

# مکانیک آماری

نویسنده:

آر. کی. پاتریا  
پائول دی. بیل

برگردان:

محمد بهتاج لجیینی - محمد کریمی

نیاز دانش

## مقدمه مترجمین

مکانیک آماری ابزار قدرتمندی است بر پایه مکانیک هامیلتونی و آمار ریاضی که بواسطه آن می‌توان خواص فیزیکی ماده در همه حالت‌های جامد، مایع و گاز را بر مبنای رفتار دینامیکی اجزاء سازنده میکروسکوپی تشریح نمود. دامنه شمول مکانیک آماری از این هم فراتر رفته و بررسی انواعی از سیستم‌های مواد از قبیل مواد چندفازی و نمونه‌های زیستی در همه حالت‌های تعادلی و غیر تعادلی نیز بوسیله آن فراهم شده است. بنابراین، با توجه به دامنه شمول و گسترده‌گی مفاهیم در مکانیک آماری به نظر می‌رسد که کسب دانش مکانیک آماری ولو در مفاهیم و مباحث بنیادی آن برای دانشجویان رشته فیزیک و رشته‌های مرتبط با آن حیاتی و ضروری باشد. این هدف در کتاب حاضر با بهره‌گیری از زبانی ساده و سلیس به نحوی که مفاهیم به طور مؤثری به خواننده منتقل شوند، دنبال شده است.

ویرایش‌های اول و دوم کتاب مکانیک آماری طی سال‌های ۱۹۶۶ و ۱۹۷۰ تهیه شدند. از آن زمان تا به اکنون بسیاری از مباحث کتاب دستخوش تغییر قرار گرفته و علاوه بر این، مفاهیم جدیدی نیز در زمینه مکانیک کوانتومی مطرح شده‌اند. از این‌رو، لزوم تهیه ویرایش سوم که در جهت رفع تقایص ذکر شده برآید کاملاً احساس می‌شود. بر این اساس، ویرایش سوم کتاب مکانیک آماری توسط آر.کی. پاتریا و با همکاری پائول دی. بیل در سال ۲۰۱۱ ارائه شد. اصلاحات و مفاهیم اضافه شده در ویرایش سوم پیشتر در مقدمه مؤلفین ذکر شده است. علاوه بر این، برای حفظ انسجام موضوعی در کتاب و نیز به منظور جلب علاقه خواننده، یک مقدمه تاریخی متشتمل بر تکامل تاریخی موضوع مکانیک آماری در ابتدای کتاب آورده شده است که در نوع خود ابتکاری و البته جالب توجه و جذاب می‌باشد. کتابشناسی و مراجع ارائه شده در انتهای کتاب نیز به نوبه خود می‌توانند به ویژه برای افرادی که مایل به ادامه تحصیلات در این زمینه باشند بسیار مضر ثمر باشد.

در نسخه ترجمه حاضر، ترجمه فصول ۱ تا ۸ به همراه مقدمه تاریخی، پیوست‌ها و کتابشناسی ارائه شده است. مفاهیم موجود در فصول ۱ تا ۸ عمده مباحث «ضروری» برای دوره آموزشی در مقطع کارشناسی ارشد را تشکیل می‌دهند. ارائه اشکال و نمودارهای مختلف همراه با مسائل متعدد در انتهای هر فصل، انتقال مطالب به خواننده و درک مؤثر مفاهیم را به طور فزاینده‌ای افزایش خواهد داد. هر چند ترجمه‌های مختلفی از کتاب حاضر ارائه شده است، با این وجود، به نظر می‌رسد که این امر از نقطه نظر انتقال مؤثر و بهتر مفاهیم، قیاس علمی و بومی‌سازی دانش در پیشبرد علم مکانیک آماری در بین دانشجویان و دانش‌پژوهان کشور بسیار مفید باشد. امید آنکه ترجمه حاضر گامی هر چند کوچک در جهت رشد و ارتقاء دانش مکانیک آماری در جامعه علمی و دانشگاهی کشور باشد.

در پایان، مترجمین بر خود لازم می‌دانند تا مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی کسانی که در ترجمه، ویرایش، تحریر، چاپ و عرضه این کتاب تلاش کرده‌اند، ابراز دارند.

