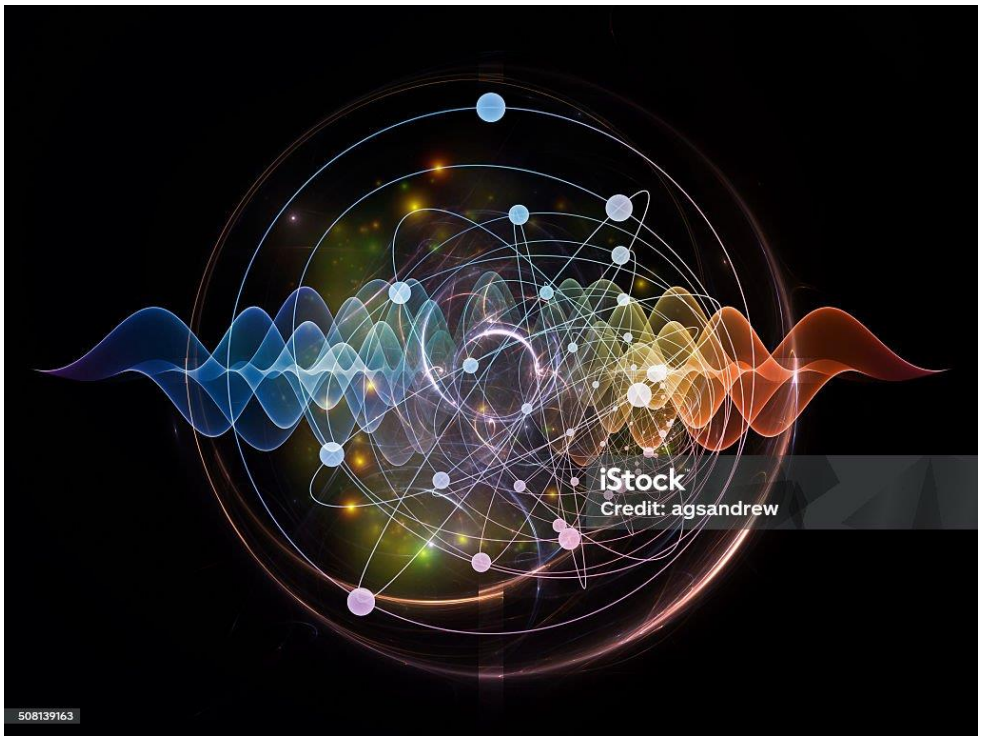
دکتر حسن بلوری

برلین، ۲۰۲۵/۰۲/۱۰

منشاءِ فرایندهای طبیعی

ترمودینامیکِ کوانتومی



The origin of natural processes
Quantum thermodynamics[1]

تجربیات روزمرهٔ ما نشان از برگشت‌ناپذیری پروسه‌های طبیعی و جهت‌دار بودن زمان دارد. آیا این امر بنیادی است؟ یعنی، آیا برگشت‌ناپذیری پروسه‌ها و نامتقارن بودن زمان در زیربنای کوانتومی، در ترمودینامیک کوانتومی، نیز صحت دارد؟

فشرده

یکی از قوانین یا اصول معروف دنیای طبیعی ـ ماکروسکپی حاصل از تجربه، قانون دوم علم ترمودینامیک و مکانیک آماری است. این قانون می‌گوید: آنتروپی (اتلاف انرژی) یک سیستمِ بسته‌ی ترمودینامیکی، با گذشتِ زمان تا رسیدن به بالاترین تراز، یعنی تا رسیدن سیستم به تعادل کامل، افزایش می‌یابد. با این حال، این قانونِ تجربیِ بسیار مهم و مورد استفاده در عرصه‌های گوناگونِ علوم طبیعی و فنی هیچ اثبات نظری ندارد.

