فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰
صفحات ۱۰-۱۷
ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

مطالعه ترمودینامیک سیستم‌های کوانتومی

فرهاد کشاورزیان
کارشناسی ارشد فیزیک، دبیر فیزیک، آموزش و پرورش، شهرستان فسا، ایران
farhad.keshavarzi.1393@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: مکانیک کوانتومی رفتار فیزیکی سیستم های واقعی و تعاملات آنها در مقیاس اتمی و زیراتمی را توضیح می دهد. ترمودینامیک نیز شاخه ی دیگری از فیزیک است که ارتباط گرما و دما را با انرژی و کار توضیح می دهد. ترمودینامیک به خاطر فرایند افزایش بازده دستگاه های ترمودینامیکی کشف شد. با ترکیب ترمودینامیک و مکانیک کوانتومی می-توان به ایجاد ترمودینامیک کوانتومی رسید، که در این مقاله به مطالعه آن خواهیم پرداخت.

روش تحقیق: این مقاله به صورت مروری و با بررسی منابع کتابخانه‌ای و مقاله‌ها و پایان‌های انجام‌شده در این زمینه نگارش شده‌است.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری: اگرچه علم ترمودینامیک، نسبت به نظریه کوانتومی، قدمت زیادی داشته و با دیدی ماکروسکوپی به دنیا می نگرد، اما تلفیق این دو علم، ترکیب طلایی به نام ترمودینامیک کوانتومی را می سازد. در سال های اخیر، انقلابی در مفاهیم ترمودینامیک پدید آمده، که از آن به عنوان یک کودک نوپا در میان نظریه های فیزیکی یاد می کنند. در این نظریه، گسترش اطلاعات از طریق سیستم های کوانتومی توصیف می شود.

کلیدواژه: ترمودینامیک کوانتومی، کار، گرما، آنتروپی

مقدمه

ترمودینامیک شاخه ای از علم فیزیک است که با گرما و ارتباط آن با کار و انرژی، سروکار دارد. رفتار این مقادیر به وسیله چهار قانون ترمودینامیک، صرف نظر از ترکیب با خواص ماده یا سیستم مورد نظر، کنترل می شود. قوانین ترمودینامیک به واسطه مولفه های میکروسکوپی توسط مکانیک آماری توضیح داده شده است. سعدی کارنو با کار بر روی قوانین حاکم بر موتورهای بخار و در نتیجه افزایش بهره وری آنها و لردکلوین با فرموله کردن تعریفی مختصر از ترمودینامیک، از بنیانگذاران این علم محسوب می شوند (۱). سپس ترمودینامیک با به کارگیری قوانین فیزیک کلاسیک، برای حالات ماکروسکوپیک توسط دانشمندانی چون ویلیام تامسون، رادولف کلاسیوز، جیمز کلارک مکسول، لودویگ بولتزمن"، ویلارد گیبس، گوستاو تسویشر، جونز در والس فرمولبندی شد تا اینکه با ظهور مکانیک کوانتومی، مکانیک آماری برای توصیف قوانین با پدیده های میکروسکوپیک پدید آمد.

پس از آن ترمودینامیک به عرصه هندسی برای توصیف پدیده های خود روی آورد و از این رو به ترمودینامیک هندسی شهرت یافت."جورج راپینیر برای اولین بار فرمولبندی منسجمی برای این رهیافت نوین از ترمودینامیک ارائه نمود"

اگرچه علم ترمودینامیک، نسبت به نظریه کوانتومی، قدمت زیادی داشته و با دیدی ماکروسکوپی به دنیا می نگرد، اما تلفیق این دو علم، ترکیب طلایی به نام ترمودینامیک کوانتومی را می سازد. در سال های اخیر، انقلابی در مفاهیم ترمودینامیک پدید آمده، که از آن به عنوان یک کودک نوپا در میان نظریه های فیزیکی یاد می کنند. در این نظریه، گسترش اطلاعات از طریق سیستم های کوانتومی توصیف می شود. محققان از سال ۲۰۱۲ در تلاشند قوانینی در مورد انتقالات کوانتومی در ماشین های کوانتومی ارائه دهند تا بتوان روزی از آنها برای سرد کردن کامپیوترها، استفاده در پنل های خورشیدی، بیو مهندسی و سایر کاربردها استفاده نمود. این نظریه جدید، سعی در بیان مفاهیم ترمودینامیکی با استفاده از نظریه اطلاعات کوانتومی دارد. اگرچه نظریه ترمودینامیک کلاسیک در ابتدا سعی در بهبود کارایی موتورهای بخار داشت اما ترمودینامیک امروزی برای گسترش ماشینهای کوانتومی، تلاش می کند (۲) ترمودینامیک کوانتومی یکی از نوین ترین رشته های علم امروز محسوب می شود و سعی بر آن دارد دانش کوانتوم را با علوم حرارت آشتی دهد. این علم امروزه پیوسته در حال گسترش است. بسیاری از فیزیکدانان امیدوارند بتوانند با بازسازی علم ترمودینامیک بر اساس قوانین مکانیک کوانتومی به شک و تردیدها و جنجال های دیرینه در این خصوص خاتمه دهند.

