

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 42

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۴۲

مترجم: محمدمسعود هاشمی

ویراستار: هانیه آقاخانی

حروف‌چین: علی باقری کوچکسرائی

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. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

فصل ۴۲

کاربردهای نظریه‌ی جنبشی^۱

۱۰۴۲ تبخیر^۲

در این فصل کاربردهای بیشتری از نظریه‌ی جنبشی را مورد بحث قرار می‌دهیم. در فصل قبل یکی از جنبه‌های خاص نظریه‌ی جنبشی را مورد تأکید قرار دادیم: یعنی، انرژی جنبشی متوسط در هر درجه‌ای از آزادی مولکول یا شیء دیگر برابر با $\frac{1}{2}kT$ است. از طرف دیگر، ویژگی اصلی آنچه اکنون بحث می‌کنیم، این واقعیت است که احتمال یافتن ذره در مکان‌های متفاوت، در واحد حجم، به صورت kT /انرژی پتانسیل e^{-} تغییر می‌کند. تعدادی از کاربردهای این رابطه را ارائه خواهیم کرد.

پدیده‌هایی که می‌خواهیم مطالعه کنیم نسبتاً پیچیده هستند. به طور مثال: مایع در حال تبخیر، یا الکترون‌هایی در فلز که از سطح فلز خارج می‌شوند، یا یک واکنش شیمیایی که در آن تعداد زیادی اتم درگیر می‌باشند. در چنین مواردی دیگر ممکن نیست عبارات ساده و درستی از نظریه‌ی جنبشی ارائه داد، چرا که وضعیت بسیار پیچیده است. بنابراین فصل حاضر، غیر از جاهایی که غیر از این تأکید نماییم، کاملاً غیردقیق^۳ است. ایده‌ای که بر آن تأکید می‌کنیم این است که تنها چیزی که کمابیش می‌توانیم از نظریه‌ی جنبشی درک کنیم؛ این است که اشیاء چگونه باید رفتار کنند. با استفاده از استدلال‌های ترمودینامیکی یا برخی از اندازه‌گیری‌های تجربی کمّیات بحرانی معین، نمایش صحیح‌تری از پدیده‌ها را می‌توانیم داشته باشیم.

با این حال، حتی همین که کمابیش بدانیم چرا چیزی چنین رفتاری می‌کند بسیار مفید است، به طوری که وقتی وضعیتی جدید، یا وضعیتی که هنوز شروع به تجزیه و تحلیل آن نکرده‌ایم باشد، کمابیش می‌توانیم

¹Applications of Kinetic Theory

²Evaporation

³inexact

بگوییم چه اتفاقی باید بیفتد. بنابراین این بحث بسیار غیردقیق^۴ اما در اصل ایده درست است، و در جزئیات معینی کمی ساده شده است.

اولین مثالی که در نظر می‌گیریم تبخیر مایع است. فرض کنید جعبه‌ای با حجم بزرگ داریم، که با مایعی در حالت تعادل^۵ و با بخاری در یک دمای^۶ معین پر شده است. فرض می‌کنیم که مولکول‌های بخار نسبتاً دور از هم بوده، و مولکول‌های داخل مایع نزدیک به هم قرار دارند. مسئله، یافتن این است که در مقایسه با تعداد مولکول‌ها در حالت مایع، چه تعداد مولکول در حالت بخار وجود دارد. بخار در دمای معین چه اندازه متراکم است و چگونه به دما بستگی دارد؟

فرض می‌کنیم n برابر با تعداد مولکول‌ها در واحد حجم در بخار است. البته این تعداد، با دما تغییر می‌کند. اگر گرما^۷ را اضافه کنیم، تبخیر بیشتری خواهیم داشت. حال کمیت دیگری را در نظر می‌گیریم، $1/V_a$ ، که برابر است با تعداد اتم‌ها^۸ در واحد حجم در مایع، فرض کنید که هر مولکول در مایع حجم معینی را اشغال نموده است، به طوری که اگر مولکول‌های بیشتری از مایع وجود داشته باشد، همه با هم یک حجم بزرگتر را اشغال می‌کنند. بنابراین اگر V_a حجم اشغال شده توسط یک مولکول باشد، تعداد مولکول‌ها در واحد حجم برابر با واحد حجم تقسیم بر حجم هر مولکول است. بعلاوه، فرض می‌کنیم یک نیروی جذب^۹ بین مولکول‌ها وجود دارد که آن‌ها را با هم در مایع نگه می‌دارد. در غیر این صورت ما نمی‌توانیم درک کنیم چرا مایع چگالیده می‌شود. بنابراین فرض کنید که چنین نیرویی موجود بوده و انرژی بستگی^{۱۰} مولکول‌ها در مایع وجود دارد که زمانی که آن‌ها داخل بخار می‌روند از دست می‌رود. یعنی می‌خواهیم فرض کنیم که برای اینکه یک مولکول از مایع به بخار برود باید مقدار معینی کار W انجام شود. اختلاف انرژی معین W بین انرژی مولکول در مایع و بخار وجود دارد، زیرا باید مولکول را از مولکول‌های دیگری که آن را جذب می‌کنند دور کنیم.

اکنون از این اصل عمومی که تعداد اتم‌ها در واحد حجم در دو ناحیه‌ی متفاوت برابر با $n_2/n_1 = e^{-(E_2-E_1)/kT}$ است استفاده می‌کنیم. بنابراین n ، تعداد در واحد حجم در بخار، تقسیم بر $1/V_a$ ، تعداد در واحد حجم در مایع، برابر است با

$$nV_a = e^{-W/kT}, \quad (۱.۴۲)$$

این یک قاعده‌ی عمومی و مانند جوّ در حالت تعادل تحت گرانش^{۱۱} است، که گاز قرار گرفته در زیر چگال‌تر از گاز بالاست زیرا برای بالا بردن مولکول‌های گاز تا ارتفاع h نیاز به کار mgh می‌باشد. به همین

^۴inaccurate (قاعدتاً «ناصحیح» معنی می‌دهد، احتمالاً در اینجا «غیردقیق» منظور می‌باشد - مترجم-)

^۵equilibrium

^۶temperature

^۷heat

^۸به نظر می‌رسد در این فصل کلمات «اتم» و «مولکول» مکرراً جایگزین هم شده‌اند. - مترجم-

^۹attraction

^{۱۰}binding

^{۱۱}gravity

ترتیب، مولکول‌ها در مایع از مولکول‌های بخار چگال‌ترند، زیرا باید با غلبه بر «تپه‌ی» انرژی W آن‌ها را از هم دور کنیم، و نسبت چگالی‌ها^{۱۲} برابر با $e^{-w/kT}$ است.

