاوه بر این، کار انجام شده به انرژی گرفته شده از پره مانند $L\theta$ به $L\theta + \epsilon$ ، و بنابراین مانند $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ است. می‌بینیم که دستگاه ما در حالی که بصورت برگشت پذیر عمل می‌کند، کاری بیشتر از این نمی‌تواند انجام دهد. این نتیجه‌ای است که از استدلال کارنو انتظار داریم، و نتیجه‌ی اصلی این درس است. با این حال، می‌توانیم

²⁵imbalance²⁶Carnot's reversible cycle



شکل ۲۰۴۶: سرعت زاویه ای چرخ ضامن دار به صورت تابع گشتاورنیرو

دستگاهمان را برای درک چند پدیده‌ی دیگر، حتی خارج از تعادل^{۲۷}، و بنابراین فراتر از گستره‌ی ترمودینامیک به کار ببریم.

اکنون بگذارید محاسبه کنیم اگر همه چیز در دمای یکسان باشد، و وزنه‌ای را روی غلتک آویزان کنیم دستگاه یک جهتی^{۲۸} ما با چه سرعتی می‌چرخد. البته اگر غلتک را بسیار شدید بکشیم، انواع پیچیدگی‌ها وجود خواهد داشت. ضامن روی چرخ ضامن دار سر می‌خورد، یا فتر می‌شکند، و یا چیزی دیگر. اما فرض کنید به اندازه‌ی کافی به آرامی بکشیم که همه چیز به خوبی کار کند. اگر به یاد داشته باشیم که دو دما برابرند، در این شرایط تجزیه و تحلیل فوق برای احتمال جلو و عقب رفتن چرخ درست است. در هر مرحله یک زاویه‌ی θ به دست می‌آید، بنابراین سرعت زاویه‌ای θ در احتمال یکی از این جهش‌ها ضرب می‌شود. چرخ با احتمال $(\frac{1}{\tau})e^{-\frac{(\epsilon+L\theta)}{kT}}$ جلو و با احتمال $(\frac{1}{\tau})e^{-\frac{\epsilon}{kT}}$ عقب می‌رود، به طوری که برای سرعت زاویه‌ای داریم:

$$\begin{aligned}\omega &= (\theta/\tau)(e^{-(\epsilon+L\theta)/kT} - e^{-\epsilon/kT}) \\ &= (\theta/\tau)e^{-\epsilon/kT}(e^{-L\theta/kT} - 1).\end{aligned}\quad (۱۰۴۶)$$

اگر ω را برحسب L رسم کنیم، منحنی نشان داده شده در شکل ۲۰۴۶ بدست می‌آید. می‌بینیم بسته به اینکه L مثبت یا منفی باشد تفاوت زیادی وجود دارد. اگر در L محدوده‌ی مثبت افزایش یابد، که وقتی اتفاق می‌افتد که ما سعی می‌کنیم چرخ را به عقب برانیم، سرعت برگشت به عقب به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود. وقتی L منفی می‌شود، ω واقعاً به سمت جلو «جهش می‌کند»، زیرا که e به توان خیلی بزرگ، بسیار بزرگ می‌شود! بنابراین سرعت زاویه‌ای که از نیروهای مختلف به دست آمده، بسیار نامتقارن است. رفتن به یک جهت آسان است: مقدار زیادی سرعت زاویه‌ای برای یک نیروی کوچک بدست می‌آوریم. برای رفتن به جهت دیگر، می‌توانیم نیروی زیادی اعمال کنیم، و با این حال چرخ به سختی می‌چرخد.

²⁷equilibrium

²⁸one-way device

ما در یکسوساز الکتریکی^{۲۹} چیز مشابهی را می‌یابیم. به جای نیرو، میدان الکتریکی داریم و به جای سرعت زاویه-ای، جریان الکتریکی داریم. در مورد یکسوساز، ولتاژ متناسب با مقاومت نیست، و وضعیت نامتقارن است. همان تحلیلی که برای یک یکسوساز مکانیکی انجام دادیم برای یکسوساز الکتریکی نیز صادق می‌باشد. در واقع، نوع فرمولی که در بالا بدست آوریم، برای ظرفیت های حامل جریان یکسوسازها به عنوان تابعی از ولتاژ آنها صادق است.