میزان تاثیر موتورهای بخار در تبدیل گرما به کار برای نخستین بار در سال ۱۸۲۴ و در فرآیند به حرکت درآوردن پیستون و توانایی چرخش یک چرخ، توسط مهندس جوان فرانسوی، سعدی کارنو بیان شد. فرمولی که امروزه از آن تحت عنوان بازده فرآیند یاد می‌کنند. بر اساس مطالعات کارنو، بالاترین بهره‌وری یک موتور، تنها به اختلاف دمای میان منبع موتور حرارتی (معمولا آتش) و منبع مصرف کننده دما (معمولا هوای بیرون) وابسته است. او همچنین بیان کرد که کار، محصول جانبی (Byproduct) گرماست که به شکل طبیعی از جسم گرم‌تر به جسم سردتر منتقل می‌شود. کارنو هشت سال پس از ارائه این فرمول بر اثر بیماری وبا درگذشت و نتوانست انقلابی که توسط این فرمول به نام نظریه ترمودینامیک ایجاد شد را مشاهده کند. قوانین ترمودینامیک مجموعه ای از قوانین جهانی هستند که فعل و انفعال بین دما، گرما، کار، انرژی و انتروپی را توضیح می‌دهند. قوانین ترمودینامیک نه تنها در مورد موتورهای بخار دارای اعتبار است، بلکه در مورد هر مسئله دیگری از جمله خورشید، سیاه چاله‌ها، موجودات زنده و حتی کل جهان نیز صدق می‌کنند. این نظریه در عین سادگی، بسیار جامع است، طوری که آلبرت اینشتین از آن به عنوان نظریه‌ای که هیچگاه منسوخ نمی‌شود، یاد کرد.

بر خلاف مدل‌های استاندارد فیزیک ذرات که سعی در اثبات وجود اجسام دارند، قوانین ترمودینامیکی تنها برای بیان توانایی انجام یا عدم انجام یک فرآیند، کاربرد دارند. یکی از عجیب ترین نکات در مورد ترمودینامیک، این است که ذهنی به نظر می‌رسد. گازی متشکل از مجموعه ذراتی دارای دمای یکسان (بنابراین قادر به انجام کار نیستند)، ممکن است با بررسی‌های بیشتر، دارای تفاوت دمای میکروسکوپی باشد که با قوانین ترمودینامیکی تطابق ندارد. همانطور که فیزیکدان قرن نوزدهم ماکس پلانک بیان کرد:

اتلاف انرژی، بستگی به میزان دانش ما دارد.

در سال‌های اخیر، انقلابی در مفاهیم ترمودینامیک پدید آمده که از آن به عنوان یک کودک نو پا در میان نظریه‌های فیزیکی یاد می‌کنند. در این نظریه، گسترش اطلاعات از طریق سیستم‌های کوانتومی توصیف می‌شود. این نظریه جدید، سعی در بیان مفاهیم ترمودینامیکی با استفاده از نظریه اطلاعات کوانتومی دارد. اگرچه نظریه ترمودینامیک کلاسیک در ابتدا سعی در بهبود کارایی موتورهای بخار داشت، ترمودینامیک امروزی برای گسترش ماشین‌های کوانتومی، تلاش می‌کند. گروهی از محققان، اخیرا آزمایشی انجام دادند که در آن برای اولین بار، با استفاده از تکنولوژی کوچک‌سازی، (یک موتور تک یونی و سه اتم منجمد) موفق به گسترش ترمودینامیک به قلمروی کوانتومی شدند، جایی که در آن مفاهیمی مانند دما و کار، معانی معمول خود را از دست داده و قوانین کلاسیک لزوما صدق نمی‌کنند. نتایج این آزمایش منجر به ارائه نسخه کوانتومی جدیدی از قانون اولیه ترمودینامیک شد. بازنویسی اساسی این نظریه باعث شد دانشمندان، ارتباط عمیق و شگفت‌انگیزی بین انرژی و اطلاعات پیدا کنند. ترمودینامیک کوانتومی ، نظریه‌ای در حال توسعه، همراه با شور و سردرگمی است.