این چیزی است که می‌خواستیم استنتاج نماییم، اینکه چگالی بخار به صورت e به توان منهای انرژی یا کمیت دیگری مانند آن بر روی kT تغییر می‌کند؛ عامل‌های جلویی^{۱۳} در واقع برای ما جالب نیستند، چرا که در بیشتر موارد چگالی بخار بسیار کمتر از مایع است. در این شرایط، که ما در نزدیکی نقطه‌ی بحرانی که در آن چگالی‌ها تقریباً یکسانند نیستیم، بلکه چگالی بخار بسیار کم‌تر از چگالی مایع است، در این صورت این واقعیت که n بسیار کمتر از $1/V_a$ است، منجر به این واقعیت که W بسیار بزرگ‌تر از kT است می‌شود. بنابراین فرمول‌هایی مانند (۱۰۴۲) فقط وقتی W بسیار بزرگ‌تر از kT باشد جالب هستند، زیرا در چنین شرایطی، چون e را به توان منفی یک مقدار خیلی بزرگ می‌رسانیم؛ اگر T را به مقدار بسیار کمی تغییر دهیم، این توان بسیار بزرگ کمی تغییر می‌کند و تغییر ایجاد شده در عامل نمایی بسیار مهم‌تر از هر تغییری است که ممکن است در عامل‌های جلویی رخ دهد. چرا باید تغییری در عامل‌هایی مانند V_a وجود داشته باشد؟ زیرا تجزیه و تحلیل ما تقریبی بود؛ به علاوه، واقعاً حجم معینی برای هر مولکول وجود ندارد؛ وقتی دما را تغییر می‌دهیم، حجم V_a ثابت نمی‌ماند و مایع منبسط می‌شود. ویژگی‌های کم دیگری هم مانند این وجود دارد، و بنابراین وضعیت واقعی پیچیده‌تر است. عوامل وابسته به دما که به آهستگی تغییر می‌کنند در همه جا وجود دارند. در واقع، ممکن است بگوییم خود W با دما اندکی تغییر می‌کند، زیرا در دمای بالاتر و در حجم مولکولی متفاوت، جذب‌های متوسط متفاوتی وجود خواهد داشت و غیره. بنابراین، ممکن است فکر کنیم که اگر فرمولی داشته باشیم که در آن همه چیز به طریق ناشناخته‌ای با دما تغییر می‌کند، در این صورت در واقع هیچ فرمولی نداریم. اما اگر توجه داشته باشیم که توان W/kT بطور کلی بسیار بزرگ است می‌بینیم که در منحنی چگالی بخار به صورت تابعی از دما، بیشتر تغییرات توسط عامل نمایی ایجاد می‌شوند و اگر W را ثابت و ضریب $1/V_a$ را تقریباً ثابت در نظر بگیریم، این فرمول تقریب خوبی برای بازه‌های کوتاه در طول منحنی است. به عبارت دیگر، بیشتر تغییرات، ماهیت کلی $e^{-W/kT}$ دارند.

معلوم شده که پدیده‌های بسیار زیادی در طبیعت وجود دارد که مشخصه‌شان این است که انرژی را از جایی قرض می‌گیرند، و در آن‌ها ویژگی اصلی تغییر دما، e به توان منفی انرژی بر روی kT است. این واقعیت تنها زمانی مفید است که انرژی در مقایسه با kT زیاد باشد، به طوری که بیشتر تغییرات شامل تغییرات kT باشد و نه مقدار ثابت و عوامل دیگر.

اکنون روش دیگری را برای به دست آوردن نتیجه‌ی تا حدودی مشابه برای تبخیر در نظر می‌گیریم، اما با تفصیل بیشتری به آن نگاه می‌کنیم. برای رسیدن به رابطه‌ی (۱۰۴۲) به سادگی قاعده‌ای را که در حالت تعادل معتبر است اعمال می‌کنیم، اما به منظور درک بهتر ضروری ندارد تلاش کنیم به جزئیات آنچه اتفاق می‌افتد نگاه کنیم. ممکن است آنچه اتفاق می‌افتد را به صورت زیر توصیف نماییم: مولکول‌هایی که در بخار هستند به طور مداوم سطح مایع را بمباران می‌کنند؛ زمانی که این مولکول‌ها به سطح مایع ضربه می‌زنند،

¹²density¹³factors in front

ممکن است به عقب جهش کنند یا به سطح چسبیده شوند. عامل ناشناخته‌ای برای این وجود دارد؛ شاید $50 - 500$ ، شاید 10 به 90 - ما نمی‌دانیم. فعلاً فرض می‌کنیم مولکول‌ها همیشه به سطح چسبیده می‌شوند، بعداً می‌توانیم با این فرض که آن‌ها همیشه به سطح چسبیده نمی‌شوند، تجزیه و تحلیل دوباره کنیم. سپس در یک لحظه‌ی مفروض تعداد معینی از اتم‌ها بر روی سطح مایع چگالیده می‌شوند. تعداد مولکول‌های چگالیده تعدادی که در واحد زمان به واحد سطح وارد می‌شوند، برابر با تعداد در واحد حجم، n ، ضرب در سرعت^{۱۴} v است. این سرعت مولکول‌ها با دما مرتبط است، زیرا می‌دانیم مقادیر متوسط $\frac{1}{2}mv^2$ و $\frac{3}{2}kT$ باهم برابرند. بنابراین v نوعی از سرعت میانگین است. البته باید روی زاویه‌ها انتگرال‌گیری کنیم و نوعی متوسط بدست آوریم، اما این سرعت متوسط تقریباً با سرعت مجذور میانگین مربع‌ها^{۱۵} متناسب است. پس

$$N_c = nv \quad (2.42)$$

آهنگی است که در آن مولکول‌ها بر واحد سطح وارد شده و چگالیده می‌شوند. اما در همان زمان، اتم‌ها در مایع به اطراف جست و خیز می‌کنند، و هر از گاهی یکی از آن‌ها بیرون انداخته می‌شود. اکنون باید تخمین بزنیم با چه سرعتی بیرون انداخته می‌شود. ایده این است که در حالت تعادل، تعداد اتم‌هایی که بیرون انداخته می‌شوند با تعدادی که وارد می‌شوند برابر است.

چه تعداد بیرون انداخته می‌شود؟ برای اینکه مولکول خاصی بیرون انداخته شود باید به طور تصادفی انرژی‌ای بیشتر از مولکول‌های همسایه‌اش بدست آورد - انرژی اضافی قابل توجه - زیرا مولکول توسط مولکول‌های دیگر مایع با شدت زیاد جذب می‌شود. در حالت معمولی مولکول سطح مایع را ترک نمی‌کند چون شدیداً جذب می‌شود، اما گاهی در برخوردها یکی از آن‌ها به طور تصادفی این انرژی اضافی را بدست می‌آورد. اگر $W \gg kT$ ، شانس اینکه انرژی اضافی W را که در حالت مورد نظر ما نیاز است بدست آورد خیلی کم است. در واقع، $e^{-W/kT}$ شانس است که اتم انرژی‌ای بیشتر از این انرژی اضافی بدست آورد. این یک اصل کلی در نظریه‌ی سینتیک^{۱۶} است: احتمال اینکه بطور متوسط انرژی اضافی W قرض گرفته شود، برابر با e به توان منفی انرژی‌ای که باید قرض گرفته شود بر روی kT است. حال فرض کنید تعدادی از مولکول‌ها این انرژی را قرض کرده‌اند. باید تخمین بزنیم چه تعداد مولکول در ثانیه سطح را ترک می‌کنند. البته، صرف اینکه مولکول انرژی لازم را دارد به این معنی نیست که واقعاً بخار می‌شود، چون ممکن است بیش از حد داخل عمق مایع قرار داشته باشد، یا حتی اگر نزدیک سطح باشد، در جهت اشتباه حرکت کند. تعدادی که واحد سطح را در ثانیه ترک می‌کنند چیزی شبیه این است: تعداد اتم‌هایی که نزدیک سطح هستند، در واحد سطح، تقسیم بر زمانی که طول می‌کشد تا اتم فرار کند، ضرب در احتمال $e^{-W/kT}$ که اتم‌ها آماده فرار شوند یعنی انرژی کافی برای فرار داشته باشند.

فرض می‌کنیم که هر مولکول در سطح مایع، سطح مقطع معین A را اشغال می‌کند. پس تعداد مولکول‌ها

^{۱۴} با توجه به عبارت‌های بعدی، به نظر می‌رسد در طول فصل کلمات «تندی» و «سرعت»، جایگزین هم شده‌اند. - مترجم -