بی‌شك اثر حاضر نیز عاری از اشتباه و اشکال نخواهد بود. پیشنهادات و نقطه نظرات سازنده شما می‌تواند ما را در ارتقاء کیفیت و رفع اشکالات احتمالی یاری دهد. لطفاً پیشنهادات و انتقادات خود را از طریق پست الکترونیک ([mkaarimi@gmail.com](mailto:mkaarimi@gmail.com)) با ما در میان بگذارید.

محمد بهتاج

محمد کریمی



## مقدمه‌ای بر ویرایش سوم

ویرایش دوم مکانیک آماری در سال ۱۹۹۶ منتشر شد. مطالب جدید اضافه شده در آن زمان بر گذار فاز، پدیده‌های حیاتی و گروه بازبینی‌جاردش تمرکز داشتند - موضوعاتی که در طول سال‌های پس از انتشار ویرایش نخست در سال ۱۹۷۲ متوجه دگرگونی‌های گسترده‌ای قرار گرفته بودند. در سال ۲۰۰۹، آر. کی. پاتریا (R.K.P.) و ناشران به توافق رسیدند که اکنون زمان آن فرا رسیده است تا تغییرات مهمی که از زمان انتشار نسخه دوم در این زمینه رخ داده است را در ویرایش سوم اعمال کنند و از پائول دی. بیل (P.D.B.) دعوت شد تا به عنوان نویسنده همکار به این مجموعه پیوندد. دو نویسنده در زمینه دامنه تغییرات به توافق رسیدند و P.D.B. نخستین پیش نویس بخش‌های جدید را تهیه نمود، به جز پیوست F که توسط R.K.P. نوشته شده بود. هر دو نویسنده با دقت بسیار کار کردند و پیش نویس‌ها را ویرایش نموند تا اینکه نسخه نهایی ویرایش سوم نیز آماده شد.

موضوعات جدید اضافه شده در این نسخه عبارتند از:

چگالش بوز-اینشتین و رفتار گاز فرمی تباهیده در گازهای اتمی فوق سرد: بخش ۲-۷، ۴-۸، ۱۱-الف و ۹-۱۱. خلق چگالیده‌های بوز-اینشتین در گازهای فوق سرد طی دهه ۱۹۹۰ و نیز در گازهای فرمی تباهیده طی دهه ۲۰۰۰ منجر به یک انقلاب در فیزیک اتمی، مولکولی و نوری شد و ارتباطی ارزشمند با رفتار کواتومی سیستم‌های چگال فرآهم نمود. چند تن از دوستان و همکاران P.D.B. در دانشگاه کلرادو، پیشتازان این عرصه علمی جدید و مهیج بوده و هستند.

رفتار مقیاس‌بندی اندازه-متناهی چگالیده‌های بوز-اینشتین: پیوست F. ما یک نظریه تحلیلی برای رفتار چگالیده‌های بوز-اینشتین در یک سیستم متناهی طرح کردیم که توجیهی قوی برای گزینش حالت پایه در محاسبه خواص چگالیده بوز-اینشتین فرآهم می‌آورد.

ترمودینامیک جهان اولیه : فصل ۹. سلسله تبدیلات ترمودینامیکی که جهان مدت کوتاهی پس از انفجار بزرگ متوجه شد، ردهایی بر جای گذاشت که متخصصین فیزیک نجومی از آن‌ها برای بررسی نخستین لحظات پیدایش جهان بهره می‌گیرند. پیشرفتهای عمده در علم نجوم طی ۲۰ سال گذشته، خیل عظیمی از داده‌های مبنی بر مشاهده را در مورد تکامل اولیه جهان فرآهم ساخته است؛ از آن جمله می‌توان به اندازه‌گیری‌های فضایی (خارج از منظومه شمسی) انبساط جهان بوسیله تلسکوپ فضایی هابل، اندازه‌گیری‌های دقیق دمای تابش ریزموج زمینه کیهانی بوسیله کاوشگر زمینه کیهانی و نگاشت تغییرات زاویه‌ای تابش زمینه کیهانی بوسیله پیشگر ناهمسانگردی ریزموجی ویلکینسون، اشاره کرد. این مجموعه داده به تعیین دقیق عمر جهان، ترکیب اجزاء سازنده آن و تکامل اولیه آن منجر شده‌اند. اتفاقاً، دفتر P.D.B. در برج جورج گاموف (عضو هیئت علمی دانشگاه کلرادو بین دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ و یکی از پیشتازان نظریه سنتز هسته‌ای در جهان اولیه) واقع شده است.