ماکسول برای نخستین بار در سال ۱۸۹۹، تناقض بین ترمودینامیک و اطلاعات را بیان کرد. تناقض ایجاد شده در ارتباط با قانون دوم ترمودینامیک بود که بیان می‌کند انتروپی یک سیستم منزوی همواره در حال افزایش است. بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، کیفیت انرژی در اثر انتقال از یک جسم گرم به جسم سرد تا زمانی که اختلاف دمای بین دو جسم از بین برود، کاهش یافته، بطوری که انرژی بی نظم‌تر و کم اثرتر شده و جهان به سمتی حرکت می‌کند که دیگر قادر به انجام کاری نخواهد بود که از آن به عنوان دمای مرگ یاد می‌کنند. از دیدگاه بولتزمن، انتروپی با پراکندگی انرژی، افزایش می‌یابد. از دیدگاه آماری می‌توان گفت: راه‌های متعددی برای توزیع انرژی میان ذرات یک سیستم وجود دارد، بنابراین ذرات دائما در حال حرکت و برهمکنش با یکدیگر هستند و به‌طور طبیعی به سمتی حرکت می‌کنند که انرژی به اشتراک گذاشته شده، افزایش یابد، اما ماکسول از یک آزمایش ذهنی به نام شیطان ماکسول (Maxwell's demon) سخن گفت. در این آزمایش، دو محفظه توسط مانعی که دارای یک درب است از یکدیگر جدا شده‌اند. نگهبان این درب، یک شیطانک است که از موقعیت و سرعت تمام مولکولهای گازی موجود در محفظه نگهدارنده، آگاه است. شیطانک به مولکول‌های با سرعت بالا اجازه ورود به محفظه B را می‌دهد، در صورتی مولکول‌های با سرعت پایین، فقط اجازه ورود به محفظه A را دارند. این عملکرد شیطانک باعث تقسیم گاز موجود به دو دسته‌ی سرد و گرم و در نتیجه تمرکز انرژی در یک نقطه و کاهش انتروپی سیستم می‌گردد (تصویر زیر). در نتیجه به نظر می‌رسد قانون دوم ترمودینامیک نقض می‌شود، قانونی که بعدها توسط آرتور ادینگتون، ممتازترین قانون طبعیت لقب گرفت (۳).

این تناقض میان ترمودینامیک و اطلاعات، یک قرن پس از ماکسول، توسط بنت و گروهی از محققان برطرف شد. به اعتقاد او و همکارانش، اگرچه شیطانک، مولکول‌های گاز درون محفظه را به دو دسته‌ی گرم و سرد تقسیم کرده و باعث کاهش انتروپی سیستم می‌شود، اما با این کار، انرژی، توسط شیطان مصرف شده و انتروپی از دست رفته سیستم، جبران می‌شود. در نتیجه انتروپی کل ذره-گاز افزایش می‌یابد که با قانون دوم ترمودینامیک، سازگار است. این یافته‌ها تاییدی بر این باور است که «اطلاعات، فیزیکی هستند». هر چه میزان اطلاعات بیشتر باشد، میزان کار انجام شده نیز بیشتر خواهد بود. شیطان ماکسول می‌تواند کار را از یک گاز با درجه حرارت مشخص برباید، زیرا اطلاعات به مراتب بیشتری نسبت به سایر ذرات دارد. بنت استدلال کرد که دانش شیطانک در حافظه‌اش، ذخیره گردیده و این حافظه باید پاک شود که برای این کار، نیاز به صرف انرژی است (لانداور در سال ۱۹۶۱ محاسبه کرد که در دمای اتاق، هر کامپیوتر حداقل به ۲,۹ زپتوژول انرژی برای پاک کردن یک بیت از اطلاعات ذخیره شده، نیاز دارد). ماکسول و سایر دانشمندان تعجب کردند که چطور یک قانون طبیعی می‌تواند به دانش یک فرد در مورد سیستم (اینجا سرعت و مکان ذرات) بستگی داشته باشد. اگر قانون دوم ترمودینامیک ذاتا به اطلاعات فرد بستگی دارد، پس در چه صورت، درست است؟ نیم قرن بعد، با گسترش نظریه‌ی اطلاعات کوانتومی بر پایه‌ی کامپیوترهای کوانتومی، دریچه‌ی جدیدی به روی فیزیکدانان گشوده شد. گروهی از محققان معتقدند که انرژی به دلیل راه‌های انتقال اطلاعات بین اجسام، به جسم سردتر منتقل می‌شود. بر اساس نظریه کوانتومی، ویژگی‌های فیزیکی اجسام، احتمالی هستند. در