حالا بیایید همه‌ی وزنه‌ها را کنار بگذاریم و به ماشین اصلی نگاه کنیم. اگر T_2 کمتر از T_1 باشد، چرخ ضامن‌دار همانطور که هر کسی باور دارد، به سمت جلو می‌رود. اما آنچه که در نگاه اول باور کردن آن مشکل است معکوس آن است. اگر T_2 بزرگتر از T_1 باشد، چرخ ضامن‌دار به سمت معکوس می‌چرخد! چرخ ضامن‌دار دینامیکی با مقدار زیادی گرما خود را به عقب می‌کشد، چرا که ضامن حرکات نوسانی می‌کند. اگر ضامن، برای یک لحظه، در جایی روی سطح شیب‌دار قرار داشته باشد، سطح شیب‌دار را به یک طرف می‌کشد. اما ضامن همیشه روی سطح شیب‌دار فشار می‌آورد، زیرا اگر به اندازه‌ی کافی بلند شود تا به جلوی نقطه‌ی دندانه برسد، سطح شیب‌دار سر می‌خورد و ضامن دوباره بر روی سطح شیب‌دار فرود می‌آید. بنابراین چرخ ضامن‌دار داغ به طور ایده‌آل برای دور زدن در جهتی دقیقاً برعکس جهتی که در اصل برای آن طراحی شده است ساخته شده است!

باوجود طراحی هوشمندانه‌ی متمایل به یک جهت، اگر دو دما دقیقاً مساوی باشد، تمایل بیشتری برای چرخیدن در یک جهت نسبت به جهت دیگر وجود ندارد. لحظه‌ای که ما به این دستگاه نگاه می‌کنیم، ممکن است در یک جهت یا جهت دیگر بچرخد، اما در دراز مدت، به هیچ جایی نمی‌رود. این واقعیت که دستگاه چرخ ضامن‌دار به هیچ جایی نمی‌رود در واقع اصل عمیق بنیادی‌ای است که تمام ترمودینامیک مبتنی بر آن است.

۳۰۴۶ برگشت پذیری در مکانیک^{۳۰}

کدام اصل عمیق‌تر مکانیکی به ما می‌گوید، اگر در بلند مدت دما همه جا یکسان نگه داشته شود، ابزار ما نه به سمت راست می‌چرخد نه به سمت چپ؟ از قرار معلوم ما یک پیشنهاد اساسی داریم که راهی برای طراحی ماشینی که، وقتی به حال خود رها شود، پس از مدت زمان کافی بیشتر احتمال دارد به یک طرف بچرخد تا طرف دیگر، وجود ندارد. باید سعی کنیم ببینیم چطور از قوانین مکانیک چنین چیزی نتیجه می‌شود.

قوانین مکانیک چیزی شبیه به این دارند: جرم ضرب در شتاب برابر با نیرو است، و نیروی هر ذره، تابع پیچیده‌ای از مکان‌های تمام ذرات دیگر است. وضعیت‌های دیگری وجود دارد که در آن نیروها بستگی به سرعت دارند، مثلاً در مغناطیس، اما در حال حاضر آن را در نظر نمی‌گیریم. در اینجا مورد ساده‌تری مانند گرانش را در نظر می‌گیریم، که نیروها فقط به مکان بستگی دارند. اکنون فرض کنید که مجموعه‌ی معادلات مان را حل کرده‌ایم و برای هر ذره حرکت معین $x(t)$ را داریم. در یک سیستم به اندازه کافی پیچیده، راه حل‌ها بسیار پیچیده

²⁹electrical rectifier³⁰Reversibility in mechanics

هستند، و معلوم شده آنچه با گذشت زمان اتفاق می‌افتد بسیار شگفت‌آور است.