تعادل شیمیایی: بخش ۶-۶. پتانسیل شیمیایی شرایط لازم برای تعادل شیمیایی را تعیین می‌کند. این به نوبه خود نه تنها موضوع مهمی است بلکه نقش مهمی در مباحث مربوط به ترمودینامیک جهان اولیه مطرح شده در فصل ۹ دارد.

شبیه‌سازی‌های مونت کارلو و دینامیک مولکولی: فصل ۱۶. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری به ابزاری مهم در مکانیک آماری مدرن مبدل شده‌اند. در اینجا مقدمه‌ای کوتاه در مورد تکنیک‌ها و الگوریتم‌های مونت کارلو و دینامیک مولکولی ارائه شده است.

توابع همبستگی و پراکندگی: بخش ۷-۱۰. توابع همبستگی در درک فازهای ترمودینامیکی، گذار فاز و پدیده‌های حیاتی دیگر بسیار حائز اهمیت هستند. تفاوت‌های بین فازهای ترمودینامیکی اغلب در رفتار توابع همبستگی و ضربی ساختار ایستا مربوطه بروز می‌یابند. در ویرایش سوم، مباحثی از ویرایش دوم ضمن افزودن موضوعات جدید در یک جا جمع‌آوری شده‌اند.

قضیه نوسان- اتلاف و ضربی ساختار دینامیکی: بخش‌های ۳-۱۵-الف، ۶-۱۵-الف و ۶-۱۵-ب. قضیه نوسان- اتلاف رابطه بین نوسانات ترمودینامیکی تعادلی طبیعی در یک سیستم و پاسخ سیستم به اختلالات کوچک از حالت تعادل را توصیف می‌کند و یکی از شالوده‌های مکانیک آماری غیرتعادلی است. در اینجا، مبحث قضیه نوسان- اتلاف را به منظور شمول اشتتاقد نتایج کلیدی از نظریه پاسخ خطی (imbalance در مورد ضربی ساختار دینامیکی) و تحلیل حرکت برآونی نوسانگرهای هماهنگ که مثال‌های کاربردی مفیدی فرآهم می‌آورد، را بسط داده‌ایم.

تعادل فاز و معادله کلازیوس- کلابیرون: بخش‌های ۶-۴ و ۷-۴. بخش زیادی از متن به استفاده از روش‌های مکانیک آماری برای تعیین خواص فازهای ترمودینامیکی و گذارهای فاز اختصاص یافته است. این نوع بررسی اجمالی تعادل فاز و ساختار نمودارهای فازی، زمینه را برای مباحث بعدی مهیا می‌سازد.

جواب‌های دقیق مدل‌های سیال یک- بعدی: بخش ۱-۱۳. مدل‌های سیال یک- بعدی با برهمکنش‌های کوتاه برد، گذارهای فاز را نشان نمی‌دهند اما همبستگی کوتاه برد و دیگر رفتارهای خاص سیالات چگال را نمایش می‌دهند.

جواب دقیق مدل دو بعدی ایزینگ در یک شبکه متناهی: بخش ۴-۱۳-الف. این جواب مستلزم شمارش دقیق میکروحالتهای هنگرد میکروبندادی است و نتایج تحلیلی برای توزیع انرژی، انرژی درونی و گرمای ویژه سیستم ارائه می‌دهد. این جواب همچنین رفتار مقیاس‌بندی اندازه- متناهی مدل ایزینگ در نزدیکی نقطه گذار را توصیف نموده و چارچوبی دقیق فرآهم می‌آورد که می‌تواند برای آزمون روش‌های مونت کارلو مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تحلیلی برای توزیع انرژی، انرژی داخلی، و ظرفیت گرمایی از سیستم فرآهم می‌کند.

خلاصه مجموعه‌های ترمودینامیکی و هنگردهای آماری مرتبط: پیوست H. خلاصه‌ای از روابط ترمودینامیکی و ارتباطات آن‌ها با هنگردهای مکانیک آماری ارائه شده است. بیشتر این اطلاعات در قسمت‌های مختلف متن کتاب یافت می‌شوند اما ما دریافتیم که گرددآوری این اطلاعات در یک جا بسیار مفید خواهد بود.