واقع ذرات به جای اینکه مقادیر ۱ و یا ۰ را داشته باشند، می‌توانند در یک زمان، بنابر برخی احتمالات، هم مقادیر ۱ و هم مقادیر ۰ را داشته باشند) یعنی همان برهم نهی کوانتومی که در آن، احتمالات S1 و S0 نشان دهنده حالت ذرات است .(در واقع زمانی که ذرات با یکدیگر واکنش می‌دهند، امکان به دام افتادن آن‌ها نیز وجود دارد، در نتیجه توزیع احتمال جدیدی برای این حالت از ماده به وجود می‌آید که بیانگر حالت هر دو ماده می‌باشد. یکی از محورهای اصلی نظریه کوانتوم این است که اطلاعات هرگز از بین نمی‌رود (وضعیت کنونی جهان، تمام اطلاعات در مورد گذشته را حفظ می‌کند)، اما با گذشت زمان و برهمکنش ذرات و تبدیل شدن به ذرات بزرگتر، اطلاعات در مورد حالت منفرد آن‌ها پخش گردیده و با اطلاعات سایر ذرات، مخلوط شده است. در نهایت، این اطلاعات میان ذرات دیگر به اشتراک گذاشته شده است. گروهی از دانشمندان معتقدند، افزایش بردار درهم‌تنیدگی کوانتومی، موجب افزایش قابل انتظار انتروپی و در نتیجه بردار زمانی ترمودینامیک شده است. آن‌ها علت سرد شدن یک فنجان قهوه تا دمای اتاق را به دلیل برهمکنش مولکول‌های قهوه با مولکول‌های هوا می‌دانند که باعث می‌شود اطلاعات میان آن‌ها از حالت کدگذاری خارج شده و با مولکول‌های هوا به اشتراک گذاشته شوند (۴).

درک انتروپی به عنوان یک موضوع انتزاعی اجازه می‌دهد جهان به عنوان یک کل، بدون از دست دادن اطلاعات به تکامل برسد. تجربه افزایش انتروپی همراه با رقیق شدن اطلاعات کوانتومی حتی چیزهایی مانند قهوه، موتور و مردم، به عنوان بخشی از جهان، باعث می‌شود انتروپی بخشی از جهان برای همیشه صفر باقی بماند. گروهی از دانشمندان در دانشگاه زوریخ تعریفی جدید و جنجالی از انتروپی ارائه داده‌اند:

تا به‌حال انتروپی به عنوان ویژگی یک سیستم ترمودینامیکی تعریف می‌شد، اما در حال حاضر در نظریه اطلاعات، نباید بگوییم انتروپی، ویژگی یک سیستم است، بلکه انتروپی به عنوان ویژگی یک سیستم که توسط ناظر مشاهده می‌شود، تعریف می‌گردد!

موتورهای گرمایی کوانتومی (یک نوع از ماشین های گرمایی کوانتومی) کار را با استفاده از ماده ی کوانتومی به عنوان مادهی کارشان ارائه می دهند. موتورهای گرمایی کوانتومی نمونه های خوبی جهت مطالعه ی رابطه ی میان ترمودینامیک و مکانیک کوانتومی می باشند. ضمنا آنها می توانند تفاوت میان سیستم های ترمودینامیکی کلاسیکی و کوانتومی را مشخص کنند و از این رو، به ما کمک می کنند تفاوت میان فرآیندهای ترمودینامیکی کلاسیکی و کوانتومی را بهتر درک کنیم. موتور گرمایی کارتوی کلاسیکی ماشین مشهوری می باشد که کار را در چرخه های کلاسیکی انجام میدهد. جزئیات ترمودینامیکی چهار حرکت در چرخه ساده هستند و مکانیسم فیزیک عمومی موتورهای گرمایی را نشان میدهند در حال حاضر مطالعه درباره ی موتورهای گرمایی کوانتومی (OHEs) بیشتر بر روی مانسته ی کوانتومی موتور کارنوی کلاسیکی تمرکز دارد یعنی موتورهای کار نوی کوانتومی .(QCEs) هر چرخه ی موتورهای گرمایی کوانتومی متشکل از چندین فرآیند ترمودینامیکی پایه ای، از قبیل فرآیندهای بی در روی کوانتومی، فرآیندهای همدمای کوانتومی و فرآیندهای هم حجم کوانتومی می باشد (۵).

فرض می کنیم تمامی فرآیندهای چرخه های ترمودینامیکی ما بینهایت آهسته یا تدریجی هستند، یعنی بازه ی زمانی هر فرآیند خیلی طولانی فرض شده است این موضوع لازمه ی فرآیندهای شبه ایستا می‌باشد.

ترمودینامیک از دیدگاه تقارن

رابطه بین اطلاعات، انرژی و دیگر کمیت‌های مشخص (که می‌توانند تغییراتی در قوانین ترمودینامیکی ایجاد نمایند، اما هرگز نابود نشوند)، موضوع پژوهشی است که توسط دو گروه مجزا از دانشمندان همزمان در مجله علمی Nature منتشر شده است. هر دو گروه، سیستم کوانتومی فرضی را تصور نمودند که از اطلاعات به عنوان یک نوع منبع تبادل برای ارتباط بین دیگر مواد استفاده می‌نماید. مخزن بزرگی از ذرات را در نظر بگیرید که همزمان دارای انرژی و اندازه حرکت زاویه‌ای (حرکت چرخشی و اسپین) هستند. این مخزن برای تحمل میزان انرژی، دارای وزن بوده و برای کنترل سرعت (افزایش یا کاهش) نیز یک صفحه مدور دارد. با توجه به کشف کارنو در مورد نیاز به منبع سرما و گرما برای انجام کار، یک مخزن تنها، قادر به انجام کاری نیست، اما دانشمندان متوجه شدند یک سیستم دارای چندین کمیت مشخص، از قوانین متفاوتی پیروی می‌کند (۶).