اگر ما هر ترتیبی^{۳۱} را که می‌خواهیم برای ذرات یادداشت کرده و به اندازه کافی صبر کنیم خواهیم دید این ترتیب واقعاً رخ می‌دهد! اگر ما راه حل خود را برای مدت زمان کافی دنبال کنیم، گویی هر چیزی را که می‌تواند انجام دهد امتحان می‌کند. هر چند این در ساده‌ترین دستگاه‌ها^{۳۲} مطلقاً ضروری نیست، اما زمانی که سیستم‌ها، با اتم‌های بیشتر، به اندازه کافی پیچیده می‌شوند، اتفاق می‌افتد. اکنون چیزی دیگری هست که راه‌حل مذکور می‌تواند انجام دهد. اگر معادلات حرکت را حل کنیم، ممکن است توابع خاصی مانند $t^3 + t^2 + t$ بدست بیاوریم. ما ادعا می‌کنیم که جواب دیگر $t^3 - t^2 + t - t$ است. به عبارت دیگر، اگر $t - t$ را در کل جواب جایگزین t کنیم، دوباره جوابی برای همان معادله بدست می‌آوریم. این نتیجه‌ی این واقعیت است که اگر ما در معادله‌ی دیفرانسیل اصلی $t - t$ را جایگزین t کنیم، هیچ چیز تغییر نمی‌کند، زیرا فقط مشتقات دوم نسبت به t ظاهر می‌شوند. این بدین معنی است که اگر ما حرکت معینی داشته باشیم، حرکت دقیقاً معکوس نیز امکان پذیر است. در آشفتگی^{۳۳} کامل که اگر به اندازه‌ی کافی صبر کنیم پیش می‌آید، دستگاه گاهی به یک جهت می‌رود، و گاهی به جهت دیگر. هیچ چیز زیباتری در مورد یکی از حرکت‌ها نسبت به حرکت دیگر وجود ندارد. بنابراین اگر دستگاه به اندازه‌ی کافی پیچیده باشد، غیرممکن است ماشینی طراحی کرد که در بلندمدت، محتمل‌تر باشد در یک جهت در حرکت باشد تا جهت دیگر.

ممکن است مثالی زد که نادرست بودن این موضوع برای آن بدیهی باشد. برای مثال اگر ما چرخ را گرفته در فضای خالی بچرخانیم، برای همیشه در همان جهت خواهد رفت. بنابراین شرایطی وجود دارد، مانند پایداری تکانی زاویه‌ای، که استدلال بالا را نقض می‌کند. این فقط مستلزم اینست که با کمی دقت بیشتر استدلال کرده شود. شاید دیواره‌ها تکانی زاویه‌ای یا چیزی مانند آن را جذب کرده‌اند، به طوری که قوانین پایداری خاصی نداریم. پس اگر دستگاه به اندازه‌ی کافی پیچیده باشد، استدلال درست است. این بر اساس این واقعیت است که قوانین مکانیک برگشت پذیر هستند.

به خاطر تعلقات تاریخی، می‌خواهیم به دستگاه اختراع شده توسط ماکسول، کسی که اولین بار نظریه‌ی دینامیکی گازها را به نتیجه رساند توجه کنیم. او وضعیت زیر را تصور کرد^{۳۴} باشد که توسط فنری روی روزنه نگه داشته می‌شود. مولکول سریع داخل می‌شود، چون قادر است دریچه را بالا ببرد. مولکول کند داخل نمی‌شود، و

³¹arrangement

³²devices

³³confusion

³⁴آزمایش فکری معروف شیطانک ماکسول: دو جعبه حاوی گاز در دمای یکسان داریم، با روزنه‌ی^{۳۵} کوچکی بین آنها. یک شیطانک^{۳۶} در روزنه نشسته (که البته ممکن است یک ماشین باشد!). در روزنه دری هست که می‌تواند توسط شیطانک باز و بسته شود. شیطانک مولکول‌هایی را که از سمت چپ می‌آیند رصد می‌کند. او هر وقت مولکول سریع می‌بیند در را باز می‌کند و وقتی مولکول کند می‌بیند، در را بسته نگه می‌دارد. اگر بخواهیم شیطانک فوق العاده خاصی

باشد، می‌تواند چشمهایی در پشت سر داشته باشد، و برای مولکول‌های طرف دیگر معکوس آن را انجام دهد. پس شیطانک اجازه می‌دهد مولکول‌های کند به سمت چپ، و مولکول‌های سریع به راست بروند. خیلی زود سمت چپ سرد و سمت راست داغ خواهد شد. بنابراین، چون ما می‌توانیم چنین شیطانکی داشته باشیم ایده‌های ترمودینامیک نقض شده‌اند؟ معلوم می‌شود اگر ما شیطانکی با ابعاد محدود بسازیم، خود شیطانک آنقدر گرم می‌شود که بعد از مدتی نمی‌تواند خیلی خوب ببیند. ساده‌ترین شیطانک ممکن، به عنوان مثال، می‌تواند یک دریچه^{۳۷}

به عقب جهش می‌کند. اما این چیزی نیست جز همان چرخ ضامن‌دار به صورتی دیگر، و در نهایت این دستگاه^{۳۸} گرم خواهد شد. اگر فرض کنیم گرمای ویژه^{۳۹} این شیطانک نامحدود نیست، باید گرم شود. اما شیطانک مورد بحث تعداد محدودی چرخ و چرخ دنده‌ی^{۴۰} داخلی دارد، بنابراین نمی‌تواند از گرمای اضافی‌ای که از رصدکردن مولکول‌ها می‌گیرد رها شود. به‌زودی این دستگاه به‌علت حرکت براونی آنقدر زیاد تکان می‌خورد که نمی‌توان گفت در حال آمدن است یا رفتن، و خیلی کمتر از آن می‌توان گفت مولکول‌ها در حال آمدن هستند یا رفتن، بنابراین دستگاه کار نمی‌کند.