مولدات اعداد شبه تصادفی: پیوست I. مولدات اعداد شبه تصادفی در شبیه‌سازی‌های کامپیوتری بسیار ضروری هستند. ما الگوریتم‌های ساده‌ای برای تولید اعداد شبه تصادفی یکنواخت و

گوسي ارائه کرده‌ایم و خواص آن‌ها را تشریح نموده‌ایم.  
دها مسئله و تکلیف.

بقیه متن تا حد زیادی بدون تغییر باقی مانده است.

تکمیل این کار مرهون خدمات بسیاری از دوستان و همکاران است. R.K.P. پیش از این در دو نوبت - سال ۱۹۷۲ و ۱۹۹۶ - قدردانی خود را از برخی اشخاص بیان داشته است، بنابراین، در حال حاضر نیز، او مجدداً مراتب تشکر خود را از افرادی که قبلاً نامبرده است، بیان می‌کند. هرچند علاوه بر این، او مایل است که مراتب سپاسگزاری خود را از پائول بیل مطرح کند به خاطر اینکه قبول کرد تا به عنوان شریک در این پروژه همکاری کند و همچنین به خاطر پشتکارش در انجام دقیق کارها و وظایف.

به نوبه خود، P.D.B. مایل است تا از دوستان خود در دانشگاه کلرادو در بولدر به خصوص نوئل کلارک، تام دی جراند، جان پرایس، چاک راجرز، مایک دابسون و لئو راجیوفسکی، به خاطر بحث‌ها و گفت و شنودهای زیادی که در طول سالیان تحقیق و آموزش در زمینه مکانیک آماری با آنها داشته است، قدردانی نماید. او همچنین مایل است تا از هیئت علمی گروه فیزیک به خاطر اینکه به او افتخار خدمت به عنوان رئیس این گروه برجسته را دادند، تشکر کند.

ما همچنین از دوستان و همکارانی که بخش‌های مختلف این کتاب را مطالعه نموده و پیشنهادات و تصحیحات ارزشمندی ارائه دادند، بویژه تام دی جراند، میشل شال، دیوید نسبیت، جیمی نگل، مت گلاسر، ماری هولاند، لئو راجیوفسکی، ویکتور گوراری، ادموند میر، متیو گرو، اندره سیزیلر، میشل فاس - فیگ، آلان فرانکلین، شانتا دی آلویز، دیمیتری رزنيک و اریک کرنل، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

P.D.B. مایل است تا از این فرصت استفاده کرده و از پروفسور مایکل ای. فیشر (کسی که واحد آموزشی مکانیک آماری تدریس شده توسط او در کورنل، پائول را با این رشته جالب آشنا ساخت) قدردانی نموده و بهترین‌ها را برای ایشان آرزومند باشد. او همچنین مایل است تا مراتب قدردانی خود را از راج پاتریا به خاطر دعوتش برای پیوستن به این پروژه و نیز گفتگوهای جالب و مفرحس طی تهیه این ویرایش جدید ابراز دارد. مشاوره‌ها و تدبیر اندیشمندانه راج همواره ثابت کرد که در ارتقاء بخشیدن به این کتاب بسیار ارزشمند است.

بیشترین تشکر P.D.B. تقدیم می‌شود به متیو، ملانی، و اریکا به خاطر محبت و حمایتشان.

R.K.P.  
P.D.B.

## مقدمه‌ای بر ویرایش دوم

ویرایش اول این کتاب طی سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۷۰ تهیه شد، زمانی که مبحث گذار فاز در حال یک نوع بازبینی کامل بود. مفاهیم مقیاس بندی و عمومیت تازه ریشه گرفته بودند اما رویکرد گروه بازبهنجارش که این مفاهیم را به یک ایزار محاسبات مبدل نمود، همچنان مبهم بود. جای تعجب نیست، کتاب من در آن زمان نتوانست عدالت را در بین این پیشرفت‌های نوظهور برقرار کند. در طول این سال‌ها، نوعی احساس آگاهی روزافروزی از کمبود نسبتاً جدی در متن کتاب در من پیدا شد؛ بنابراین، وقتی زمان تهیه ویرایش جدید فرا رسید، تلاش‌های جدی من بر تصحیح این کمبودها متمرکز شد.