در یک سیستم پیشنهادی که دارای مولفه‌ی وزن و قابلیت چرخش است، افزایش وزن منجر به کاهش سرعت چرخش (اسپین) ذرات می‌شود و یا بالعکس کاهش وزن منجر به افزایش سرعت ذرات خواهد شد. محققان دریافتند اطلاعات کوانتومی

توصیف کننده ذرات (مانند انرژی و اسپین) می‌تواند به عنوان کلید مبادله کننده انرژی و اندازه حرکت زاویه‌ای برای ذرات موجود در مخزن عمل کنند. این مفهوم که مقادیر ذخیره شده‌ی سیستم‌های کوانتومی می‌توانند با یکدیگر مبادله شوند، کاملا جدید است. از این رو نیاز به یک نظریه ترمودینامیکی کامل‌تر که نه تنها جریان انرژی را توصیف کند، بلکه اثر متقابل تمام مقادیر محافظت شده در جهان را نشان دهد، ضروری به نظر می‌آید. به گفته یکی از محققان، این واقعیت که انرژی تا به حال بر ترمودینامیک غالب شده، ممکن است در شرایطی درست باشد. دانشمندان پیرو نظریه کارنو، در صدد گسترش یک نظریه ترمودینامیکی که سازگار با شارش اندازه حرکتی زاویه‌ای با نظریه‌ی موتور بخار باشد، خواهند بود (۷).

گروهی دیگر از محققان در تلاشند با استفاده از روش‌های خاص، مکانیک کوانتومی کلاسیک را به حاشیه ببرند تا بتوانند با استفاده از قوانین و یافته‌های جدید، دیدگاه جدیدی که قادر به پاسخگویی به مسائل مکانیک کوانتومی باشد را گسترش دهند. بلوری کردن ذرات یکی از این روش‌هاست. بر اساس یافته‌های جدید، تقارن در طبیعت ممکن است باعث تمایز بین اطلاعات و سایر مقادیر حفظ شده گردد.

هیچ راهی برای یافتن تک رشته‌ای خالص و بدون جهت برای یافتن کهکشان‌ها وجود ندارد، زیرا طبیعت (به عنوان یک چهارچوب مرجع) چنین شرایطی را فراهم نمی‌کند. اگر چنین اتفاقی رخ دهد، مثلا اگر فلش‌های کوچک در تمام نقاط جهان به هم چسبیده شده و جهت حرکت آن را نشان دهند، در واقع تقارن چرخشی، بخشی از تقارن جهان را نقض کرده است. زمانی که ذرات دارای حرکت چرخشی، با حرکت جهان هماهنگ شوند، می‌توانند سریعتر بچرخند و در این صورت اندازه حرکت زاویه‌ای حفظ نخواهد شد. دانشمندان در اوایل قرن ۲۰ نشان دادند هر تقارن، همراه با یک قانون حفاظتی همراه است: تقارن چرخشی جهان همواره به گونه‌ای خواهد بود که منجر به حفظ کمیتی گردد که ما آن را حرکت زاویه‌ای می‌نامیم. به عقیده دانشمندان علت عدم امکان بیان جهت فضایی برای اطلاعات می‌تواند به دلیل همین قانون حفاظتی باشد (۸).

ظاهرا ناتوانی برای بیان همه چیز در مورد جهان از دیدگاه اطلاعات می‌تواند مربوط به جستجو برای توصیف یکی از مفاهیم بنیادی طبیعت باشد. در سال های اخیر، بسیاری از نظریه پردازان معتقدند که فضا-زمان، ساختار خمشی جهان، ماده و انرژی درون آن ممکن است هولوگرامی از یک شبکه اطلاعات کوانتومی درهم تنیده باشند. در عین حال به گفته دانشمندان باید به این نکته توجه کرد که اطلاعات رفتاری متفاوت از سایر خواص فیزیکی مانند فضا و زمان دارند. از طرفی اطلاع از پیوندهای منطقی بین مفاهیم می‌تواند به فیزیکدانان کمک کند پاسخ علمی در مورد مسائلی مانند سیاهچاله ها، بلعیده شدن اجرام کیهانی در فضا-زمان (با توجه به اطلاعات کافی در مورد دما و انتروپی آنها) و چگونگی انتشار اطلاعات توسط آنها بیابند (۹).

