

چگونگی دستیابی به دماهای بسیار پایین و نحوه اندازه گیری آن



دما را می توان با واحدهای مختلفی اندازه گرفت. معمولاً برای اندازه گیری دما در زندگی روزمره از واحدهای سلسیوس و فارنهایت استفاده می کنیم. صفر مقیاس دما باید متناظر با سرعت صفر ذرات گاز و در نتیجه انرژی صفر این ذرات باشد، اما دو واحد دمای نامبرده فاقد این خاصیت طبیعی هستند. بنابراین مقیاس دمای طبیعی، دمای مطلق است که برحسب دمای کلونین اندازه گیری می شود. صفر کلونین پایین ترین دمای ممکن است. در صفر مطلق تمام حرکت ها متوقف می شود. بدیهی

است دستیابی به دمای پایین تر از صفر مطلق امکان پذیر نیست، زیرا سرعتی کمتر از صفر و انرژی کمتر از هیچ، وجود ندارد. (البته به خاطر داشته باشید که در اینجا منظور از انرژی، فقط انرژی هایی است که می توان از ذرات گرفت و شامل مقدار انرژی باقی مانده یا انرژی نقطه صفر مکانیک کوانتومی که در مورد بعضی از ذرات از آنها صحبت می شود، نیست.)

صفر مطلق متناظر با ۲۷۳- _ درجه سلسیوس و ۴۶۰- _ درجه فارنهایت است. برای سرد کردن یک جسم لازم است انرژی موجود در جسم را استخراج کرده و آن را به جایی دیگر منتقل کنیم. برای مثال در یخچال های خانگی، مبدل گرمایی موجود در پشت یخچال گرم می شود، زیرا انرژی استخراج شده از اجسام موجود در درون یخچال به این قسمت منتقل می شود. (علاوه بر گرمایی که از اجسام موجود در درون یخچال به این قسمت منتقل می شود، مقداری گرما نیز به دلیل کار کردن خود یخچال تولید می شود.)

در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ روش های جدیدی برای سرد کردن اتم های گازی ابداع شد: سرد کردن لیزری و سرد کردن تبخیری. با تلفیق این دو روش، دسترسی به دماهای پایین تر از یک نانو کلونین (یک میلیاردم درجه کلونین) ممکن شده است. پایین ترین دمایی که تاکنون به آن دست یافته اند، دمای ۰.۴ پیکوکلونین است و تقریباً شش برابر کمتر از رکورد قبلی دما است. گروه ما توانسته است به این رکورد دما دست یابد که گزارشی از آن در شماره ۱۲ سپتامبر ۲۰۰۳ مجله ساینس به چاپ رسیده است. در سال های اخیر نیز دو جایزه نوبل برای توسعه این روش ها اهدا شد (سال های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۱) در سردسازی لیزری، اتم ها نور لیزر را پراکنده می کنند. هر فوتون لیزر که با ماده برخورد می کند، جذب آن شده و مجدداً در جهت دیگری منتشر می شود. به طور متوسط، رنگ فوتون پراکنده شده نسبت به نور لیزر اولیه کمی به سمت آبی جابه جا می شود و این یعنی فوتون پراکنده شده انرژی بیشتری نسبت به فوتون جذب شده دارد.

از آنجایی که انرژی کل پایسته است، اختلاف در انرژی فوتون از حرکت های اتمی اخذ شده است و این یعنی حرکت اتم ها کند شده است. تغییر در طول موج این تابش ها به دلیل اثر داپلر (که این جابه جایی

متناسب با سرعت های اتمی است) یا به دلیل جابه جایی استارک (که به واسطه میدان الکتریکی پرتوهای لیزر است) روی می دهد و بدین ترتیب می توان تفسیری از چگونگی کاهش انرژی اتم ها ارائه داد .

تفسیر دیگر، بر چگونگی انتقال اندازه حرکت (momentum) به اتم ها تأکید دارد. اگر اتم ها در معرض چندین پرتو لیزر با مقدار قطبیت و بسامد مشخص قرار گیرند، عمدتاً فوتون هایی را جذب می کنند که از طرف نیم کره جلویی می رسد. در این حالت زاویه ای اندازه حرکت زاویه ای فوتون و سرعت اتم ها با یکدیگر می سازند بیشتر از ۹۰ درجه است. اندازه حرکت فوتون مولفه ای دارد که مخالف جهت حرکت اتم است و در نتیجه اندازه حرکت فوتون جذب شده از سرعت اتم می کاهد. در مرحله بعدی نشر فوتون باز زاویه های مختلف روی می دهد و در نتیجه از متوسط چرخه های متعدد جذب و نشر فوتون، تغییری در اندازه حرکت به دلیل نشر فوتون روی نمی دهد. مرحله اساسی ایجاد شرایطی است. که اتم ها فوتون ها را عمدتاً از جهت جلو دریافت کنند، که این کار با استفاده از جابه جایی داپلر امکان پذیر است. وقتی که زاویه بین اندازه حرکت فوتون و سرعت اتمی بیش از ۹۰ درجه باشد، اتم و نور در خلاف جهت یکدیگر در حال حرکتند و جابه جایی داپلر منجر به افزایش بسامد می شود .