با وجود نقایص مذکور، ویرایش اول این کتاب طی ۲۰ سال گذشته می‌رفت تا به نسخه‌ای عام پسند مبدل شود. بنابراین، تصمیم گرفتم تا آن را بی‌مورد تصحیح نکنم. با این وجود، برای افزودن موضوعات جدید، ناچار بودم تا برخی بخش‌ها را که احساس می‌کردم در مقایسه با سایر بخش‌ها چندان توسط خوانندگان مورد استفاده قرار نمی‌گرفت، از نسخه اول حذف کنم. این ممکن است تبدیل به یک ناممی‌دی برای بعضی از افراد شود اما من اطمینان دارم که آنها منطق پس این کار را درک می‌کنند و اگر لازم باشد به ویرایش اول به عنوان منبع، رجوع خواهد کرد. من به نوبه خود امیدوارم که اکثریت کاربران از چنین حذفیاتی ناراحت نشوند. در مورد مباحث حفظ شده، خودم را تنها به انجام تغییرات سر مقاله محدود کرده‌ام. مبحث گذار فاز و پدیده‌های بحرانی، که تمرکز اصلی من در تجدید چاپ بوده است، در سه فصل جدیدی مورد بحث قرار گرفته است که پوشش مناسب موضوع را فرآهم آورده و اساساً به بررسی شدن کتاب خواهد انجامید. به اعتقاد من، این فصل‌ها همراه با مجموعه‌ای متشكل از بیش از ۶۰ مسئله، سودمندی کتاب را برای هم دانشجویان و هم مدرسین ارتقاء خواهد بخشید.

تکمیل این کار مرهون خدمات افراد زیادی است. اول از همه، همان طور که در «مقدمه‌ای بر ویرایش اول» گفته شده، این کار مرهون کسانی است که قبلًا در مورد این موضوع تأثیراتی داشته‌اند و ویرایش حاضر از نوشتۀ‌های آنان تا حد زیادی بهره‌مند شده است. بسیار دشوار است تا از تک تک آن‌ها قدردانی به عمل آید؛ کتابشناسی در پایان این کتاب تکریم آشکاری خواهد بود بر زحمات و تلاش‌های آنان. بیشترین قدردانی و سپاسگزاری من از دکتر سورجیت سینگ به خاطر کمک‌های فراوان ایشان می‌باشد، کسی که استادانه من را رهنمون ساخت و سخاوتمندانه در انتخاب مباحث فصل‌های ۱۱ تا ۱۳ در نسخه جدید، بنده را یاری نمود. بدون کمک ایشان، ممکن بود کتاب هرگز به انسجام و یکپارچی فعلی نباشد. از جنبه فنی، از خانم دبی کونتر که زحمت تحریر این کتاب را با مهارت و دقت استثنائی متقبل شدند، بسیار سپاسگزارم؛ کار او به وضوح بسیار دشوار بود اما ایشان به خوبی از عهده انجام آن برآمدند - به این خاطر، بنده ایشان را بسیار می‌ستایم.

در خاتمه، مایلم تا مراتب تشکر و قدردانی صمیمانه خود را از همسرم ابراز دارم، کسی که اجازه داد تا من طی یک دوره زمانی طولانی خود را به طور کامل وقف این وظیفه خطیر نمایم و بدون هرگونه اکراه به انتظار تکمیل آن نشست.

## مقدمه‌ای بر ویرایش اول

این کتاب برآمده از نکات موجود در سخنرانی‌ها و نطق‌هایی است که من در دانشگاه مک‌مستر (۱۹۶۴-۱۹۶۵)، دانشگاه آلبتا (۱۹۶۵-۱۹۶۷)، دانشگاه واترلو (۱۹۶۹-۱۹۷۱) و دانشگاه ویندزور (۱۹۷۰-۱۹۷۱) برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی ارائه داده‌ام. هرچند که موضوع اصلی آن، در جزئیات دقیق‌تر خود، تا حد قابل توجهی در طول آماده‌سازی کتاب تغییر کرده است، با این وجود، سبک ارائه آن با سخنرانی‌ها یکسان باقی مانده است.

مکانیک آماری ابزاری ضروری برای مطالعه خواص فیزیکی ماده «به صورت بالک» بر مبنای رفتار دینامیکی اجزاء سازنده «میکروسکوپی» آن است. این یک اصل اثبات شده است که رویکرد مکانیک آماری که از یک سو بر اصول آمار ریاضی و از سوی دیگر بر مبنای مکانیک هامیلتونی استوار است، از ارزش‌والایی برای فیزیک در ۱۰۰ سال گذشته برخوردار بوده است. با توجه به فraigیری آن، کسب دانشی پایه در این موضوع برای هر دانشجوی فیزیک، صرفه‌نظر از زمینه تخصصی مورد نظر دانشجو، ضروری است. تأمین این دانش، به طریقی که ماهیت موضوع را با دقت بجا اما بدون زحمت نابجا به ارمغان بیاورد، هدف اصلی این کار است.