در واقع، عبارتِ "... با گذشت زمان تا رسیدن به تعادل کامل ..." در قانون فوق معنایی جز این ندارد که فرایندهای طبیعی ترمودینامیکی در سیستم‌های بسته برگشت‌ناپذیر، یکسویه و در نتیجه دارای جهت زمان روشن و نامتقارن است.

در اینجا این پرسش مطرح است که آیا قانون دوم و همین‌طور دو قانون دیگر علم ترمودینامیک کلاسیک که اکنون بیش از یک قرن و نیم تاریخ دارند در نظریه کوانتومی نیز تایید می‌شوند و آیا استدلال نظری آنها در این نظریه وجود دارد؟

در این مقاله می‌خواهیم پس از توضیحات اولیه در پیشگفتار، به قوانین ترمودینامیک در نظریه کوانتومی به نام 'نظریه ترمودینامیک کوانتومی'، در حدِ آشنایی اولیه بپردازیم و به‌بینیم که آیا شرایط کوانتومی، مانند همدوسی[۲]، برهمنهی، انسجام و درهمتنیدگی، تغییراتی در بازگشت‌ناپذیری پروسه‌های طبیعی ترمودینامیکی و جهت زمان ایجاد می‌کنند یا خیر.

پیشگفتار

میدانِ اثر گرما در حوزه ماکروسکپی ـ کیهانی (کلاسیک) تا حدود زیادی شناخته شده است. اما در حوزه میکروسکپی (کوانتومی) چنین نمی‌باشد. از این‌رو در این مقاله برآنیم به مفهوم‌های ترمودینامیک کلاسیک، مانند گرما، کار، دما در نظریه کوانتوم که با نوسانات و اتفاقات اجتناب‌ناپذیر همراه است آشنا شویم.

نظریه گرما در حوزه کلاسیک، تقریبن در همه‌ی زمینه‌های علمی و فنی آن بسیار موفق است. با این وجود مبانی آن هنوز مورد بحث است. یک نمونه، قانون دوم ترمودینامیک به‌ویژه در رابطه با مسئله تقارن زمان و برگشت‌پذیری فرایندهاست.

تفاوت اصلی بین ترمودینامیک کلاسیک و ترمودینامیک کوانتومی به‌طور عمده در ابعاد و کاربردهای آنهاست. از دیدگاه ماکروسکپی، ترمودینامیک کلاسیک با پیش‌فرضِ ذرات به شکل نقطه‌ای، نظریه‌ای کامل محسوب می‌شود. در حالی‌که همین نظریه از دیدگاه کوانتومی یک نظریه ناکامل تلقی می‌شود.

ترمودینامیک کلایسک با قوانین و متغیرهای پیوسته و سیستم‌های پیچیده سر و کار دارد. متغیرها در اینجا فقط نوسانات جزئی حول میانگین را نشان می‌دهند. در صورتی‌که در ترمودینامیک کوانتومی سیستم‌هایی با حالت‌های ناپیوسته و ویژگی‌هایی مانند برهم‌نهی، انسجام، همدوسی و درهم‌تنیدگی‌های مکانیکی کوانتومی مطرح هستند. در این نوع سیستم‌ها نوسانات حول میانگین از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند. به این دلیل که زمان واهلش (relaxation time) کوتاه است و فعل و انفعالات کوچک می‌توانند اثرات بزرگی داشته باشند. (زمان واهلش در فیزیک به معنای زمان لازم برای برگشت دوباره یک سیستم مختل شده به حالت تعادل است.)