^{۱۵} root-mean-square

^{۱۶} kinetic theory

بر واحد سطح مایع $1/A$ خواهد بود. اکنون، چه مدت طول می‌کشد تا مولکول فرار کند؟ اگر مولکول‌ها تندی متوسط معین v داشته باشند و مجبور باشند مثلاً به اندازه‌ی یک قطر مولکولی D ، ضخامت اولین لایه، حرکت کنند، آن وقت زمانی که طول می‌کشد تا مولکول آن ضخامت را طی کند همان زمان مورد نیاز برای فرار مولکول است اگر انرژی کافی داشته باشد. این زمان D/v خواهد بود. بنابراین تعدادی که تبخیر می‌شوند تقریباً می‌شود:

$$N_e = (1/A)(v/D)e^{-W/kT}. \quad (۳.۴۲)$$

حال مساحت هر اتم ضرب در ضخامت لایه تقریباً برابر با حجم V_a اشغال شده توسط یک اتم منفرد است. بنابراین برای رسیدن به تعادل، باید داشته باشیم $N_e = N_c$ ، یا

$$nv = (v/V_a)e^{-W/kT}. \quad (۴.۴۲)$$

می‌توانیم v ها را حذف کنیم، چون با هم برابرند. گرچه یکی از آن‌ها سرعت مولکول در بخار و دیگری سرعت مولکول در حال تبخیر است، اما با هم برابر هستند، زیرا می‌دانیم انرژی جنبشی میانگینشان (در یک جهت) $\frac{1}{2}kT$ است. اما ممکن است کسی اعتراض کند و بگوید «نه! اینها مولکول‌های به‌ویژه سریعند؛ مولکول‌هایی که انرژی اضافی کسب کرده‌اند.» در واقع اینطور نیست، زیرا لحظه‌ای که شروع به کشیده شدن از مایع می‌کنند، مجبور می‌شوند این انرژی اضافی را برای غلبه بر انرژی پتانسیل از دست بدهند. بطوری که همین که به سطح می‌آیند تا سرعت v کند می‌شوند! این همان چیزی است که در بحث ما در مورد توزیع سرعت‌های مولکولی در جو بود؛ در پایین، مولکول‌ها توزیع معینی از انرژی داشتند. آن‌هایی که به بالا می‌رسند همان توزیع انرژی را دارند، زیرا مولکول‌های کند اصلاً به بالا نمی‌رسند، و مولکول‌های سریع کند شده‌اند. یک واقعیت نسبتاً قابل توجه اینکه مولکول‌هایی که تبخیر می‌شوند همان توزیع انرژی مولکول‌هایی را که داخل هستند دارند. در هر حال به دلیل موارد دیگری که منجر به غیردقیق بودن محاسبات می‌شوند مانند احتمال به عقب جستن به جای ورود به مایع و غیره، بی فایده است که تلاش کنیم بحث دقیقی درباره‌ی فرمول‌مان داشته باشیم. بنابراین ایده‌ای تقریبی از آهنگ تبخیر و چگالش^{۱۷} داریم و البته می‌بینیم که چگالی بخار n به همان روش قبلی تغییر می‌کند، اما اکنون بجای اینکه آن را فقط به عنوان یک فرمول دلخواه درک کنیم با جزئیات بیشتری درک می‌نماییم.

این درک عمیق‌تر به ما اجازه‌ی تجزیه و تحلیل بعضی از چیزها را می‌دهد. برای مثال، فرض کنید بخار را با چنان آهنگ زیادی پمپ کنیم که به همان سرعتی که تشکیل می‌شود منتقل شود (اگر پمپ‌های بسیار خوبی داشته باشیم و مایع با کندی بسیار تبخیر شود). اگر دمای مایع را در T نگه داریم تبخیر با چه سرعتی اتفاق می‌افتد؟ فرض کنید که قبلاً چگالی بخار در حالت تعادل را بصورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری کرده‌ایم، به طوری که می‌دانیم، در دمای مفروض، چه تعداد مولکول در واحد حجم با مایع در تعادل هستند. حال

¹⁷condensation

می‌خواهیم بدانیم مایع با چه سرعتی تبخیر می‌شود؟ با اینکه تا آنجایی که بخش تبخیر مورد نظر ما بوده، فقط تجزیه و تحلیل تقریبی بکار برده‌ایم، غیر از عامل نامعلوم ضریب بازتاب، تعداد مولکول‌های بخار واردشونده چندان بد محاسبه نشده است. بنابراین می‌توانیم از این واقعیت استفاده کنیم که در حالت تعادل تعدادی که بخار را ترک می‌کنند، برابر با تعدادی است که وارد آن می‌شوند. درست است که بخار دور می‌شود و بنابراین مولکول‌ها فقط بیرون می‌روند، اما اگر بخار تنها مانده بود، به چگالی تعادل می‌رسید که در آن تعدادی که برمی‌گردند با تعدادی که تبخیر می‌شوند برابر است. بنابراین می‌توانیم به راحتی بینیم تعدادی که در هر ثانیه از سطح بیرون می‌آیند برابر است با ضریب نامعلوم بازتاب R ضرب در تعدادی که در هر ثانیه تا سطحی که بخار هنوز هم وجود دارد پایین می‌آید، زیرا این تعدادی است که در حالت تعادل با تبخیر برابری می‌کند:

$$N_e = nvR = (vR/V_a)e^{-W/kT}. \quad (۵.۴۲)$$

البته محاسبه‌ی تعداد مولکول‌هایی که از بخار به مایع ضربه می‌زنند آسان است، چون نیازی نیست درباره‌ی نیروها به آن اندازه که وقتی در مورد اینکه چگونه از میان سطح مایع فرار می‌کنند لازم است بدانیم اطلاعات داشته باشیم. بسیار ساده‌تر است از این راه استدلال کنیم.

۲.۴۲ گسیل گرمایونی^{۱۸}

مثال دیگری از یک وضعیت بسیار عملی که شبیه به تبخیر مایع است ارائه می‌کنیم، آن قدر شبیه که ارزش تجزیه و تحلیل جداگانه ندارد و اساساً همان مسئله است. در یک لوله‌ی رادیو^{۱۹} چشمه‌ی الکترون وجود دارد، یعنی یک رشته‌ی^{۲۰} داغ تنگستن، و صفحه‌ای با بار مثبت برای جذب الکترون. هر الکترون که از سطح تنگستن فرار می‌کند فوراً به طرف صفحه رانده می‌شود این «پمپ» ایده‌آل ماست، که تمام وقت الکترون‌ها را «پمپ» می‌کند. حال سوال این است: چه تعداد الکترون در هر ثانیه می‌تواند از یک قطعه‌ی تنگستن خارج شود، و این تعداد با دما چگونه تغییر می‌کند؟ پاسخ این مسئله همان رابطه‌ی (۵.۴۲) است، چون معلوم است که در یک قطعه فلز، الکترون‌ها جذب یون‌ها یا اتم‌ها می‌شوند. تقریباً می‌توانیم بگوییم آن‌ها جذب فلز می‌شوند. برای اینکه یک الکترون از یک قطعه فلز خارج کرده شود، مقدار معینی انرژی یا کار نیاز است تا آن را بیرون بکشد. این کار برای انواع مختلف فلزات متغیر می‌باشد. در واقع حتی با مشخصه‌ی سطح نوع فلز مفروض تغییر می‌کند، اما کار کل ممکن است چند الکترون ولت باشد، که اتفاقاً مقدار نوعی انرژی درگیر در واکنش‌های شیمیایی است. مورد اخیر را می‌توانیم با یادآوری اینکه ولتاژ در یک سلول شیمیایی مانند باتری چراغ قوه، که توسط واکنش‌های شیمیایی تولید شده، حدود یک ولت است، به خاطر بسپاریم.