تکنولوژی و ترمودینامیک کوانتومی

به گفته‌ی یکی از صاحب نظران نظریه اطلاعات کوانتومی، هرچه ابعاد مورد مطالعه ما کوچک و کوچکتر می‌شود، وارد دنیایی می‌شویم که هیچ نظریه مناسبی در مورد آن نداریم! سوالی که اینجا پیش می‌آید این است که ما به چه چیزی برای توضیح این نواحی نیاز داریم؟ محققان از سال ۲۰۱۲ در تلاشند قوانینی در مورد انتقالات کوانتومی در ماشین‌های کوانتومی ارائه دهند تا بتوان روزی از آنها برای سرد کردن کامپیوترها، استفاده در پنلهای خورشیدی، بیو مهندسی و سایر کاربردها استفاده نمود. دیدگاه دانشمندان در مورد کارایی اطلاعات کوانتومی در حال شکوفایی است. بسیاری از دانشمندان معتقدند موتورهای کوانتومی در آینده‌ای نزدیک جای موتورهای کلاسیک را خواهند گرفت. اگرچه این موتورهای احتمالی نیز اکنون از قانون بازده کارنو در مورد میزان کار انجام شده در اثر انتقال گرما از جنس گرم به سرد استفاده می‌کنند، اما سرعت استخراج شده در این موتورها اندکی بیشتر است (۱۰).

اخیرا گروهی از محققان با استفاده از نظریه اطلاعات کوانتومی، مقاله‌ای در مورد قانون سوم ترمودینامیک (قانونی که می‌گوید رسیدن به صفر مطلق غیر ممکن است) ارائه کرده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، محدودیت سرعت سرد کردن یک جسم، ناشی از محدودیت سرعت انتقال اطلاعاتی است که از یک ذره در ابعادی محدود، خارج می‌شود. این محدودیت سرعت ممکن است در ارتباط با توانایی سرد کردن یخچالهای کوانتومی باشد. در سال ۲۰۱۵ محققان، جایگزینی برای قانون دوم ترمودینامیک در مقیاس کوانتومی ارائه دادند که باعث محدودیت‌هایی در مورد نحوه توزیع احتمالی که تعریف ذرات فیزیک را

به دست می‌دهد، می‌شود. با گسترش دانش موتورهای کوانتومی و ترمودینامیک کوانتومی و نیز افزایش دانش بشری در مورد آن‌ها، برخی از قوانین ترمودینامیک کلاسیک در برابر قوانین ترمودینامیک کوانتومی بی ارزش جلوه می‌نمایند. به باور برخی از دانشمندان، اهمیت اطلاعات توسط بسیاری از محاسبه‌گرهای کوانتومی نادیده گرفته شده و این باعث برداشت اشتباه ما از جهان به عنوان یک ابزار فیزیکی به جای یک غول کوانتومی می‌شود (۱۱).

فرآیندهای اساسی ترمودینامیک کوانتومی

برای تعریف فرآیندهای هم دما وهم حجم کوانتومی در ابتدا نیاز به بررسی مادهی کار داریم. در اینجا یک سیستم کوانتومی دلخواه با یک تعداد محدود از تراز های انرژی به صورت مادهی کار مورد استفاده قرار می گیرد البته این می تواند به سیستمی با تعداد نامتناهی از ترازهای انرژی تعمیم یابد

یک فرآیند هم حجم کوانتومی جزئیاتی شبیه فرآیند هم حجم کلاسیکی دارد در یک فرآیند هم حجم کوانتومی مادهی کار در تماس با یک منبع گرمایی قرار دارد زمانی که میان مادهی کار و منبع گرمایی، گرما مبادله می شود هیچ کاری انجام نمی شود این همانند آن چیزی است که در یک فرآیند هم حجم کوانتومی احتمال های اشغالی P و هم چنین آنتروپی S تا زمانی تغییر می کنند، که ماده ی کار سرانجام به تعادل گرمایی با منبع گرمایی نائل شود. به گرمایی، گرما مبادله می شود هیچ کاری انجام نمی شود این همانند آن چیزی است که در یک فرآیند هم حجم کلاسیکی اتفاق می افتد. در یک فرآیند هم حجم کوانتومی احتمال های اشغالی P و هم چنین آنتروپی S تا زمانی تغییر می کنند، که ماده ی کار سرانجام به تعادل گرمایی با منبع گرمایی نائل شود. به طور مشابه در یک فرآیند هم حجم کلاسیکی فشار P و دمای T تغییر می کند و مادهی کار در انتهای این فرآیند به تعادل گرمایی با منبع گرم می رسد. برای مثال اگر مادهی کار یک ذرهی محبوس در چاه پتانسیل مربعی باشد هیچ کاری در طی یک فرآیند هم حجم کوانتومی، زمانی گرما جذب یا منتشر می شود، انجام نمی شود و توزیع های اشغالی هر ویژه حالت توزیع بولتزمنی را در انتهای فرآیند هم حجم کوانتومی برآورده می کنند (۱۲).