در ترمودینامیک کوانتومی برخلاف مکانیک آماری، تمرکز روی فرایندهای پویا خارج از حالت تعادل به‌عنوان منابع است. در این رابطه مهم است نشان داده شود که:

"با در نظر گرفتن منابع مجانبیِ ناچیز، برگشت‌پذیری در ناحیه‌ی حالت‌های خالص امکان‌پذیر (قابل بازیابی) است. ... از آنجاکه انسجام کوانتومی نسبت به نویز (nois) حساس است، لازمه‌ی برگشت‌پذیری از بین نرفتن انسجام کوانتومی در حین فرایندهای ترمودینامیکی می‌باشد."[۱]

نظریه ترمودینامیک کوانتومی توضیح می‌دهد که چگونه سیستم‌های کوانتومیِ باز تبادل انرژی می‌کنند، چگونه بر مفهوم‌های دما و کار تاثیر می‌گذارند و چگونه در طول زمان به تعادل ترمودینامیکی نزدیک می‌شوند. و بالاخره نشان می‌دهد که چگونه قوانین ترمودینامیکی کلاسیک شکل می‌گیرند. به این ترتیب، نظریه ترمودینامیک کوانتومی امکان فهم بهتر و عمیق‌ترِ طرزِ کارِ گیتی و فرایندهای طبیعی را امکان‌پذیر می‌کند. پرسشی که در این رابطه مطرح می‌باشد این است، چگونه می‌توان تعیین کرد که ذرات خاصیت ترمودینامیک کوانتومی دارند؟:

وقتی ذرات برخوردار از ویژگی‌های کوانتومی باشند، لازم است این ویژگی‌ها را هم در رفتار ترمودینامیکی خود نشان دهند. به‌صورت نظری نشان داده می‌شود[۳و۴] که دو ذره همدوس یا کوانتوم مکانیکی درهم‌تنیده با تابع موج مشترک در تماس با محیط گرم‌تر (یا سردتر) گرما را به‌طور قابل توجهی سریع‌تر از دو ذره‌ی کلاسیک هدایت می‌کنند.

تاریخچه

تاریخ علمِ ترمودینامیکِ کوانتومی در پیوند با کارهای ماکس پلانک و بروز مکانیک کوانتومی در سال ۱۹۰۰ شروع می‌شود. یعنی، زمانی که روشن شد، ترمودینامیک کلاسیک توان توضیح تابش الکترومغناطیسی را طبق یافته‌های تجربی ندارد. در سال ۱۹۰۵ آلبرت اینشتین ارتباط بین تابش الکترومغناطیسم و ترمودینامیک را نشان داد و نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی کوانتیزه هستند. این کشف بعدها تحت عنوان اثر فوتوالکتریک معروف شد.

ترمودینامیک کوانتومی با یاری نظریه مکانیک کوانتومی نشان می‌دهد که چگونه اصول و قوانین مکانیک کوانتومی سبب بروز قوانین ترمودینامیک می‌شوند و ماده به دلیل فعل و انفعالات کوانتومی چه ویژگی‌هایی می‌تواند داشته باشد. این نظریه همچنین امکان پاسخ به پرسش‌های باز در فرایندهای ترمودینامیکی طبیعی را مهیا می‌کند و نشان می‌دهد، چگونه سیستم‌های کوانتومی تبادل انرژی می‌کنند و در طول زمان به تعادل ترمودینامیکی نزدیک می‌شوند.

نکات ذکر شده روشن می‌کنند تا چه اندازه ترمودینامیک کوانتومی برای توصیف فرآیندهای طبیعی اساسی، مهم و ضروری است. بسیاری از پدیده‌های طبیعی را می‌توان از طریق اثر ترمودینامیک کوانتومی توضیح داد. یک نمونه آن، رفتار ذرات در دماهای بسیار بالا یا بسیار پائین است. یعنی، در بخش‌هایی از فیزیک که ترمودینامیک کلاسیک پاسخگو نیست. برای مثال، قانون سوم ترمودینامیک می‌گوید: آنتروپی یک بلورِ کامل در دمای صفرِ مطلق برابر با صفر است.

اما طبق مکانیک کوانتومی در نزدیکی دمای صفر مطلق پدیده‌هایی مانند انرژی نقطه صفر و نوسانات کوانتومی وجود دارند. به‌همین دلیل در بخش‌هایی از علوم از جمله در علم اطلاعات کوانتومی و زیست‌شناسی کوانتومی برای مطالعه ویژگی‌های آنها سعی در پائین آوردن دمای ذرات تا نزدیکِ دمای صفر مطلق است (بر اساس اصل خنک کننده لیزری).