¹⁸Thermionic emission

¹⁹radio tube

²⁰filament

چگونه می‌توانیم چند الکترون در ثانیه بیرون می‌آیند؟ تجزیه و تحلیل آثار روی الکترون‌هایی که در حال بیرون رفتن هستند کاملاً دشوار بوده؛ تجزیه و تحلیل آن به روشی دیگر آسان‌تر است. بنابراین، می‌توانیم با این تصور شروع کنیم که الکترون‌ها به طرف دیگر کشیده نمی‌شوند و اینکه الکترون‌ها مانند گاز بوده و می‌توانند به طرف فلز برگردند. پس چگالی معینی از الکترون‌ها در حالت تعادل وجود خواهد داشت که البته، دقیقاً با همان فرمول (۱۰.۴۲) داده می‌شود، که V_a تقریباً حجم هر الکترون در فلز بوده، و W برابر با $q_e\phi$ است، که ϕ موسوم به تابع کار^{۲۱}، ولتاژ مورد نیاز برای بیرون کشیدن یک الکترون از سطح است.^{۲۲} این رابطه به ما خواهد گفت: برای موازنه با الکترون‌هایی که بیرون می‌روند، چه تعداد از الکترون‌ها باید در فضای اطراف بوده و با فلز برخورد کنند. در نتیجه اگر همه‌ی الکترون‌ها را دور کنیم، محاسبه‌ی اینکه چه تعداد از آن‌ها بیرون می‌روند آسان است، زیرا تعدادی که خارج می‌شوند دقیقاً برابر با تعدادی است که با چگالی «بخار» الکترون اشاره شده در بالا داخل می‌شوند. به عبارت دیگر، پاسخ این است که جریان الکتریسیته‌ای که در واحد سطح وارد می‌شود برابر است با بار هر الکترون ضرب در تعدادی که در هر ثانیه بر واحد سطح وارد می‌شوند، که همانطور که مکرراً دیده‌ایم، این تعداد برابر با تعداد در واحد حجم ضرب در سرعت است:

$$I = q_e n v = (q_e v / V_a) e^{-q_e \phi / kT}. \quad (۶.۴۲)$$

اکنون یک الکترون ولت متناظر با kT در دمای ۱۱۶۰۰ درجه است. رشته‌ی لوله ممکن است در دمای مثلاً ۱۱۰۰ درجه کار کند، به طوری که عامل نمایی چیزی شبیه به e^{-10} بوده؛ هنگامی که ما دما را کمی تغییر دهیم، عامل نمایی تغییرات زیادی خواهد کرد. بنابراین، بازهم ویژگی اصلی فرمول، $e^{-q_e \phi / kT}$ است. در واقع، عامل جلویی^{۲۳} کاملاً اشتباه است، زیرا معلوم شده که رفتار الکترون‌ها در یک فلز توسط نظریه‌ی کلاسیک به درستی توصیف نمی‌شود، بلکه با مکانیک کوانتوم توصیف می‌شود، اما این هم عامل جلویی را فقط کمی تغییر می‌دهد. در واقع باوجود اینکه بسیاری از مردم از نظریه‌ی مکانیک کوانتوم پیشرفته برای محاسبات خود استفاده کرده‌اند، هیچ کس تا به حال نتوانسته این مسئله را خیلی خوب حل کند. مسئله‌ی بزرگ این است که آیا W با دما تغییر کمی می‌کند؟ اگر اینطور باشد کسی نمی‌تواند W را که با دما به آهستگی تغییر می‌کند از ضریبی متفاوت در جلو تشخیص دهد. یعنی، اگر W مثلاً با دما بطور خطی تغییر کند، به طوری که $W = W_0 + \alpha kT$ ، آن وقت خواهیم داشت:

$$e^{-W/kT} = e^{-(W_0 + \alpha kT)/kT} = e^{-\alpha} e^{-W_0/kT}.$$

بنابراین W ای که وابستگی دمایی خطی دارد هم ارز با یک «ثابت» جابه‌جا شده^{۲۴} است. در واقع کاملاً دشوار و معمولاً بی‌ثمر است تلاش کنیم ضریب جلویی را بطور صحیح بدست آوریم.

^{۲۱}work function

^{۲۲} q_e بار هر الکترون است. - مترجم -

^{۲۳} یعنی ضریب $e^{-q_e \phi / kT}$. - مترجم -

^{۲۴}shifted "constant"

۳۰۴۲ یونش گرمایی^{۲۵}

اکنون با مثال دیگری از همان ایده ادامه می‌دهیم؛ همیشه همان ایده است. این مثال به یونش مربوط می‌شود. فرض کنید که در یک گاز اتم‌های زیادی داریم که در حالت خنثی هستند، اما گاز داغ است و اتم‌ها می‌توانند یونیزه شوند. می‌خواهیم بدانیم اگر چگالی معینی از اتم‌ها در واحد حجم در دمای معین داشته باشیم در شرایط مفروض چه تعداد یون وجود دارد. باز هم جعبه‌ای در نظر می‌گیریم که در آن N اتم وجود دارد که می‌توانند الکترون‌ها را نگه دارند (اگر از اتم الکترون خارج شود، یون نامیده می‌شود، و اگر اتم خنثی باشد، به سادگی آن را اتم می‌نامیم). فرض کنید که در هر لحظه‌ی معین، تعداد اتم‌های خنثی n_a ، تعداد یون‌ها n_i ، و تعداد الکترون‌ها n_e است، که همه در واحد حجم می‌باشند.^{۲۶} مسئله این است: رابطه‌ی بین این سه عدد چیست؟

در مرحله‌ی اول، ما دو شرط یا محدودیت روی این اعداد داریم. به عنوان مثال، وقتی شرایط متفاوتی مانند دما و غیره را تغییر می‌دهیم، $n_i + n_a$ ثابت باقی خواهد ماند زیرا به سادگی همان تعداد N هسته‌های اتم که در جعبه است خواهد بود. اگر تعداد هسته‌ها در واحد حجم را ثابت نگه داریم، و مثلاً دما را تغییر دهیم، با تداوم یونش بعضی از اتم‌ها تبدیل به یون می‌شوند، اما تعداد کل اتم به علاوه‌ی یون بدون تغییر می‌ماند. یعنی $N = n_i + n_a$. شرط دیگر این است که اگر کل گاز از نظر الکتریکی خنثی باشد (و اگر یونش دوم و سوم را نادیده بگیریم)، بدین معنی است که تعداد یون‌ها در همه زمان‌ها برابر است با تعداد الکترون‌ها، یا $n_e = n_i$. اینها معادلات کمکی^{۲۷} هستند که به سادگی پایستگی^{۲۸} بار و اتم را بیان می‌کنند.

این معادلات درست هستند، و نهایتاً وقتی یک مسئله‌ی واقعی را در نظر بگیریم، از آن‌ها استفاده خواهیم کرد. اما می‌خواهیم رابطه‌ی دیگری بین این کمیت‌ها بدست آوریم. این کار را به صورت زیر می‌توانیم انجام دهیم. دوباره از این ایده استفاده می‌کنیم که برای جدا کردن الکترون از اتم مقدار معینی انرژی لازم است، که انرژی یونش نامیده و برای یکسان سازی همه‌ی فرمول‌ها با W نشان می‌دهیم. بنابراین W را برابر با انرژی مورد نیاز برای بیرون کشیدن یک الکترون از اتم و تشکیل یون قرار می‌دهیم. اکنون دوباره می‌گوییم که تعداد الکترون‌های آزاد در واحد حجم در «بخار»، برابر با تعداد الکترون‌های مقید در اتم‌ها در واحد حجم ضرب در e به توان منفی اختلاف انرژی بین حالت‌های مقید و آزاد، روی kT می‌باشد. این هم معادله‌ای اساسی است. چگونه می‌توانیم آن را بنویسیم؟ البته تعداد الکترون‌های آزاد در واحد حجم n_e خواهد بود، زیرا این تعریف n_e است. اما در مورد تعداد الکترون‌ها در واحد حجم که در اتم مقیدند چطور؟ تعداد کل مکان‌هایی که می‌توانیم الکترون‌ها را قرار دهیم ظاهراً $n_a + n_i$ است، و فرض خواهیم کرد زمانی که آن‌ها مقیدند هر یک در حجم معین V_a مقید شده‌اند. بنابراین مقدار کل حجمی که در دسترس الکترون‌های مقید

^{۲۵}Thermal ionization^{۲۶}با توجه به پاراگراف بعدی؛ در اینجا واحد حجم بودن، شامل تعریف N (بجای n) نیز فرض شده است. – مترجم –^{۲۷}subsidiary equations^{۲۸}conservation

است $(n_a + n_i)V_a$ خواهد بود، بطوری که می‌توانیم فرمول‌مان را به این صورت بنویسیم:

$$n_e = \frac{n_a}{(n_a + n_i)V_a} e^{-W/kT}.$$

اما این فرمول در ویژگی اساسی زیر اشتباه است: هنگامی که یک الکترون از قبل در اتم باشد، الکترون دیگر نمی‌تواند داخل آن حجم شود! به عبارت دیگر، برای یک الکترون که تلاش می‌کند، در بخار یا در موقعیت چگالیده باشد همه‌ی حجم‌های تمام محل‌های ممکن واقعاً در دسترس نیست، زیرا در این مسئله ویژگی اضافی‌ای وجود دارد که زمانی که یک الکترون جایست که الکترون دیگر هست، مجاز نیست برود و دفع می‌شود. به همین دلیل، باید فقط آن بخش از حجم را که برای یک الکترون در دسترس است تا در اتم قرار گیرد به حساب بیاوریم. یعنی، حجم‌هایی که قبلاً اشغال بوده در حجم قابل دسترس کل محسوب نمی‌شود، بلکه تنها حجمی که مجاز است حجم یون‌هاست، که مکان‌های خالی برای رفتن الکترون وجود دارد. پس، در این شرایط، متوجه می‌شویم که راه بهتر برای نوشتن فرمول‌مان این است:

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{1}{V_a} e^{-W/kT}. \quad (۷.۴۲)$$

این فرمول معادله‌ی یونش ساها^{۲۹} نامیده می‌شود. اکنون می‌خواهیم با استدلال در مورد چیزهای سینتیکی که اتفاق می‌افتد بطور کیفی درک کنیم چرا فرمولی مانند این درست است.