یک فرآیند ترمودینامیکی بی در روی کلاسیک می تواند در جملاتی از یک فرآیند ترمودینامیکی بیدر روی کوانتومی فرمول بندی شود زیرا فرآیندهای بی در روی کوانتومی به قدر کافی آهسته پیش می روند چنان که شرط عمومی بی در روی کوانتومی برآورده شود پس، توزیع های جمعیت بدون تغییر باقی می ماند، یعنی هیچ تبادل گرمایی در فرآیند بی درروی کوانتومی وجود ندارد اما کارهنوز می تواند غیرصفر باشد. در یک فرآیند بی در روی کلاسیکی ضرورتی وجود ندارد که احتمال های اشغالی ثابت نگه داشته شوند. برای مثال وقتی که فرآیند خیلی سریع پیش رود، شرط بی در روی کوانتومی برآورده نشده است و برانگیختگی داخلی احتمالی اتفاق خواهد افتاد اما با این وجود هیچ گرمایی میان ماده ی کار ومنبع گرمایی مبادله نمی شود این فرآیند ترمودینامیکی، یک فرآیند بی در روی کلاسیک است اما بی درروی کوانتومی نیست (۱۳).

کیوبیت های مجازی و دماهای مجازی

در اینجا ما بر روی این موضوع تاکید می کنیم، که ماشین های گرمایی می توانند از منظر کیوبیتهای مجازی در دماهای مجازی فهمیده شوند (۷). یک روش برای نشان دادن دو منبع گرمایی، که یک ماشین گرمایی را به جلو می برند، نشان دادن آنها به صورت یک سیستم مرکب می باشد. کیوبیت های مجازی زیرسیستم های دو ترازهی این ترکیب می باشند و دمای مجازی آنها می تواند هر مقدار مثبت یا منفی بگیرد. ماشین های گرمایی بر روی یک سیستم خارجی بدین گونه اثر می کنند، که سیستم خارجی را در تماس گرمایی با یک بازه ی خوب انتخاب شده از کیوبیتها و دماهای مجازی قرار میدهند.

ترمودینامیک کوانتومی توصیفی عمیق از پدیده هایی که در فصل مشترک مکانیک کوانتومی و ترمودینامیک هستند ، ارائه میدهد. آغاز این رشته از تحقیق، به سال ۱۹۵۰ برمی گردد زمانی که تحلیل ترمودینامیکی لیزرها مورد بررسی قرار گرفته بود. که علاقه ی قابل توجهی که در این شاخه وجود داشته است منجر به نتایج زیادی در مورد ماشین های گرمایی کوانتومی شده است. از جمله ماشین های گرمایی کوانتومی که اخیرا بسیار مورد توجه بوده است، کوچکترین ماشین های گرمایی خودساز گار ممکن می باشد. خودسازگار بودن بدین معنی است که هیچ نوع چشمه یا کار خارجی یا کنترل دیگری مجاز نمی باشد و

تنها بر هم کنش های ناهمدوس با منبع های گرمایی در دماهای مختلف وجود دارد. در اینجا ما با استفاده از مفهوم کیوبیت های مجازی و دماهای مجازی ، مکانیسم کوچک ترین ماشین های گرمایی - یخچال ها، پمپ های گرمایی و موتورهای گرمایی را توضیح خواهیم داد با این مزیت، که کار کرد همه ی آنها از طریق یک مکانیسم ساده قابل بیان می باشد. دقت کنید که این ماشین های گرمایی کوانتومی، همگی، یک سیستم خارجی را در تماس گرمایی با یک کیوبیت مجازی خوب انتخاب شده، در یک دمای مجازی خوب انتخاب شده قرار میدهند (۱۴).

ما خواهیم دید که چگونه کیوبیت مجازی یک روش طبیعی برای درک کار، در عبارتهایی از وارونگی جمعیت و دماهای منفی را ارائه می دهد و هم چنین، با توجه به این مفاهیم در فصل بعد خواهیم دید که در حد کارنو کوچک ترین ماشین های گرمایی بازدهی دارند، که جهانی میباشد(به عبارتی مستقل از جزئیات مدل)