واقعیت این است که دینامیک یک سیستم فیزیکی بوسیله مجموعه‌ای از حالت‌های کوانتمی و این ادعا که «ترمودانیمیک سیستم بوسیله چندگانگی این حالت‌ها تعیین می‌شود»، نشان داده می‌شود. ارتباط اساسی بین توصیفات میکروسکوپی و مکروسکوپی یک سیستم با بررسی شرایط تعادل بین دو سیستم فیزیکی در تماس ترمودینامیکی کشف می‌شود. این مهم با کار در جوهره نظریه کوانتمی درست از همان آغاز به بهترین وجه محقق می‌شود؛ پس از آن، آنتروپی و سایر متغیرهای ترمودینامیکی سیستم به بدیهی ترین شیوه قابل استنتاج هستند. پس از طرح این رویکرد، می‌توان (در صورتی که شرایط اجازه دهد) به حد آمار کلاسیک پرداخت. این پیام ممکن است جدید نباشد، اما من در اینجا تلاش کرده‌ام تا آنجا که در یک کتاب ممکن باشد، آن را دنبال کنم. در انجام این کار، تلاش شده است تا سطح ارائه به صورت نسبتاً یکنواخت حفظ شود به طوری که خواننده با نوسانات زیادی مواجه نخواهد شد.

این کتاب که محدود به مطالعه حالات تعادلی سیستم‌های فیزیکی است برای استفاده در دوره کارشناسی ارشد مکانیک آماری در نظر گرفته شده است. در این عرصه، پوشش مطالب نسبتاً گسترده بوده و مباحث کافی برای سازماندهی یک دوره آموزشی دو ترمه فرآهنم است. انتخاب نهایی همیشه با مدرس است. من، شخصاً، فصل‌های ۱ تا ۹ (منهای چند بخش در این فصل‌ها و به علاوه چند بخش در فصل ۱۳) را «بخش ضروری» این دوره آموزشی می‌دانم. مباحث فصل‌های ۱۰ تا ۱۲ نسبتاً پیشرفت‌نه (و نه لزوماً دشوار) هستند؛ انتخاب مطالب خارج از این فصل‌ها کاملاً به سلیقه مدرس بستگی دارد. به منظور تسهیل در فهم موضوع، متن با تعداد زیادی نمودار تشریح شده است. همچنین برای ارزیابی میزان درک مطالب توسط خواننده، مسائل متعددی در کتاب گنجانده شده است. به امید آنکه که این خصایص مفید واقع شوند.

احساس می‌کنم که یکی از اساسی‌ترین جنبه‌های آموزش، تحریک کردن حس کنجکاوی دانشجویان در موضوع است، و یکی از مؤثرترین راه‌ها برای انجام این کار، مباحثه با آنها (البته در حد منطقی) در مورد شرایط و مطالبی است که به خلق موضوع منجر می‌شود. بنابراین، برخی اوقات ممکن است شخصی مایل باشد تا در خلال متن برای پرداختن به تحولات مختلفی که در بازه‌های زمانی مختلف روی داده‌اند، وقفه‌هایی در متن اصلی ایجاد شود. در عین حال، برخی ممکن است دوست نداشته باشند که جریان متن کتاب با وقفه‌ها و نایپوستگی‌هایی ناشی از افزودن مباحثت تاریخی در خلال متن مختلط شود. بر این اساس، تصمیم گرفتم تا یک مقدمه تاریخی به این موضوع که جدا از متن اصلی است، اضافه کنم. من مطمئن هستم که خوانندگان و بویژه استاتید به آن علاقه پیدا می‌کنند. برای کسانی که مایل به ادامه تحصیل در زمینه مکانیک آماری فراتر از محدوده این کتاب هستند، یک کتابشناسی نسبتاً گسترده در این کتاب ارائه شده است. این کتابشناسی شامل انواعی از منابع قدیمی و جدید، تجربی و نظری، فنی و آموزشی است. با آن امید که این اقدام کتاب را مفیدتر ساخته و دامنه خوانندگان آن را گسترده‌تر سازد.