اولاً هر از گاهی یک الکترون به یون رسیده، ترکیب شده و تشکیل اتم می‌دهند. همچنین، هر از گاهی یک اتم دچار برخورد شده و به یون و الکترون تقسیم می‌شود. حال این دو آهنگ باید برابر باشند. الکترون‌ها و یون‌ها با چه سرعتی یکدیگر را پیدا می‌کنند؟ این آهنگ قطعاً با افزایش تعداد الکترون‌ها در واحد حجم افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد یون‌ها در واحد حجم افزایش می‌یابد. یعنی آهنگ کلی که در آن بازترکیب رخ می‌دهد قطعاً متناسب با تعداد الکترون‌ها ضرب در تعداد یون‌هاست. اکنون آهنگ کلی که در آن یونش ناشی از برخوردها رخ می‌دهد، باید بطور خطی وابسته به تعداد اتم‌هایی باشد که برای یونیزه شدن موجودند. به این ترتیب وقتی رابطه‌ای بین حاصل ضرب $n_e n_i$ و تعداد اتم n_a وجود داشته باشد، آهنگ‌ها برابر خواهند بود. البته این واقعیت که رابطه‌ی مذکور با این فرمول خاص داده می‌شود، که در آن W انرژی یونش است، مستلزم مقدار کمی اطلاعات بیشتر نیز هست، اما به راحتی می‌توانیم درک کنیم که فرمول الزاماً شامل غلظت الکترون‌ها، یون‌ها و اتم‌ها بصورت $n_e n_i / n_a$ است تا ثابتی مستقل از n ‌ها، و فقط وابسته به دما، سطح مقطع‌های اتمی، و سایر عوامل ثابت ایجاد نماید.

همچنین ملاحظه می‌کنیم که، چون معادله شامل تعدادها در واحد حجم است، اگر دو آزمایش با تعداد کل مفروض N اتم به علاوه یون انجام دهیم، یعنی با تعداد ثابت معینی از هسته‌ها، اما با استفاده از جعبه‌هایی با حجم‌های متفاوت، همه‌ی n ‌ها در جعبه‌ی بزرگتر کمتر خواهند بود. اما چون نسبت $n_e n_i / n_a$ ثابت می‌ماند، تعداد کل الکترون‌ها و یون‌ها در جعبه‌ی بزرگتر باید بیشتر باشد. برای دیدن این، فرض کنید

²⁹Saha ionization equation

که N هسته داخل جعبه‌ای به حجم V وجود دارد^{۳۰}، و کسر f از آن‌ها یونیزه شده‌اند. پس $n_e = fN/V$ و $n_a = (1 - f)N/V$. بنابراین معادله‌ی ما می‌شود:

$$\frac{f^2}{1-f} \frac{N}{V} = \frac{e^{-W/kT}}{V_a}. \quad (۸.۴۲)$$

به عبارت دیگر، اگر چگالی اتم‌ها را کوچکتر در نظر بگیریم، یا حجم ظرف را بزرگتر کنیم، کسر f الکترون‌ها و یون‌ها باید افزایش یابد. این یونش که فقط از «انبساط» با کاهش چگالی ناشی می‌شود، دلیل این است که معتقدیم در چگالی بسیار کم، از جمله فضای سرد بین ستاره‌ها، ممکن است، یون‌ها وجود داشته باشند، حتی اگر از دیدگاه انرژی در دسترس نتوانیم این موضوع را درک کنیم. اگر چه مقدار بسیار زیادی انرژی kT برای ایجاد یون‌ها مورد نیاز است، اما آن‌ها وجود دارند.

چرا وقتی چنین فضای زیادی در اطراف وجود دارد یون‌ها می‌توانند وجود داشته باشند، در حالی که اگر چگالی را افزایش دهیم، یون‌ها تمایل به ناپدید شدن دارند؟ پاسخ: یک اتم را در نظر بگیرید. هر از گاهی، نور، یا یک اتم دیگر، یا یون، و یا هر آنچه تعادل گرمایی را حفظ می‌کند، به آن ضربه می‌زند. چون چنین میزان فوق‌العاده‌ی انرژی اضافی صرف می‌شود، خیلی به ندرت، الکترونی بیرون رفته و یک یون باقی می‌گذارد. اکنون اگر فضا بسیار زیاد باشد، این الکترون، سرگردان می‌شود و شاید برای سال‌ها نزدیک چیزی نمی‌رود. اما ندرتاً این الکترون به طرف یون برمی‌گردد و باهم ترکیب شده تشکیل اتم می‌دهند. بنابراین آهنگی که در آن الکترون‌ها از اتم‌ها بیرون می‌روند بسیار آهسته است. اما اگر حجم بسیار زیاد باشد، الکترونی که فرار کرده است برای پیدا کردن و ترکیب شدن با یون دیگر زمان زیادی صرف می‌کند که احتمال بازترکیب آن بسیار بسیار کوچک است؛ بنابراین، علی‌رغم انرژی اضافی زیاد مورد نیاز، ممکن است تعداد مناسبی الکترون وجود داشته باشد.

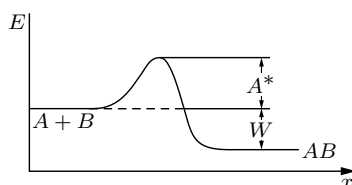
۴.۴۲ سینتیک شیمیایی^{۳۱}

وضعیت مشابه آنچه اکنون «یونش» نامیدیم در یک واکنش شیمیایی نیز یافته می‌شود. برای مثال، اگر دو شیء A و B ترکیب شده مرکب^{۳۲} AB را تشکیل دهند، آنگاه اگر کمی در مورد آن فکر کنیم می‌بینیم که AB چیزی است که ما اتم نامیدیم، B چیزی است که الکترون و A چیزی است که یون می‌نامیم. با این جایگزین‌ها شکل معادلات تعادل دقیقاً یکسان است:

$$\frac{n_A n_B}{n_{AB}} = ce^{-W/kT}. \quad (۹.۴۲)$$

^{۳۰} برخلاف اوایل همین بخش؛ در اینجا دیگر N در واحد حجم نیست، یعنی $n_i + n_a = N/V$ - مترجم -
^{۳۱} Chemical kinetics (شاخه‌ای از شیمی که به مطالعه‌ی آهنگ واکنش‌های شیمیایی و عوامل مؤثر بر آن‌ها می‌پردازد. - مترجم -)

^{۳۲} compound

۱.۴۲. وابستگی انرژی برای واکنش $A + B \rightarrow AB$.

البته این فرمول دقیق نیست، چون «ثابت» c بستگی دارد که چه حجمی برای ترکیب A و B مجاز است، و غیره. اما توسط استدلال‌های ترمودینامیکی می‌توان معنی W را در عامل نمایی مشخص نمود، و معلوم می‌شود که به انرژی مورد نیاز در واکنش بسیار نزدیک است.