ماشین های گرمایی

همه ی چیزی که یک ماشین گرمایی انجام میدهد قرار دادن یک سیستم خارجی در تماس گرمایی با یک مجموعه ی محصور از کیوبیت های مجازی در منبع مرکب می باشد که این کیوبیتها دارای یک بازهی محصور از دماهای مجازی می باشد. سیستم خارجی به سادگی تحت تاثیر کیوبیت های مجازی واقع می شود. سیستم خارجی به همان صورتی تحت تاثیر این کیوبیت های مجازی قرار می گیرد که به نظر می رسد در تماس گرمایی با کیوبیت های واقعی در همان دما می باشد. اگر دما به طور برجسته کوچکتر از منبع های منحصر به فرد باشد ماشین یک یخچال می باشد و اگر دما به طور برجسته بزرگتر باشد، آنگاه آن یک پمپ گرمایی می باشد و سرانجام، اگر دما منفی باشد ماشین یک موتور گرمایی می باشد (۱۵).ماشینهای گرمایی به طور همزمان مانند یک جفت کننده و یک فیلتر عمل می کنند. ماشین های گرمایی یک جفت شدگی میان سیستم و منبع های خارجی مقرر می کنند اما همچنان فیلتر تنها یک بازه ی محصور از دماهای مجازی را بیرون می کشد یا به عبارتی فیلتر می کند. سوال مهمی که در این جا مطرح می شود این است، که دقیقا چطور یک ماشین گرمایی رسیدن به این هدف را انجام می دهد و به طور ویژه، چگونه یک ماشین گرمایی کیوبیت های مجازی مورد نظر را از منبع بیرون می کشد؟ در واقع، همان طور که خواهیم دید کوچک ترین ماشین های گرمایی با یک بازه از دماهای مجازی جفت نشده اند، بلکه تنها با یکی از آنها جفت میشوند از این رو، آن ها به صورت فیلترهای کامل اثر می کنند و بنابراین ماشین های گرمایی بسیار مرتب می باشند. در ادامه خواهیم دید، که توانایی فیلترهای کامل به شدت مرتبط با توانایی رسیدن به بازدهی کارنو خواهد بود (۱۶).

نتیجه‌گیری

آنچه گفته شد صرفاً معرفی کوتاه و البته گزینشی از برخی از مباحثی است که در سالهای اخیر توجه پژوهشگران را در ترمودینامیک کوانتومی به خود جلب نموده است. این نظریه علی رغم نوپا بودن طیف وسیعی از موضوعها را در برمیگیرد، از جمله ترمودینامیک کوانتومی دستگاه‌های غیر تعادلی و فرایندهای برگشت ناپذیر، که به ظاهر امکان خم کردن قانون دوم ترمودینامیک را در رژیمهای خاصی فراهم کرده اند. در این چارچوب، تعریفهای جدیدی برای کار و گرما و حتی قانون وجود دارد که به آنها بر اساس قضیهٔ افت وخیز در اینجا اشاره ای نشد. در پایان متذکر میشویم که علاوه بر اهمیت ترمودینامیک کوانتومی در پاسخ به برخی پرسش های بنیادی، در تلاشهایی که هم اکنون برای تحقق آنچه "تکنولوژی و فناوری کوانتومی" نامیده شده در حال انجام است، ترمودینامیک کوانتومی جایگاه و نقش برجسته‌ای دارد.

منابع

1. Perrot, P.; “A to Z of Thermodynamics”, Oxford University Press.2018.
2. Clark, O.E.; “The Essential Dictionary of Science.”, Noble Books & Barnes. 2014.
3. Partington, J.R.; “A Short History of Chemistry.”, Dover.2019.
4. Richard, E.; Borgnakke, S.; Gordon, J.and Wylen, V.; “Fundamentals of Thermodynamics (6th).”, Wiley. 2013.
5. Feynman, R, P.; Leighton, R, B.and Sands, M.; “The Feynman Lectures on Physics”. Addison-Wesley Publishing Company. 2016.

6. Carnot ،S.and Robert, H (editor and translator); "Reflections on the Motive Power of Heat and on Machines Fitted to Develop That Power." New York, 2019.
7. Wu, C.; "Thermodynamic Cycles: Computer-aided Design and Optimization". New York: M. Dekker, 2014.
8. Nakahara, M.; "Quantum computing: an overview".; Kinky University, Japan.
9. Griffiths, D, J.; "Introduction to Quantum Mechanics (2nd ed.)". Prentice Hall. 2014.
10. Zhang, T.; Liu, W.and Chen, P.; "Four-level entangled quantum heat engines". Phys. Rev. A 75, 062102 ,2007. 14. Goold, J.; "The role of quantum information in thermodynamics — a topical review." Phys. A: math. Theor. 49 143001.2016.
11. Quan, H, T.; Liu, Yu-xi.; Sun, C, P.and Nori, F.; "Quantum thermodynamic cycles and quantum heat engines". USA. Michigan 48109-1040. 2007.
12. Callen, H.; "Thermodynamics and an Introduction to Themostatistics". Wiley, New York, American Journal of Physics 66. 164. 1985.
13. Kieu, T, D.; "Quantum heat engines, the second law and Maxwell's daemon". Eur.Phy.J.D. Phys. Rev.Lett 39: 115-128.2006.
14. Kieu, T, D.; "The Second Law, Maxwell's Demon, andWork Derivable from Quantum Heat Engines". Phys. Rev.Lett 93: 140403-140406.2004.
15. Quan, H, T.; Zhang, P and Sun, C, P.; "Quantum heat engine with multilevel quantum systems". Phys. Rev. E 72: 056110-056120.2005.
16. Quan, H, T.; Liu, Y, X.; Sun, C, P and Nori, F, Wang, Y, D.; "Maxwell's Demon Assisted Thermodynamic Cycle in Superconducting Quantum Circuits". Phys. Rev.Lett 97: 180402-180405 .2006.