تمکیل این کار مرهون زحمات افراد بسیاری است. همچون بسیاری از نویسنده‌گان، من خود را مدیون کسانی می‌دانم که قبلاً در مورد این موضوع نوشتگاتی داشته‌اند. کتابشناسی در پایان کتاب ادای احترامی است به این افراد. با این حال، مایلم تا به طور خاص، آثار ارنفسن، فاولر، گوگنهايم، شرودينگر، راشبروک، تر هار، هیل، لاندا و لیفشتیتز، هوانگ و کوبو را ذکر کنم که برای سالیان متعددی به عنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به طرق مختلف در فهم من از موضوع مؤثر بوده‌اند. من همچنین خود را مرهون زحمات را بر تشبیما که بیشتر نمودارها را ترسیم و اکثر مسائل را بررسی نمود، راویندار بانسال، ویشاوا میتار و سورجیت سینگ که کل متن را مرور کرده و پیشنهاداتی ارائه دادند که گره از برخی نکات گشود، ماری آنتس که متن را با صبر، تلاش و دقت استثنای تایپ نمود، فرد هتلز، جیم بریانته و لری کرای که در طول آماده سازی نسخه نهایی کمک‌های فنی به من ارائه داد، می‌دانم.

در طول پیشرفت این کار، من همواره خود را قدردان اساتید اف. سی. اولاک و دی. اس. کوتاری از دانشگاه دهلي تو می‌دانستم، کسانی که من حرفه خود را با آنها آغاز کردم و آنها بودند که مرا به تحصیل در این موضوع تشویق نمودند، و پروفسور آر. سی. ماجومدر که علاقه بسیاری به کار من در این موضوع و سایر پژوهش‌هایی که در مقاطع زمانی مختلف عهده‌دار می‌شدم، نشان می‌داد. از دکتر دی. تر هار از دانشگاه آکسفورد که به عنوان ویراستار این سری، مشاوره‌های ارزشمندی در مورد جنبه‌های مختلف تهیه متن و چند پیشنهاد مفید نیز در جهت بهبود متن ارائه نمود، سپاسگزارم. از اساتید جی. دبلیو. لیچ، جی. گریندلی و ای. دی. سینگ ناگی از دانشگاه واترلو به خاطر ابراز احساسات و علاقه‌شان که پیمودن این راه طولانی را بر من خوشایند نمود، متشکرم.

ادای احترام آخر نثار همسرم به خاطر همکاری و تفاهم او در تمامی مراحل این پژوهه و در برابر تمام مشکلات.

## مقدمه تاریخی

مکانیک آماری رویکردی است با هدف توضیح خواص فیزیکی ماده در حالت بالک بر مبنای رفتار دینامیکی اجزاء میکروسکوپی تشکیل دهنده آن. هدف این رویکرد تقریباً به نامحدودی گستره پدیده‌های طبیعی است، به همین خاطر، این رویکرد در اصل در هر حالتی از ماده قابل کاربرد است. این رویکرد، در واقع، به منظور مطالعه مواد در حالت جامد، مایع و یا حالت گازی، مواد مت Shank از چند فاز و/یا اجزای مختلف، مواد تحت شرایط چگالی و دمای بسیار بالا، مواد در تعادل با تابش (به عنوان مثال، در فیزیک نجومی)، مواد در قالب نمونه‌های زیستی و غیره با موقفيت بالايی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر اين، رویکرد مکانیک آماری ما را قادر به بررسی حالات غیرتعادلی و تعادلی ماده می‌سازد؛ در واقع، اين بررسی‌ها ما را در درک شیوه‌ای که يك سیستم فیزیکی در زمان معین  $t$  «خارج از تعادل» بوده و با گذشت زمان به سمت «حالتي از تعادل» ميل می‌كند، ياري می‌دهند.