سعی می‌کنیم این فرمول را به عنوان نتیجه‌ای از برخوردها درک کنیم، شبیه به روشی که فرمول تبخیر را درک کردیم، با استدلال درباره‌ی اینکه چه تعداد الکترون در واحد زمان بیرون رفتند و چه تعداد برگشتند. فرض کنید که A و B هر از گاهی در یک برخورد ترکیب می‌شوند تا تشکیل مرکب AB بدهند. و فرض کنید که مرکب AB یک مولکول پیچیده است که به اطراف جست و خیز می‌کند و توسط مولکول‌های دیگر ضربه خورده، و گاهی انرژی کافی می‌گیرد تا منفجر شده و دوباره به A و B شکسته شود.

در واقع معلوم شده که اگر در واکنش‌های شیمیایی، اتم‌ها با انرژی خیلی کمی نزدیک هم بیایند، این واقعیت که A و B ممکن است با یکدیگر تماس داشته باشند لزوماً باعث شروع واکنش نمی‌شود، ولو اینکه در واکنش $A + B \rightarrow AB$ انرژی آزاد شود. در واقع معمولاً لازم است که برخورد نسبتاً سخت باشد، تا واکنش اصلاً ادامه پیدا کند برخورد «نرم»^{۳۳} بین A و B ممکن است منجر به ادامه‌ی واکنش نشود، ولو اینکه در این فرایند انرژی آزاد شود. بنابراین فرض می‌کنیم که در واکنش‌های شیمیایی معمولاً برای این که A و B تشکیل AB دهند، کافی نیست به یکدیگر فقط ضربه بزنند، بلکه باید با انرژی کافی به یکدیگر ضربه بزنند. این انرژی، انرژی فعال‌سازی^{۳۴} نامیده می‌شود، انرژی مورد نیاز برای «فعال کردن» واکنش. انرژی فعال‌سازی را با A^* نشان می‌دهیم، انرژی اضافی مورد نیاز در یک برخورد به منظور اینکه واکنش واقعاً رخ دهد. بنابراین آهنگ R_f که در آن A و B ، AB را تولید می‌کنند؛ شامل تعداد اتم‌های A ضرب در تعداد اتم‌های B ، ضرب در آهنگی که در آن یک اتم منفرد به سطح مقطع معین σ_{AB} برخورد می‌کند، ضرب در عامل $e^{-A^*/kT}$ که احتمال این است که انرژی کافی داشته باشند می‌باشد:

$$R_f = n_A n_B v \sigma_{AB} e^{-A^*/kT}. \quad (۱۰.۴۲)$$

حال باید آهنگ مخالف R_r را پیدا کنیم. شانس معینی وجود دارد که AB تجزیه شود. به این منظور، نه تنها باید انرژی W را که اصلاً برای جدا شدن نیاز است داشته باشد، بلکه درست همانطور که مشکل بود A و B نزدیک هم بیایند، نوعی تپه وجود دارد که A و B باید از آن بالا روند تا دوباره از هم جدا شوند.

^{۳۳}“soft” collision^{۳۴}activation energy

آن‌ها نه فقط باید انرژی کافی برای جدا شدن داشته باشند، بلکه باید انرژی اضافی معینی داشته باشند. این مانند بالا رفتن از تپه برای رسیدن به یک دره‌ی عمیق است؛ آن‌ها باید از تپه بالا روند و سپس از دره پایین رفته به عقب برگردند (شکل ۱۰۴۲). بنابراین آهنگی که در آن AB به A و B تبدیل می‌شود متناسب است با تعداد n_{AB} که وجود دارند، ضرب در $e^{-(W+A^*)/kT}$:

$$R_r = c' n_{AB} e^{-(W+A^*)/kT}. \quad (11.42)$$

c' شامل حجم اتم‌ها و آهنگ برخوردها می‌شود، که می‌توانیم با داشتن مساحت‌ها و زمان‌ها و ضخامت‌ها محاسبه نماییم، همانطور که در مورد تبخیر انجام دادیم، اما این کار را نمی‌کنیم. ویژگی اصلی مورد علاقه‌ی ما وقتی است که این دو آهنگ برابر بوده، نسبت آن‌ها برابر با یک باشد. در این صورت مانند قبل $n_A n_B / n_{AB} = c e^{-W/kT}$ ، که در آن c شامل سطح مقطع‌ها، سرعت‌ها، و سایر عوامل مستقل از n ها است.

نکته‌ی جالب این است که آهنگ واکنش نیز به صورت $e^{-W/kT}$ مقدار ثابت^{۳۵} تغییر می‌کند، اگر چه این ثابت همان ثابت حاکم بر غلظت‌ها نبوده؛ انرژی فعال‌سازی A^* با انرژی W کاملاً متفاوت است. W حاکم بر نسبت‌های A ، B و AB است که در حالت تعادل داریم، اما اگر بخواهیم بدانیم $A + B$ با چه سرعتی به AB تبدیل می‌شود، این سوال مربوط به تعادل نیست، و در اینجا انرژی‌ای متفاوت، انرژی فعال‌سازی، از طریق یک عامل نمایی بر آهنگ واکنش حاکم می‌باشد.

علاوه بر این، A^* یک ثابت بنیادی مانند W نیست. فرض کنید که در سطح دیوار - یا در مکانی دیگر - A و B موقتاً به یکدیگر بچسبند به طوری که بتوانند به راحتی ترکیب شوند. به عبارت دیگر، ممکن است یک «تونل» از میان تپه پیدا کنیم، و یا شاید یک تپه‌ی کوتاه‌تر. بنابر پایداری انرژی، زمانی که به پایان مسیر می‌رسیم باز هم AB را از A و B بدست آورده‌ایم، بنابراین اختلاف انرژی W کاملاً مستقل از روش واکنش است، اما انرژی فعال‌سازی A^* بستگی بسیار زیادی به روشی که واکنش رخ می‌دهد دارد. به همین دلیل است که آهنگ‌های واکنش‌های شیمیایی به شرایط خارج بسیار حساس هستند. ما می‌توانیم آهنگ را با قراردادن در سطحی با نوع متفاوت تغییر دهیم، می‌توانیم آن را در یک «بشکه‌ی متفاوت»^{۳۵} قرار دهیم و اگر آهنگ واکنش به ماهیت سطح بستگی داشته باشد متفاوت خواهد بود. یا اگر در نوع سومی از شیء قرار دهیم ممکن است آهنگ را بسیار تغییر دهد. بعضی مواد به سادگی با تغییر کمی در A^* ، تغییرات زیادی در آهنگ ایجاد می‌کنند، این مواد کاتالیزور نامیده می‌شوند. ممکن است واکنشی عملاً رخ ندهد؛ زیرا A^* در دمای مفروض بیش از حد زیاد است، اما زمانی که در این ماده‌ی خاص کاتالیزور قرار دهیم، واکنش بسیار سریع انجام می‌شود، زیرا A^* کاهش می‌یابد.

ضمناً، در چنین واکنشی که A به علاوه‌ی B ، AB را تشکیل می‌دهند مشکلاتی وجود دارد، چرا که وقتی سعی می‌کنیم دو شیء را کنار هم بگذاریم تا تشکیل یک شیء پایدارتر بدهند انرژی و تکانه نمی‌توانند

³⁵different barrel

با هم پایسته بمانند. بنابراین، ما حداقل به یک شیء سوم C نیاز داریم، بنابراین واکنش واقعی بسیار پیچیده‌تر است. آهنگ پیشرفت شامل حاصل ضرب $n_A n_B n_C$ است، و ممکن است به نظر برسد که فرمول ما اشتباه است اما اینطور نیست! وقتی به آهنگی که در آن AB تجزیه می‌شود توجه می‌کنیم، درمی‌یابیم که این نیز مستلزم برخورد با C است به طوری که در آهنگ معکوس حاصل ضرب $n_A n_B n_C$ وجود دارد؛ پس n_C ها در فرمول غلظت‌های تعادل حذف می‌شوند. قانون تعادل، معادله‌ی (۹.۴۲)، که در ابتدا نوشتیم به صورت مطلقاً تضمین شده‌ای درست است، بدون توجه به اینکه سازوکار^{۳۶} واکنش ممکن است چه باشد!