کاربردها

پیش از پرداختین به اصل موضوع، یعنی نظریه ترمودینامیک کوانتومی، برای درک اهمیت آن لازم است در اینجا به کاربردهایی از این نظریه اشاره کنیم. اهمیت ترمودینامیک کوانتومی فقط محدود به پایه‌گذاری ترمودینامیک کلاسیک بر اساس مکانیک کوانتومی نمی‌شود. این نظریه از جمله دارای کاربردهای بسیار مهم در عرصه‌هایی مانند پردازش اطلاعات کوانتومی، رمزنگاری کوانتومی، رایانه‌های کوانتومی و ماشین‌های کوانتومی است.

سیستم‌های کوانتومی در مقیاس نانو، حالت‌هایی را از خود نشان می‌دهند که در فیزیک کلاسیک مشابهی ندارند. برای مثال در مورد ماشین‌های کوانتومی (نانو ماشین‌ها، موتورهای ملکولی) این پرسش مطرح است که آیا این نوع ماشین‌ها می‌توانند قدرتمندتر از ماشین‌های معمولی باشند.

در ضمن ترمودینامیک کوانتومی کاربردهایی فراوانی هم در تکنیک‌های جدید مانند چراغ‌های LED، تصویربرداری حرارتی و همچنین در توسعه علم مواد و تولید مواد جدید دارد.

ترمودینامیک کوانتومی

۱. مفهوم گرما و کار

گرما و کار دو کمیت مهم ترمودینامیک کلاسیک هستند. در این ترمودینامیک، مفهوم‌های آنتروپی و انرژی آزاد از دو کمیت گرما و کار بدست می‌آیند. آنتروپی، کار مفیدی را که می‌توان از یک سیستم کسب کرد محدود می‌کند.

از دید بنیادی دو مفهوم مهم ترمودینامیک کلاسیک مورد سوال هستند. لذا سعی می‌شود آنها را در نظریه کوانتومی بررسی و از نو تعریف کرد به‌نحوی که به‌صورت تجربی نیز قابل اندازه‌گیری باشند. تعریف جدید با یاری مفهوم آنتروپی عملی می‌باشد. توضیحات بیشتر در پائین.

در ترمودینامیک کلاسیک می‌توان مفهوم‌های گرما و کار را جدا ازهم درنظر گرفت. در حالی‌که در ترمودینامیک کوانتومی این کار از جمله به دلیل انسجام کوانتومی، توانایی برهم‌نهی ذرات کوانتومی، غیرممکن است. یعنی، این دو مفهوم در اینجا نه مجزا از هم بلکه باهم درآمیخته هستند.

۲. سیستم و محیط (قانون اول ترمودینامیک)

قانون اولِ ترمودینامیک بیان می‌کند: "تغییر انرژی داخلی یک سیتمِ بسته، برابر است با جمع تغییر گرما و تغییر کار."[۵]

در ترمودینامیک کوانتومی نیز می‌توان این قانون را در رابطه با مفهوم انرژی در نظر گرفت. قانون اول ترمودینامیک برای درک و توصیف ترمودینامیک کوانتومی ضروری است. این قانون در رابطه با مفهوم آنتروپی منجر به یک تعریف نو از مفهوم گرما و مفهوم کار می‌شود. سپس روشن می‌شود که چگونه ذرات کوانتومی با محیط اطراف خود تبادل انرژی می‌کنند. افزون بر این، انرژی در سیستم‌های کوانتومی می‌تواند به گونه‌ای تغییر کند که گرما و کار با هم مخلوط شوند.