۴۰۴۶ برگشت‌ناپذیری^{۴۱}

آیا همه‌ی قوانین فیزیک برگشت‌پذیر هستند؟ ظاهراً نه! فقط سعی کنید یک تخم مرغ پخته‌شده را به حالت اولیه برگردانید! فیلمی را به عقب ببرید فقط چند دقیقه طول می‌کشد تا همه شروع به خندیدن کنند. طبیعی‌ترین مشخصه‌ی همه‌ی پدیده‌ها برگشت‌ناپذیری آشکار آن‌هاست.

برگشت‌ناپذیری از کجا ناشی می‌شود؟ برگشت‌ناپذیری از قوانین نیوتن ناشی نمی‌شود. اگر ادعا کنیم که رفتار همه چیز در نهایت باید برحسب قوانین فیزیک درک شود، و همچنین اگر معلوم شود که تمام معادلات این خاصیت فوق‌العاده را دارند که اگر $t = -t$ قرار دهیم جواب دیگری خواهیم داشت، بنابراین هر پدیده‌ای برگشت پذیر است. پس چطور در طبیعت این اتفاق می‌فتد که در مقیاس بزرگ چیزها برگشت‌پذیر نیستند؟ بدیهی است باید قانونی وجود داشته باشد، معادله‌ای مبهم اما بنیادی، شاید در الکتریسته، شاید در فیزیک نوترینو، که در آن مهم باشد که زمان به کدام جهت می‌رود.

اکنون بیایید پرسش قبلی را مورد بحث قرار دهیم. ما از قبل یکی از این قوانین را می‌دانیم، که می‌گوید آنتروپی^{۴۲} همیشه افزایش می‌یابد. اگر ما یک شیء گرم و یک شیء سرد داشته باشیم، گرما از شیء گرم به شیء سرد می‌رود. بنابراین قانون آنتروپی از قوانینی است که در آن جهت زمان مهم است. اما انتظار داریم قانون آنتروپی را از دیدگاه مکانیک درک کنیم. در واقع ما در بدست آوردن تمام نتایج این بحث موفق بوده‌ایم که تنها با استدلال‌های مکانیکی نتیجه بگیریم گرما نمی‌تواند خود به خود به عقب جریان یابد^{۴۳}، و در نتیجه درکی از قانون دوم را به دست آوریم. ظاهراً می‌توانیم برگشت‌ناپذیری را از معادلات برگشت‌پذیر بدست آوریم. اما این فقط یک استدلال مکانیکی بود که ما استفاده کردیم؟ بیایید دقیق‌تر به آن نگاه کنیم.

چون پرسش ما با آنتروپی ارتباط دارد، مسئله‌ی ما این است که سعی کنیم توصیف میکروسکوپی آنتروپی را پیدا کنیم. اگر می‌گوییم مقدار معینی انرژی در چیزی، مانند گاز، داریم، می‌توانیم تصویری میکروسکوپی از آن را بدست آوریم، و بگوییم که هر اتم انرژی معینی دارد. همه‌ی این انرژی‌ها به یکدیگر اضافه شده انرژی کل را به ما می‌دهند. به طور مشابه، شاید هر اتم آنتروپی معینی داشته باشد. اگر همه را با هم جمع کنیم، آنتروپی کل

³⁸mechanism³⁹specific heat⁴⁰gear⁴¹Irreversibility⁴²entropy⁴³یعنی از جسم سرد به جسم گرم برود

را خواهیم داشت. این روش چندان خوب جواب نمی دهد، اما ببینیم چه اتفاقی می افتد. به عنوان مثال، اختلاف آنتروپی بین گازی در دما و حجم معین، و گازی در همان دما و حجمی دیگر را محاسبه می کنیم. از فصل ۴۴ به یاد داریم که برای تغییر در آنتروپی داشتیم:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}.$$