۵.۴۲ قوانین تابش اینشتین^{۳۷}

اکنون به وضعیت مشابه جالبی که به قانون تابش جسم سیاه مربوط می‌شود برمی‌گردیم. در فصل گذشته قانون توزیع برای تابش در یک کاواک^{۳۸} را با در نظر گرفتن تابش از یک نوسانگر، به روشی که پلانک انجام داد به دست آوردیم. نوسانگر باید انرژی میانگین معینی داشته باشد، و چون در حال نوسان است تابش کرده و تابش دمش^{۳۹} را داخل کاواک نگه می‌دارد تا تابش کافی برای تعادل جذب و گسیل انباشته شود. در این روش متوجه شدیم که شدت تابش در بسامد ω با فرمول زیر داده می‌شود:

$$I(\omega) d\omega = \frac{\hbar \omega^3 d\omega}{\pi^2 c^2 (e^{\hbar \omega / kT} - 1)}. \quad (۱۲.۴۲)$$

این نتیجه مستلزم این فرض است که نوسانگر که تولید تابش می‌کند، ترازهای انرژی معین با فاصله‌های یکسان دارد. ما نگفتیم که نور باید فوتون یا هر چیزی شبیه به آن باشد. هیچ بحثی در مورد اینکه وقتی اتم از یک تراز به تراز دیگر می‌رود، چگونه انرژی باید در یک واحد از انرژی، $\hbar \omega$ ، به صورت نور خارج شود نکردیم. ایده‌ی اصلی پلانک این بود که ماده کوانتیده^{۴۰} است اما نور نیست: نوسانگرهای مادی نمی‌توانند هر انرژی را جذب کنند، بلکه انرژی باید بصورت بسته‌های کوچک مجزا باشد. علاوه بر این، مشکل این استنتاج این است که تا حدی کلاسیک است. ما آهنگ تابش از یک نوسانگر را بر اساس فیزیک کلاسیک محاسبه کردیم؛ پس از آن تجدید نظر کرده و گفتیم «نه، این نوسانگر ترازهای انرژی زیادی دارد». بنابراین، به منظور پیدا کردن نتیجه‌ی درست، نتیجه‌ای کاملاً مکانیک کوانتومی، به تدریج پیشرفت کردی که به مکانیک کوانتومی سال ۱۹۲۷ منجر شد وجود داشت. اما در این حین، تلاشی از جانب اینشتین برای تبدیل دیدگاه پلانک که فقط نوسانگرهای مادی کوانتیده هستند، به این ایده که نور واقعاً متشکل از فوتون‌هاست، و می‌تواند به روش خاصی به صورت ذرات با انرژی $\hbar \omega$ در نظر گرفته شود وجود داشت.

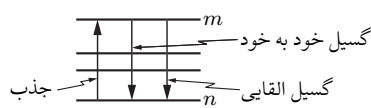
³⁶mechanism

³⁷Einstein's laws of radiation

³⁸cavity

³⁹pumping radiation

⁴⁰quantized



۲.۴۲. گذارهای بین دو تراز یک اتم.

علاوه بر این، بور اشاره کرده بود که هر سیستمی از اتم‌ها دارای ترازهای انرژی است، اما آن‌ها لزوماً مانند نوسانگر پلانک با فاصله‌های یکسان نیستند. بنابراین استنتاج دوباره یا حداقل بحث دوباره‌ی قانون تابش از دیدگاه کامل‌تر مکانیک کوانتومی لازم می‌شود.

اینشتین فرض کرد که فرمول نهایی پلانک درست بوده، و از این فرمول برای بدست آوردن اطلاعات جدیدی درباره‌ی برهم‌کنش تابش با ماده، که قبلاً ناشناخته بود، استفاده کرد. بحث او چنین بود: دو تراز دلخواه از ترازهای انرژی متعدد یک اتم، فرضاً ترازهای m و n را، در نظر بگیرید (شکل ۲.۴۲). اینشتین پیشنهاد کرد زمانی که نوری با بسامد درست به چنین اتمی می‌تابد، اتم می‌تواند این فوتون نور را جذب کرده و از تراز n به تراز m گذار^{۴۱} نماید. احتمال وقوع این اتفاق در هر ثانیه بستگی به این دو تراز دارد، اما متناسب با شدت نوری که روی آن می‌تابد می‌باشد. تناسب ثابت را B_{nm} می‌نامیم، صرفاً برای یادآوری اینکه این یک ثابت جهانی طبیعت نیست، بلکه بستگی به زوج خاص ترازها دارد: بعضی از ترازها به آسانی برانگیخته می‌شوند؛ بعضی به سختی. اکنون فرمول آهنگ گسیل از m به n چیست؟ اینشتین پیشنهاد کرد که این فرمول باید دو بخش داشته باشد. اول، حتی اگر نوری وجود نداشت، شانس وجود خواهد داشت که اتم در تراز برانگیخته با گسیل نور به تراز پایین‌تر فروافت کند؛ ما این را گسیل خود به خود^{۴۲} می‌نامیم. این مشابه این ایده است که یک نوسانگر با مقدار معینی انرژی، حتی در فیزیک کلاسیک، این انرژی را نگه نمی‌دارد، بلکه آن را با تابش از دست می‌دهد. بنابراین مشابه تابش خود به خود در سیستم کلاسیک این است که اگر اتم در یک تراز برانگیخته است احتمال معین A_{mn} ، که باز هم به ترازها بستگی دارد، برای پایین رفتن از m به n وجود دارد، و این احتمال از این که نور به اتم تابیده یا نه مستقل است. اما پس از آن اینشتین فراتر رفت، و با مقایسه با نظریه‌ی کلاسیک و استدلال‌های دیگر، نتیجه گرفت که گسیل با وجود نور نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد، یعنی وقتی نور با بسامد درست به اتم بتابد، اتم آهنگ افزایش یافته‌ی گسیل فوتون خواهد داشت که با ثابت تناسب B_{nm} ، متناسب با شدت نور است. اگر بعداً استنباط کنیم که این ضریب صفر است، یعنی اینشتین در اشتباه بوده است. البته خواهیم دید که حق با او بوده است.

بنابراین اینشتین فرض کرد که سه نوع فرایند وجود دارد: جذب، متناسب با شدت نور، گسیل، متناسب با شدت نور، که گسیل القایی^{۴۳} نامیده می‌شود، و گسیل خود به خود مستقل از نور.

اکنون فرض کنید که در حالت تعادل در دمای T ، تعداد معین N_n اتم در تراز n و تعداد N_m اتم در

⁴¹transition

⁴²spontaneous emission

⁴³induced emission or sometimes stimulated emission

تراز m داریم. پس تعداد کل اتم‌هایی که از n به m می‌روند برابرست با تعدادی که در تراز n هستند ضرب در آهنگ بالا رفتن از n به m در ثانیه. بنابراین فرمول زیر را برای تعدادی که در ثانیه از n به m می‌روند داریم:

$$R_{n \rightarrow m} = N_n B_{nm} I(\omega). \quad (۱۳.۴۲)$$

تعدادی که از تراز m به n می‌روند به همان روش بیان می‌شود. تعداد N_m که در تراز m هستند ضرب در شانس که هر اتم در ثانیه به تراز n پایین رود. این بار عبارت ما به صورت زیر است:

$$R_{m \rightarrow n} = N_m [A_{mn} + B_{mn} I(\omega)]. \quad (۱۴.۴۲)$$

اکنون فرض می‌کنیم که در تعادل گرمایی تعداد اتم‌هایی که بالا می‌روند باید با تعدادی که پایین می‌آیند برابر باشد. حداقل، این یک روشی است که در آن مطمئناً تعداد در هر تراز ثابت باقی می‌ماند.* بنابراین ما این دو آهنگ را در حالت تعادل برابر می‌گیریم. اما ما اطلاعات دیگری را هم داریم: می‌دانیم بزرگی N_m در مقایسه با N_n چقدر است – نسبت این دو برابر است با $e^{-(E_m - E_n)/kT}$. اکنون اینشتین فرض کرد که تنها نوری که در گذار از n به m مؤثر است نوری است که بسامدی متناظر با این اختلاف انرژی دارد، به طوری که در تمام فرمول‌های ما $E_m - E_n = \hbar\omega$ است. بنابراین:

$$N_m = N_n e^{-\hbar\omega/kT}. \quad (۱۵.۴۲)$$

پس اگر این دو آهنگ را برابر قرار دهیم: $N_m [A_{mn} + B_{mn} I(\omega)] = N_n B_{nm} I(\omega)$ ، و به N_m تقسیم کنیم، خواهیم داشت:

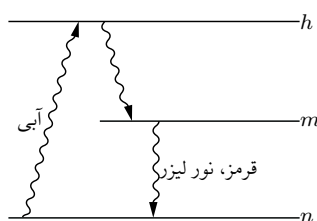
$$B_{nm} I(\omega) e^{\hbar\omega/kT} = A_{mn} + B_{mn} I(\omega). \quad (۱۶.۴۲)$$

از این معادله می‌توانیم I_ω را به سادگی محاسبه نماییم:

$$I(\omega) = \frac{A_{mn}}{B_{nm} e^{\hbar\omega/kT} - B_{mn}}. \quad (۱۷.۴۲)$$

اما پلانک قبلاً به ما گفته که این فرمول باید (۱۲.۴۲) باشد. از این رو می‌توانیم نتیجه بگیریم که B_{nm} باید برابر B_{mn} باشد، در غیر این صورت ما نمی‌توانیم به $(e^{\hbar\omega/kT} - 1)$ برسیم. بنابراین اینشتین بعضی از چیزهایی را که نمی‌دانست چگونه محاسبه نماید کشف کرد، یعنی اینکه احتمال گسیل القایی و احتمال

* این تنها روشی نیست که می‌توان ترتیب داد تا تعداد اتم‌ها در ترازهای مختلف ثابت بماند، اما روشی است که در واقع نتیجه می‌دهد. اینکه، در تعادل گرمایی، هر فرایند باید توسط متضاد دقیقش متعادل شود اصل تعادل دقیق (principle of detailed balancing) نامیده می‌شود.



۳.۴۲. با برانگیزش، مثلاً با نور آبی، به تراز بالاتر h ، که ممکن است یک فوتون گسیل کرده اتم‌ها را در تراز m باقی بگذارد، تعداد اتم‌ها در این تراز m به اندازه کافی بزرگ می‌شود تا کنش لیزر شروع شود.

جذب باید برابر باشند. این نتیجه جالب است. علاوه بر این، برای اینکه (۱۷.۴۲) و (۱۲.۴۲) مطابقت داشته باشند،

$$(۱۸.۴۲) \quad A_{mn}/B_{mn} \quad \text{باید} \quad \hbar\omega^3/\pi^2c^2 \quad \text{باشد.}$$

بنابراین اگر ما، برای مثال آهنگ جذب برای یک تراز معین را بدانیم، می‌توانیم آهنگ گسیل خود به خود و آهنگ گسیل القایی، یا هر ترکیبی را استنتاج کنیم.

اینشتین یا هر کس دیگری با استفاده از چنین استدلالی تا اینجا می‌توانست پیش رود. در واقع محاسبه‌ی آهنگ مطلق گسیل خود به خود و یا آهنگ‌های دیگر برای هر گذار اتمی خاص، البته نیاز به دانش ساختار اتم، که الکتروپدینامیک کوانتومی^{۴۴} نامیده می‌شود، دارد که تا یازده سال بعد کشف نشده بود. این کار اینشتین در سال ۱۹۱۶ انجام شد.

امروزه، امکان گسیل القایی، کاربردهای جالبی پیدا کرده است. اگر نور وجود داشته باشد، تمایل به القاء گذار رو به پایین دارد. اگر چند اتم در تراز بالایی قرار داشته باشند، این گذار انرژی $\hbar\omega$ را به انرژی موجود نور اضافه می‌کند. حال می‌توانیم، با نوعی روش غیر گرمایی، ترتیبی دهیم گازی داشته باشیم که در آن تعداد اتم‌هایی که در تراز m هستند بسیار بیشتر از تعدادی باشد که در تراز n هستند. این حالت دور از تعادل بوده، و بنابراین توسط فرمول $e^{-\hbar\omega/kT}$ ، که برای حالت تعادل است، داده نمی‌شود. ما حتی می‌توانیم ترتیبی دهیم که تعداد در تراز بالایی خیلی بزرگ باشد، در حالی که تعداد در تراز پایینی عملاً صفر است. بنابراین نوری که بسامدی متناظر با اختلاف انرژی $E_m - E_n$ دارد شدیداً جذب نمی‌شود، زیرا اتم‌های زیادی در تراز n نیستند تا آن را جذب کنند. از سوی دیگر، وقتی نور وجود داشته باشد، باعث گسیل القایی از این تراز بالایی خواهد شد! بنابراین، اگر تعداد زیادی اتم در تراز بالایی داشته باشیم، نوعی واکنش زنجیره‌ای وجود خواهد داشت، که در آن در لحظه‌ای که اتم‌ها شروع به گسیل می‌کنند، باعث گسیل بیشتر می‌شود و تمام آن‌ها با هم به پایین تخلیه می‌شوند. این چیزی است که لیزر^{۴۵}، و یا در مورد تابش

^{۴۴}quantum electrodynamics (الکتروپدینامیک کوانتومی (QED)، نظریه‌ی میدان کوانتومی نسبیتی الکتروپدینامیک است. این نظریه را دیراک، هایزنبرگ، پاولی و دیگران در اواخر دهه ۱۹۲۰ فرمول‌بندی کردند. در سال ۱۹۶۵ سه فیزیکدان از جمله «فاینمن» به خاطر تکمیل این نظریه موفق به کسب جایزه نوبل فیزیک شدند.

^{۴۵}laser

فروسرخ دور^{۴۶}، میزر^{۴۷} نامیده می‌شود.

برای قراردادن اتم‌ها در تراز m از ترفندهای مختلفی می‌توان استفاده کرد. ممکن است ترازهای بالاتری وجود داشته باشند که اگر باریکه‌ی شدید نور با بسامد بالا به اتم‌ها بتابانیم بتوانند به آن ترازها بروند. اتم‌ها ممکن است با گسیل فوتون‌های گوناگون از این ترازهای بالایی پایین روند، تا زمانی که همه‌ی آن‌ها در تراز m قرار گیرند. اگر آن‌ها تمایل به ماندن در تراز m بدون گسیل داشته باشند، این تراز شبه پایدار^{۴۸} نامیده می‌شود. سپس همه‌ی آن‌ها با هم با گسیل‌های القایی به پایین تخلیه می‌شوند. یک نکته‌ی فنی دیگر—اگر این دستگاه^{۴۹} را در یک جعبه‌ی معمولی قرار دهیم، در مقایسه با اثر القایی، بطور خود به خود در بسیاری از جهات متفاوت تابش می‌کند، که ما هنوز هم مشکل خواهیم داشت. اما ما می‌توانیم اثر القایی و بازده آن را با قرار دادن آینه‌های تقریباً کامل در هر طرف از جعبه، به طوری که نوری که گسیل می‌شود شانس مکرر دیگری داشته باشد تا گسیل بیشتری القا نماید، افزایش دهیم. اگرچه آینه‌ها تقریباً صد درصد بازتابنده‌اند، مقدار کمی تراگسیل^{۵۰} از آینه وجود دارد، و نور کمی خارج می‌شود. البته در پایان، به علت پایداری انرژی، تمام نور در یک مسیر مستقیم یکنواخت مطلوب بیرون رفته و باریکه‌های نور قوی‌ای را ایجاد می‌کند که همان لیزرهای امروزه می‌باشند.

⁴⁶far infrared

⁴⁷maser

⁴⁸metastable

⁴⁹system

⁵⁰transmission