برخلاف ترمودینامیک کلاسیک که در آن مفهوم‌های گرما و کار به وضوح از یکدیگر جدا هستند، هم‌آمیزی این دو مفهوم در دنیای کوانتومی جداسازی (تمایز) بین آنها را دشوار می‌کند.

۳. برگشت‌ناپذیری (قانون دوم ترمودینامیک)

قانون دوم ترمودینامیک می‌گوید: "آنتروپی فرایندهای طبیعی ترمودینامیکی در یک سیستمِ بسته همواره با گذشتِ زمان تا رسیدن سیستم به تعادل کامل افزایش می‌یابد."[۵]

به عبارت دیگر، تجربه نشان می‌دهد هیچ فرایند طبیعیِ ترمودینامیکی در سیستم‌های بسته وجود ندارد که با گذشت زمان با افزایش آنتروپی همراه نباشد. افزایش آنتروپی برابر است با افزایش اتلاف انرژی و سازگار با برگشت‌ناپذیری فرایندهای طبیعی. یعنی، یکسویه بودن فرایندها و جهت‌دار بودن زمان. در واقع قانون دوم ترمودینامیک برگشت‌پذیری فرایندهای طبیعی و متقارن بودن زمان را نفی می‌کند. با این استدلال که هر فرایند ترمودینامیکی طبیعی از تعداد بیشماری از ذرات

که حالت تک تک آنها شناخته شده نیست تشکیل شده است. در نتیجه آنچه به‌طور تجربی بدست می‌آید، میانگین حالت‌های ذرات، مستدل بر روش آماری است. به عبارت دیگر، قانون دوم ترمودینامیک به اصطلاح یک 'قانون اعداد بزرگ' است.

قانون دوم ترمودینامیک را می‌توان با یاری مفهوم آنتروپی، یعنی توسط تعداد امکاناتی که ذرات می‌توانند در یک سیستم بسته مرتب شوند، نیز بیان کرد. تجربه نشان می‌دهد که آنتروپی آن با گذشت زمان افزایش می‌یابد و در حالت تعادل ثابت می‌ماند.

جهت زمان با افزایش آنتروپی مرتبط انگاشته می‌شود بدون آن‌که دلیل اساسیِ نظری برایش ارائه شود. اغلب گفته می‌شود، این را تجربه نشان می‌دهد، یک بیان آماری است و یا بیان از یک احتمال دارد.

تغییر انرژی همراه با تغییر آنتروپی، گرما نامیده می‌شود. آنتروپی، مقدار انرژی‌ای است که در یک فرآیند به کار مکانیکی تبدیل می‌شود.

قانون دوم ترمودینامیک را می‌شد به‌طور دقیق و نه آماری ارائه داد اگر امکان کسب کلیه اطلاعات مربوط به حالت‌های تک تک ذرات وجود می‌داشت. اما این اطلاعات قابل دسترسی نیست. از این‌رو می‌باید در ترمودینامیک کلاسیک با مقادیر میانگین آماری کار کرد.

حال این سوال مطرح است که آیا قانون دوم ترمودینامیک در نظریه ترمودینامیک کوانتومی نیز معتبر است و اگر آری، آیا می‌توان آن را در این نظریه مستدل نمود؟