در حالت کنونی، چون دما تغییر نمی کند انرژی قبل و بعد از انبساط یکسان است. بنابراین باید گرمای کافی اضافه کنیم تا، برای هر تغییر کوچک در حجم، با کار انجام شده توسط گاز برابر باشد، یعنی:

$$dQ = P dV.$$

با قرار دادن از این رابطه بجای dQ ، بدست می آوریم:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int_{V_1}^{V_2} P \frac{dV}{T} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{NkT}{V} \frac{dV}{T} \\ &= Nk \ln \frac{V_2}{V_1}, \end{aligned}$$

همانطور که در فصل ۴۴ بدست آوردیم. به عنوان مثال، اگر حجم را دو برابر کنیم، تغییر آنتروپی $Nk \ln 2$ است. اکنون مثال جالب دیگری را در نظر می گیریم. فرض کنید یک جعبه با مانعی در وسط آن داریم. در یک طرف نئون (مولکول های «سیاه»)، و در طرف دیگر آرگون (مولکول های «سفید») است. حالا مانع را بر می داریم، و اجازه می دهیم مخلوط شوند. آنتروپی چقدر تغییر کرده است؟ ممکن است تصور کنیم به جای مانع پیستونی داریم با حفره هایی در آن که اجازه می دهد مولکول های سفید عبور کرده مولکول های سیاه عبور نکنند، و نوع دیگری پیستون که بر عکس عمل می کند.

اگر پیستون را به هر انتهای جعبه حرکت دهیم، می بینیم که برای هر گاز، مسئله مشابه همان است که اکنون حل کردیم. بنابراین ما تغییر آنتروپی $Nk \ln 2$ داریم، که به معنی آن است که آنتروپی به اندازه $Nk \ln 2$ در هر مولکول افزایش می یابد. این ۲ به فضای اضافی ای که مولکول دارد مربوط می باشد، که نسبتاً عجیب است. این خاصیتی از خود مولکول نیست، بلکه خاصیتی از اینست که چقدر فضا باید توسط مولکول پیموده شود. این وضعیتی عجیب است که آنتروپی افزایش می یابد، اما همه چیز همان دما و همان انرژی را دارد! تنها چیزی که تغییر کرده است این است که مولکول ها به طور متفاوتی توزیع می شوند.

ما به خوبی می دانیم که اگر فقط مانع را بیرون ببریم، پس از مدت زمان طولانی، به علت برخوردها، نوسانات سریع، ضربه زدن، و غیره همه چیز مختل خواهد شد. گهگاه یک مولکول سفید به سوی مولکولی سیاه و یک مولکول سیاه به سمت مولکولی سفید رفته، و ممکن است عبور کنند. به تدریج مولکول های سفید اتفاقاً، خود را وارد فضای مولکول های سیاه می کنند، و مولکول های سیاه اتفاقاً، خود را وارد فضای مولکول های سفید می کنند.

اگر به اندازه‌ی کافی صبر کنیم به یک مخلوط می‌رسیم. واضح است که این یک فرایند برگشت‌ناپذیر در دنیای واقعی است، و باید شامل افزایش آنتروپی شود.

در اینجا ما مثالی ساده از یک فرایند برگشت‌ناپذیر داریم که کاملاً از رویدادهای برگشت پذیر ترکیب شده است. هر بار برخوردی بین دو مولکول باشد، آنها در جهات معینی از هم دور می‌شوند.

اگر فیلمی از برخورد از آخر به اول بگیریم، هیچ چیز اشتباهی در آن وجود ندارد. در واقع، یک نوع برخورد درست به همان اندازه‌ی دیگری محتمل است. بنابراین مخلوط شدن کاملاً برگشت پذیر، و در عین حال برگشت‌ناپذیر است.^{۴۴} همه می‌دانند که اگر با مولکول سفید و سیاه جدا از هم شروع کنیم، در چند دقیقه به مخلوط می‌رسیم. اگر بنشینیم و چندین دقیقه بیشتر به آن نگاه کنیم، دوباره جدا نشده، بلکه مخلوط می‌ماند. بنابراین ما برگشت‌ناپذیری‌ای داریم که مبتنی بر وضعیت‌های برگشت پذیر است. اما اکنون دلیل را نیز می‌بینیم. ما با ترتیبی^{۴۵} آغاز کردیم که، به یک معنی، منظم است و به علت آشفتگی^{۴۶} برخوردها، نامنظم می‌شود. همین تغییر ترتیب منظم به ترتیب نامنظم است که منشأ برگشت‌ناپذیری است.