وقتی که نور لیزر برای تشدید اتمی در حالت قرمز تنظیم شده باشد، جابه جایی داپلر موجب افزایش تشدید و جذب اتمی می شود. برای نورهایی که از جهت عقب می آیند و زاویه بین اندازه حرکت فوتون و سرعت اتمی کمتر از ۹۰ درجه است، جابه جایی معکوس روی می دهد و نور را از تشدید اتمی دورتر کرده و در نتیجه جذب کمتری روی می دهد. وقتی که ابرامی متراکم تر و سردتر شد، فرآیندهای سردسازی که در بالا تشریح شد، بر فرآیندهایی که موجب گرم شدن می شود، غلبه می کند. از فرآیندهایی که موجب گرم شدن می شود می توان به آزادسازی انرژی در اثر برخورد اتم ها و عقب نشینی اتفاقی در اثر پراکندگی اشاره کرد، هر چند که مقدار متوسط این حرکت ها صفر است اما باز هم موجب حرکت های ارتعاشی خفیفی در اتم ها می شود و در نتیجه دسترسی به پایین ترین دما را محدود می سازد. با این همه، اکنون اتم ها آنقدر سرد هستند که بتوان آنها را توسط میدان مغناطیسی محدود کرد. در این حالت اتم هایی انتخاب می شود که الکترون فرد و در نتیجه گشتاور مغناطیسی دارند .

در نتیجه این اتم ها همانند یک میله مغناطیسی کوچک عمل می کنند. میدان مغناطیسی خارج بر آنها نیرو وارد می کند، این نیرو با گرانش مقابله کرده و آنها را در فضا شناور نگه داشته و باعث می شود که در کنار یکدیگر بمانند، به عبارت دیگر اتم ها در یک قفس مغناطیسی که دیوارهای نامریی از جنس میدان های مغناطیسی دارد، گرفتار شده اند. برای سردسازی بیشتر از فرآیند سردسازی تبخیری استفاده می شود. این فرآیند با حذف اتم های پراانرژی از سیستم صورت می گیرد. همین فرآیند باعث سرد شدن فنجان قهوه می شود، وقتی که اکثر مولکول های پراانرژی به شکل بخار از فنجان خارج می شوند، متوسط انرژی و متعاقب آن دمای مولکول های باقی مانده کاهش می یابد .

در یک تله مغناطیسی، اغلب اتم های پراانرژی از سد کشش نیروی مغناطیسی گریخته و به فاصله های

دورتری بروند، در نتیجه این اتم ها می توانند به مناطق با میدان مغناطیسی بالاتری نسبت به اتم های سردتر منتقل شوند .

در این میدان های مغناطیسی قوی، اتم ها با امواج رادیویی یا میکرو ویو تشدید حاصل می کنند، که باعث تغییر گشتاور مغناطیسی شده و در نتیجه اتم ها پرواز کرده و از تله مغناطیسی می گریزند. یک انیمیشن عالی از فرآیند سرد شدن را می توانید با مراجعه به نشانی زیر بیابید .

اما چگونه می توان دمای بسیار پایین اتم ها را اندازه گرفت؟ یک روش ساده این است که به میزان گسترش ابر نگاه کنیم. هر چه ابر بزرگتر باشد، اتم ها پراثری تر هستند، زیرا توانسته اند به میزان بیشتری از میدان نیروی مغناطیسی فاصله بگیرند. این حالت شبیه جو زمین است، که حدود ۱۰ کیلومتر ضخامت دارد. این عبارت به این معنی است که اتم ها می توانند در دمای اتاق تا فاصله ۱۰ کیلومتری سطح زمین رفته و از میدان نیروی گرانشی سیاره ما فاصله بگیرند. اگر دمای سیاره ما ده مرتبه کمتر بود (یعنی حدود ۳۰ کلوین یا ۲۴۰ _ درجه سانتی گراد) آن وقت، ضخامت جو زمین فقط یک کیلومتر بود. در دمای ۳۰ میکرو کلوین جو متراکم شده و ضخامت آن فقط یک میلی متر می شد و در دمای ۳۰ نانوکلوین ارتفاع جو به یک میکرون یعنی به حدود یکصدم ضخامت تار موی انسان می رسید. (البته هوا گاز ایده آل نیست و در هنگام سرد شدن مایع می شود). در آزمایش های ما، اتم ها هم در معرض نیروی مغناطیسی و هم در معرض نیروی گرانشی قرار دارند. در مرکز این نیروی گرانشی کاملاً با نیروی مغناطیسی خنثی می شود .

اندازه ابر الکترونی با استفاده از نور لیزر مشخص می شود، اتم ها نور لیزر را کاملاً جذب می کنند و در نتیجه یک سایه تشکیل می شود. با استفاده از چندین لنز، تصویر این سایه روی یک حسگر الکترونیک مشابه همان حسگرهایی که در دور بین های دیجیتال وجود دارد، منتقل می شود. از آنجایی که شدت میدان مغناطیسی با دقت مشخص شده است، اندازه ابر معیاری مطلق از انرژی و در نتیجه دمای اتم هاست. (به عبارت دقیق تر چگالی توزیع اتم ها نشان دهنده توزیع انرژی پتانسیل است) روش دیگر برای تعیین دما، اندازه گیری انرژی جنبشی اتم هاست .

برای انجام این کار تله مغناطیسی را با قطع جریانی که از سیم پیچ مغناطیسی می گذرد، به طور ناگهانی قطع می کنند. در غیاب نیروی مغناطیسی، اتم ها به آسانی منتشر شده و ابر به طور بالیستیک منبسط می شود. با گذشت زمان اندازه ابر گسترش می یابد که میزان این گسترش به طور مستقیم نشان دهنده سرعت اتم ها و در نتیجه دمای آنهاست (به عبارت دقیق تر، تصویر جذبی از یک ابر در حال انبساط توزیع انرژی جنبشی در ابر را نشان می هد). برای یک زمان مشخص از انبساط بالیستیک، اندازه سایه، بیانگر میزان دما است. (دما متناسب با مربع اندازه ابر است) دستیابی به دماهای پایین تر و پایین تر به وسیله انقباض سایه نشان داده می شود.