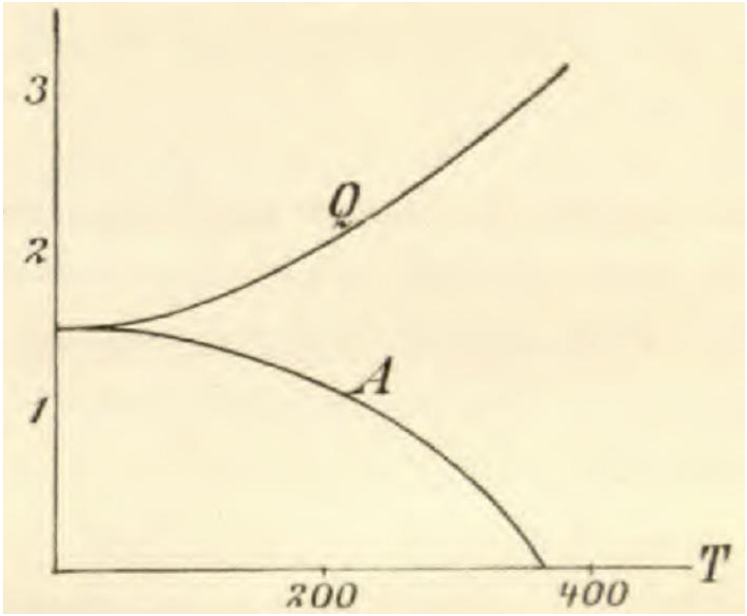
"با در نظر گرفتن منابع مجانبی ناچیز می‌توان برگشت‌پذیری را حداقل در گستره‌ی حالت‌های خالص بازیابی کرد. یک چنین خاصیت برگشت‌پذیری بسیار پسندیده (مطلوب) است. البته انسجام کوانتومی نسبت به نویز حساس است و برگشت‌پذیری تضمین می‌کند که این انسجام در طی فرایندهای ترمودینامیکی هدر نمی‌رود."[۱]

۴. اصل عدمِ دسترسی (قانون سوم ترمودینامیک)

قانون سوم ترمودینامیک می‌گوید: "با هیچ روشی، هراندازه هم ایده‌آل باشد، امکان ندارد دمای یک سیستم بسته‌ی ترمودینامیکی از طریق تعداد محدودی از فرایندها تا دمای صفر مطلق کاهش یابد."[۶]

یا "آنتروپی یک سیستم بسته‌ی ترمودینامیکی برای دمای $T \to 0$ به‌طرف یک ثابت، مستقل از پارامترهای ترمودینامیکی، می‌رود."[۷]

از آغاز قرن بیستم روشن شده است که: "برای محلول‌های جامد و بسیار غلیظ (سیستم‌های متراکم) در نزدیکی دمای صفر مطلق یک همگرایی کامل کمیت‌های کار و گرما وجود دارد (تصویر ۲)."[۷]



تصویر ۲: همگرایی کمیت‌های گرما و کار در مقطع دمای صفر مطلق[۷]

قانون سوم ترمودینامیک نیز همچون قانون اول و قانون دوم آن در ترمودینامیک کوانتومی موضوع پژوهش است. با بررسی مفهوم‌های گرما، کار و دما در حوزه کوانتوم با نوسانات و اتفاقات اجتناب‌ناپذیر نشان داده می‌شود که قوانین ترمودینامیک کلاسیک ریشه در نظریه ترمودینامیک کوانتومی دارند.

۵. نظریهٔ منابع ترمودینامیک کوانتومی

گفتیم، قانون دوم ترمودینامیک در دنیای ماکروسکپی قانونی شناخته شده و معتبر در مفهوم مکانیک آماری است. این قانون مبتنی است بر تعداد بسیار زیادی از ذرات و می‌تواند به‌عنوان کمیتِ تغییراتِ احتمالی حالت‌ها تعبیر شود. در مقابل یک نظریه ترمودینامیک با تعداد کمی از ذرات در تماس با یک منبع حرارتی به‌عنوان 'نظریهٔ منابع ترمودینامیک کوانتومی' شناخته می‌شود.