درست است که اگر فیلمی از این بگیریم و به عقب برگردانیم، خواهیم دید که به تدریج منظم می‌شود. ممکن است کسی بگوید: «این مخالف قوانین فیزیک است!». بنابراین فیلم را چندین بار مرور کرده، و به هر برخورد نگاه خواهیم کرد. هر برخورد کامل خواهد بود و هر برخورد از قوانین فیزیک پیروی خواهد کرد. البته دلیل آن اینست که سرعت‌های مولکول‌ها دقیقاً مستقیم^{۴۷} است، پس اگر مسیرها همه به عقب برگردند، مولکول‌ها به شرایط اولیه خود بر می‌گردند. اما این شرایط بسیار نامحتملی است. اگر با گازی که ترتیب خاصی ندارد شروع کنیم، و فقط مولکول‌های سفید و سیاه باشند، هرگز برگشت نخواهد کرد.

۵.۴۶ نظم و آنتروپی^{۴۸}

بنابراین اکنون باید در مورد منظورمان از بی‌نظمی و نظم صحبت نماییم. پرسش از نظم خوشایند یا بی‌نظمی ناخوشایند نیست. آنچه در حالت مخلوط و غیرمخلوط متفاوت است، به شرح زیر است. فرض کنید فضا را به اجزاء کم حجم تقسیم کنیم. اگر مولکول‌های سفید و سیاه داشته باشیم، به چند طریق می‌توانیم آنها را در میان اجزاء حجم توزیع کنیم به طوری که سفید در یک طرف و سیاه در طرف دیگر باشد؟ از سوی دیگر، به چند طریق می‌توانیم آنها را بدون هیچ محدودیتی که به کدام راه می‌رود توزیع کنیم؟ واضح است که راه‌های بسیار بیشتری برای مرتب کردن آنها در مورد اخیر وجود دارد. ما «بی‌نظمی» را به وسیله‌ی تعداد راههایی که اشیاء داخل می‌تواند مرتب شود، به طوری که از بیرون یکسان به نظر برسد، اندازه‌گیری می‌کنیم. لگاریتم این تعداد راه‌ها آنتروپی است. هرچه تعداد راه‌ها در حالت جدا شده کمتر باشد، آنتروپی کمتر است، یا «بی‌نظمی» کمتر است. بنابراین با تعریف فنی بالا از بی‌نظمی، می‌توانیم گزاره‌ی زیر را درک کنیم. اول، آنتروپی بی‌نظمی را اندازه-

^{۴۴} یعنی کل فرایند

^{۴۷}right

^{۴۸}Order and entropy

^{۴۵}arrangement

^{۴۶}chaos

گیری می‌کند. دوم، جهان همیشه از «نظم» به «بی‌نظمی» می‌رود، بنابراین آنتروپی همیشه افزایش می‌یابد. نظم، به این معنی که ما ترتیب را دوست داریم نیست، بلکه به معنی اینست که تعداد ترتیب‌های مختلفی که می‌توانیم داشته باشیم که همچنان از بیرون یکسان دیده شوند، نسبتاً محدود است. در موردی که فیلم مخلوط شدن گازمان را برعکس کردیم، بی‌نظمی به اندازه‌ای که ما فکر می‌کردیم نبود. هر تک اتم دقیقاً تندی و جهت صحیح را داشت تا مستقیم بیرون بیاید! با این همه، آنتروپی بالا نبود، هرچند که اینطور به نظر می‌رسید.

در مورد برگشت‌پذیری سایر قوانین فیزیکی چطور؟ وقتی در مورد میدان الکتریکی که از بار شتاب‌دار ناشی می‌شود صحبت کردیم، گفتیم که باید میدان متأخر^{۴۹} را در نظر بگیریم. در زمان t و در فاصله r از بار، ما میدان ناشی از شتاب در زمان $t - \frac{r}{c}$ را در نظر می‌گیریم، و نه زمان $t + \frac{r}{c}$ را. پس در ابتدا به نظر می‌رسد، که گویا قانون الکتریسیته برگشت‌پذیر نیست. اما، بسیار عجیب است که قوانینی که ما استفاده می‌کنیم از مجموعه‌ای از معادلات که معادلات ماکسول نامیده می‌شوند ناشی می‌شوند که در واقع برگشت‌پذیرند. بعلاوه، ممکن است استدلال شود که اگر فقط از میدان پیشرفته^{۵۰} استفاده می‌کردیم، یعنی میدان ناشی از وضعیت رویدادها در $t + \frac{r}{c}$ ، و آن را مطلقاً بدون تناقض در یک فضای کاملاً محصور انجام دهیم، همه چیز درست همانطور که اگر از میدان متأخر استفاده می‌کردیم اتفاق می‌افتاد! پس این برگشت‌ناپذیری ظاهری در الکتریسیته، حداقل در یک محفظه^{۵۱} اصلاً برگشت‌ناپذیری نیست. ما از قبل احساسی در مورد آن داریم، زیرا می‌دانیم زمانی که یک بار نوسان‌کننده داریم که میدان‌هایی را تولید می‌کند که از دیواره‌های محفظه به عقب پرتاب می‌شوند در نهایت به تعادلی می‌رسیم که در آن یک جهت‌بودن^{۵۲} وجود ندارد. رویکرد میدان عقب‌مانده تنها یک ساده سازی در راه حل است.

تا آنجا که ما می‌دانیم، تمام قوانین بنیادی فیزیک، مانند معادلات نیوتن، برگشت‌پذیر هستند. پس برگشت‌ناپذیری از کجا ناشی می‌شود؟ برگشت‌ناپذیری از رفتن از نظم به بی‌نظمی ناشی می‌شود، اما ما این را درک نمی‌کنیم تا زمانی که مبدأ نظم را بدانیم. چرا شرایطی که هر روز خودمان پیدا می‌کنیم، همیشه خارج از تعادل هستند؟ یک توضیح احتمالی به شرح زیر است. دوباره به جعبه‌ی مولکول‌های سفید و سیاه مخلوط نگاه کنید. اکنون اگر به اندازه‌ی کافی صبر کنیم، ممکن است با یک تصادف^{۵۳} محض که احتمال آن بسیار کم، اما ممکن می‌باشد، توزیع مولکول‌ها در یک طرف بیشتر سفید و در طرف دیگر بیشتر سیاه شود. پس از آن، با گذشت زمان و ادامه تصادفات، آنها دوباره بیشتر مخلوط می‌شوند.

بنابراین یک توضیح احتمالی در مورد سطح بالای نظم در جهان امروزی این است که این فقط مسئله‌ای مربوط به شانس است. شاید اتفاقاً جهان ما در گذشته نوعی افت‌وخیز داشته است، که در آن چیزها تا حدودی جدا شده‌اند، و اکنون دوباره در حال بازگشت به یکدیگرند. این نوع نظریه نامتقارن^{۵۴} نیست، زیرا می‌توانیم بپرسیم که گاز جدا شده، در آینده‌ی نزدیک یا در گذشته‌ی نزدیک، چگونه به نظر می‌رسد؟ در هر مورد، ما لکه‌ای خاکستری در سطح میانی می‌بینیم، زیرا مولکول‌ها دوباره مخلوط می‌شوند. مهم نیست زمان را به چه صورتی سپری می‌کنیم، در هر حال گاز مخلوط می‌شود. بنابراین این نظریه می‌گوید که برگشت‌ناپذیری فقط یکی از

⁴⁹retarded field

⁵⁰advanced field

⁵¹enclosure

⁵²one-sidedness

⁵³accident

⁵⁴unsymmetrical

اتفاقات زندگی است.

اکنون می‌خواهیم بحث کنیم که این طور نیست. فرض کنید یکباره به کل جعبه نگاه نمی‌کنیم، بلکه فقط به بخشی از آن نگاه می‌کنیم. سپس فرض کنید در یک لحظه‌ی معین، مقدار معینی نظم را کشف می‌کنیم. در این بخش کوچک، مولکولهای سفید و سیاه جدا هستند. درباره‌ی شرایط در جاهایی که هنوز نگاه نکرده‌ایم، چه نتیجه‌گیری‌ای باید کنیم؟ اگر واقعاً اعتقاد داشته باشیم که نظم توسط یک افت‌وخیز از بی‌نظمی کامل به وجود آمده است، مطمئناً باید محتملترین افت‌وخیزی که می‌تواند آن را تولید کند را در نظر بگیریم، و محتملترین شرایطی نیست که بقیه‌ی آن نیز برآورده شود! بنابراین تمام پیش‌بینی‌های ناشی از فرضیه‌ی افت‌وخیز بودن جهان، این می‌شود که اگر به بخشی از جهان که قبلاً هرگز دیده نشده نگاه کنیم، آن را مخلوط خواهیم یافت و نه شبیه به بخشی که همان لحظه به آن نگاه کردیم. اگر نظم ناشی از افت‌وخیز بود، انتظار نظم را فقط در جایی که همان لحظه متوجه آن شده‌ایم داشتیم.