برای اثبات منابع کوانتومی، درهم‌تنیدگی و انسجام، اولیویرا و همکاران[۳] (Oliveira et. al.) رویکردی مبتنی بر تولید گرما ارائه می‌دهند. آنها تبادل حرارت بین یک سیستم کوانتومی و محیط حرارتی را با یاری یک حافظه کوانتومی (برای پردازش اطلاعات کوانتومی) تجزیه و تحلیل می‌کنند. و با بررسی محدودیت‌های اساسیِ انتقالِ حرارت در این زمینه متوجه می‌شوند که:

"حالت‌های کوانتومی می‌توانند نشانه‌های غیرکلاسیک خود را از طریق تبادل انرژی با یک محیط حرارتی آشکار کنند."[۳]

این رویکرد، یک جایگزین امیدوارکننده برای اندازه‌گیری‌های پیچیده و خاص سیستم ارائه می‌دهد، زیرا فقط بر اندازه‌گیری انرژی‌های ثابت متکی است.[۳]

در ترمودینامیک کوانتومی، قانون دوم در فرایندهای دوره‌ای یا شبه دوره‌ای شکل دیگری به خود می‌گیرد. دلیل این امر تغییرات حالت احتمالی است که بعکس مورد کلاسیک حاوی نه فقط یک بلکه یک رشته از محدویت‌هاست. در اینجا بعکس مکانیک آماری فرایندهای دینامیکی خارج از تعادل به‌عنوان منابع حائز اهمیت است. این امر تعریف جدید مفهوم گرما و مفهوم کار را برای ترمودینامیک کوانتومی ضروری می‌کند.

می‌دانیم که در ترمودینامیک کلاسیک مفهوم آنتروپی یک سیستم از طریق مفهوم‌های گرما و کار توصیف می‌شود. اما:

"در ترمودینامیک کوانتومی، بعکسِ ترمودینامیک کلاسیک، مفهوم‌های گرما و کار از طریق مفهوم آنتروپی تعریف می‌شوند. نشان داده شده است که انسجام کوانتومی این اجازه را نمی‌دهد، کل انرژی را که بین دو سیستم کوانتومی مبادله می‌شود فقط در شکل گرما باشد."[۸]

در پایان به این نکته اشاره کنم که انتقال حرارت بین دو مخزن از طریق یک ذره کوانتومی نیز مشاهده شده است."[۳]

پرسش و پاسخ

در گروه کارشناسان ارشد انجمن فیزیک آلمان ـ برلین

نوشته‌ی زیر ترجمه و عین پاسخ همکارم آقای جان هلم (Jahn Helm) در سخنرانی ایشان در تاریخ ۲۰۲۵،۰۱،۱۵ در دانشگاه آزاد برلین تحت عنوان '*مبانی ریاضی فیزیک و دانش فیزیکی*' به پرسشم با اشاره به سه منبع جدید علمی، است:

پرسش: آیا زمان می‌تواند در ترمودینامیک کوانتومی برگشت‌پذیر باشد؟

پاسخ: "در سخنرانی به نقل از یک اثر تازه منتشر شده نشان داده شد که زنجیره‌های یک بُعدیِ درهم‌تنیده از نوسانگرهای کوانتومی به‌طور خودبه‌خود تقارن زمانی را می‌شکنند. گرچه معادله دیراک مانند معادلات حرکت کلاسیک در زمان متقارن است. یعنی، مکانیک کوانتومی به‌طور خودکار پیکان زمان را ایجاد می‌کند (برخلاف مکانیک کلاسیک).

پاسخ من به پرسش مطرح شده این بود که قانون دوم ترمودینامیک در مورد ترمودینامیک کوانتومی نیز همچون در مورد ترمودینامیک کلاسیک صدق می‌کند. یعنی، تغییر آنتروپی همیشه غیرمنفی است و پیکان زمان همیشه وجود دارد.

من آن سه مقاله را ملاحظه کرده و دریافتم که در آنها به هیچ‌وجه ادعای بازگشت‌پذیری زمان در ترمودینامیک کوانتومی مطرح نیست.

دو مقاله اول از اولیویرا و همکاران و پاناسیوک و همکاران است که می‌شناسم. در آنها اظهاراتی در باره‌ی هدایت گرما

در سیستم‌های درهم‌تنیده کوانتومی شده است.