حالا فرض کنیم جداسدگی^{۵۵} به این علت بوده که گذشته‌ی جهان واقعاً منظم بوده است. این ناشی از افت-وخیز نیست، بلکه قبلاً همه چیز سفید و سیاه بوده است. این نظریه اکنون پیش‌بینی می‌کند که در مکان‌های دیگر نظم خواهد بود، این نظم به علت افت‌وخیز نیست، بلکه به دلیل منظم شدن بسیار بیشتر در ابتدای زمان است. پس انتظار داریم در جایی که هنوز نگاه نکرده ایم نظمی را بیابیم.

به عنوان مثال، ستاره‌شناسان فقط به برخی از ستاره‌ها نگاه کرده‌اند. آن‌ها هر روز تلسکوپ‌های خود را به طرف ستاره‌های دیگر می‌چرخانند، و ستارگان جدید در حال انجام همان کاری هستند که ستارگان دیگر انجام می‌دهند. بنابراین نتیجه می‌گیریم که جهان یک افت‌وخیز نیست، و نظم یادگار شرایطی است که همه چیز شروع می‌شود. این به این معنی نیست که ما منطق آن را درک می‌کنیم. به دلایلی، جهان در یک زمان آنتروپی بسیار پایینی برای محتوای انرژی داشته، و از آن زمان به بعد آنتروپی افزایش یافته است. بنابراین مسیر آینده همین است. این منشأ تمام برگشت‌ناپذیری و چیزی است که باعث فرایندهای رشد و تباهی^{۵۶} می‌شود. این چیزی است که باعث می‌شود ما گذشته را به یاد بیاوریم و نه آینده را، یعنی چیزهایی را به یاد داشته باشیم که به آن لحظه از تاریخ جهان که نظم بیشتر از زمان حال بوده نزدیک‌ترند، و اینکه چرا نمی‌توانیم چیزهایی را در وضعیتی که بی‌نظمی بیشتر از زمان حال است، و ما آن را آینده می‌نامیم، به یاد بیاوریم. بنابراین، همانطور که ما در یک فصل قبلی تعبیر کردیم، اگر ما به اندازه‌ی کافی از نزدیک نگاه کنیم، کل جهان در یک لیوان شراب است. در این مورد لیوان شراب پیچیده است، زیرا آب و شیشه و نور و هر چیز دیگری وجود دارد.

لذت دیگری از موضوع مورد بحث ما از فیزیک این است که حتی چیزهای ساده و ایده‌آل‌سازی شده، مانند چرخ ضامن‌دار، فقط به این دلیل کار می‌کنند که بخشی از جهان هستند. چرخ ضامن‌دار فقط در یک جهت کار می‌کند، زیرا با بقیه‌ی جهان نوعی ارتباط غایی^{۵۷} دارد.

اگر چرخ ضامن‌دار در جعبه بود و برای مدت زمان کافی منزوی^{۵۸} بود، چرخیدن چرخ به یک طرف محتمل‌تر از طرف دیگر نبود. اما چون ما سایه‌ها را می‌رانیم و اجازه می‌دهیم نور بیرون رود، و چون سرما را از زمین خارج

⁵⁵separation

⁵⁶decay

⁵⁷ultimate contact

⁵⁸isolated

کرده و از خورشید گرما می‌گیریم، چرخ ضامن داری که ما می‌سازیم در یک جهت می‌تواند بچرخد. این یک طرفه بودن جهت با این واقعیت که چرخ ضامن دار بخشی از جهان است ارتباط دارد. این چرخ ضامن دار بخشی از جهان است نه فقط به این معنی که از قوانین فیزیکی جهان پیروی می‌کند، بلکه رفتار یک جهته آن با رفتار یک جهته‌ی کل جهان وابسته است. این موضوع تا زمانی که رمز و راز آغاز تاریخ جهان بیش از پیش از گمانه زنی به درک علمی تبدیل شود، کاملاً قابل درک نیست.

Summary Entropy is a measure of "disorder".
 Universe goes from "order" to "disorder", Total entropy always increases.
 ("Order" and "Disorder" are not exactly what we ordinarily mean by order and disorder – but has a special technical sense;
 "disorder" is measured by no. of ways internal parts could be rearranged and still have thing appear externally the same. $S = k \ln(\text{no. of ways})$.)