مقاله سوم مقاله‌ایست از جیلاد گُور در باره نقش انسجام کوانتومی در ترمودینامیک از نوامبر سال ۲۰۲۲. در آنجا نشان داده می‌شود که ماشین کوانتومی کارنو برای حالت‌های ۱- انرژی بازگشت‌پذیر است. یعنی، یا کار از طریق افزایش آنتروپی ایجاد می‌شود (مانند ماشین کلاسیک کارنو)، یا برعکس به‌عنوان یک پُمپ حرارتی کار می‌کند (که البته به روش کلاسیک نیز همین‌طور است). ماشین کوانتومی کارنو برای حالت‌های انرژی مخلوط غیرقابل برگشت است، برخلاف کلاسیک آن

البته این بحث تقارن زمانی نیست، زیرا ماشین کارنو از طریق افزایش آنتروپی ایجاد کار می‌کند. بنابر این لزومن تقارن زمانی را می‌شکند."

„Quanten-Thermodynamik und der Pfeil der Zeit

In dem Vortrag wurde, unter Berufung auf eine neuere Veröffentlichung gezeigt, dass verschränkte eindimensionale Ketten aus Quanten-Oszillatoren spontan die Zeit-Symmetrie brechen, obwohl die Dirac-Gleichung wie die klassischen Bewegungsgleichungen zeit-symmetrisch ist, d.h. die **QM erzeugt automatisch den Pfeil der Zeit** (im Gegensatz zur klassischen Mechanik).

Herr Bolouri hat die Frage gestellt, ob Quanten-Thermodynamik vielleicht doch zeit-reversibel sei, unter Berufung auf drei Quellen.

Meine Antwort darauf war, dass für die QM-Thermodynamik, genauso wie für die klassische Thermodynamik, der zweite Hauptsatz gilt, d.h. die Entropieänderung immer nicht-negativ ist, und der Pfeil der Zeit ist immer da.

Ich habe mir die drei Artikel angesehen, und festgestellt, dass darin keineswegs die Zeit-Reversibilität der QM-Thermodynamik behauptet wird.

Die zwei ersten sind Artikel von Oliveira et al., und von Panasyuk et al., die ich schon kenne, es werden dabei Aussagen über Wärmeleitung von verschränkten QM-Systemen gemacht.

Der dritte ist ein Paper von Gilad Gour Role of Quantum Coherence in Thermodynamics von 11/2022.

Darin wird gezeigt, dass die **QM-Carnot-Maschine für 1-Energie-Zustände reversibel** ist, d.h. entweder Arbeit aus Entropie-Zunahme erzeugt (wie die klassische Carnot-Maschine), oder umgekehrt als Wärmepumpe arbeitet (was klassisch natürlich auch geht). Für **gemischte Energie-Zustände ist die QM-Carnot-Maschine nicht-reversibel**, im Gegensatz zur klassischen.

Es handelt sich dabei natürlich **nicht um eine Zeit-Symmetrie**, weil die Carnot-Maschine Arbeit verrichtet mittels Entropie-Zunahme, also notwendigerweise die Zeitsymmetrie bricht.“

مراجع

1. https://www.istockphoto.com/de/foto/atom-gm508139163- 45391744?searchscope=image%2Cfilm

2. Hassan Bolouri, The Concept of Coherence and Decoherence

۲. حسن بلوری، ’مفهوم همدوسی و ناهمدوسی‘، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه دتسامبر سال ۲۰۲۰

3. https://arxiv.org/pdf/2408.06418v1

4. https://arxiv.org/pdf/1208.1438

5. Richard Becker, Theorie der Wärme Springer-Verlag Berlin, 1964, S.5 , S. 14; Theory of Heat 1967

6. Landsberg, P. T. (1956-10-01). "Foundations of Thermodynamics". Reviews of Modern Physics. **28** (4): 363–392

7. W. Nernst: „Über die Berechnung chemischer Gleichgewichte aus thermischen Messungen“, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse, 23. Dez. 1905

8. https://arxiv.org/pdf/1912.01983