صرف‌نظر از مراجع ابتدائي، از قبيل گاسندي، هوک و غيره، کار واقعي بر روی موضوع مکانیک آماري با ژرف انديشي‌های برنولي (۱۷۳۸)، هراپات (۱۸۲۱) و ژول (۱۸۵۱) آغاز شد که هر يك به روش‌های منحصر به خود، اقدام به پي‌ريزی شالوده‌ای برای نظریه جنبشی گازها نمودند، رشته‌ای که در نهايیت به طلایه‌دار مکانیک آماری مبدل شد. کار پيشگام اين محققان اين اصل را بنا نهاد که فشار يك گاز ناشی از حرکت مولکول‌های آن است و بنابراین، با لحاظ تأثير ديناميکي بمباران مولکولي دیوارهای ظرف قابل محاسبه می‌باشد. از اين‌رو، برنولي و هراپات توانيتند نشان دهند که، اگر دما ثابت باقی بماند، فشار  $P$  يك گاز معمولی به طور معکوس با حجم  $V$  ظرف متناسب است (قانون بویل)، و اين‌که فشار اساساً مستقل از شکل ظرف است. البته اين قانون مشتمل بر اين فرض صريح و روشن بود که، در يك دمای  $T$  معين، سرعت (متوسط) مولکول‌ها مستقل از فشار و حجم است. برنولي حتی به تعیین تصحیح (مرتبه اول) اين قانون، ناشی از اندازه متناهي مولکول‌ها، همت گمارد و نشان داد که عبارت حجم  $V$  موجود در اين قانون باید بوسيله عبارت  $(V-b)$  جايگزين شود، که در آن  $b$  حجم «واقعي» مولکول است.<sup>۱</sup>

ژول نخستین کسی بود که نشان داد، فشار  $P$  به طور مستقيم با مربع سرعت مولکولی  $c$  (که او در ابتدا فرض کرده بود برای تمام مولکول‌ها يكسان است) متناسب است. کرونیگ (۱۸۵۶) گام را فراتر نهاد. او با معرفی اين فرض «شبه آماری» که، در هر زمان  $t$ ، يك-ششم مولکول‌ها می‌توانند در هر يك از شش جهت «مستقل»، يعني  $+x$ ،  $-x$ ،  $+y$ ،  $-y$ ،  $+z$  و  $-z$  استقرار يابند، معادله زير را بدست آورد:

$$P = \frac{1}{3} n m c^2 \quad (1)$$

<sup>۱</sup> همانطور که می‌دانیم، اين «تصحیح» توسط واندروالس (۱۸۷۳) بدرستی تعیین شد؛ او نشان داد که به ازاي حجم بزرگ  $V$ ،  $b$  چهار مرتبه بزرگتر از حجم «واقعي» مولکول است؛ مسئله ۴-۱ را ملاحظه نمائيد.

که در آن  $n$  چگالی عددی مولکول‌ها و  $m$  جرم مولکولی است. کرونیگ همچنین فرض نمود که سرعت مولکولی  $c$  برای همه مولکول‌ها یکسان است، بنابراین، او از روى معادله (۱) نتیجه گرفت که انرژی جنبشی مولکول‌ها مى‌بايست به طور مستقیم با دمای مطلق گاز متناسب باشد.

کرونیگ روش خود را در اين جملات توجيه نمود: «احتمالاً مسیر هر مولکول بسيار نامنظم است به طوري که تلاش بسيار زيادي را برای محاسبه مى‌طلبيد. با اين حال، با توجه به قوانين احتمال، مى‌توان يك حرکت کاملاً منظم را به جاي يك حرکت کاملاً نامنظم فرض نمود!» علی رغم اين، باید توجه داشت که اين تنها به دليل شکل ويزه عمليات جمع‌زنی در محاسبه فشار است که استدلال کرونیگ منجر به همان نتيجه‌اي مى‌شود که از مدل‌های بيشتر اصلاح شده منتج مى‌شوند. در مسائل ديگر، از جمله مسائل مربوط به نفوذ، گرانروي یا هدايت گرمابي، اين استدلال ديگر معتبر نخواهد بود.

در اين مرحله بود که کلازيوس به عرصه وارد شد. اول از همه، در سال ۱۸۵۷، او قانون گاز ايده‌آل را تحت مفروضات به مراتب كمتر سخت‌گيرانه‌تر از مفروضات کرونیگ بدست آورد. او از هر دو فرض اصلی کرونیگ صرفه‌نظر کرد و نشان داد که معادله (۱) همچنان صدق مى‌كند؛ البته، در اينجا <sup>۱</sup> ميانگين توان دوم سرعت مولکول‌ها خواهد بود. در مقاله بعدی در سال ۱۸۵۹، کلازيوس مفهوم پويش آزاد ميانگين را معرفی نمود و در نتيجه نخستين کسی بود که پديده انتقال را تحليل نمود. در اين مطالعات بود که او فرضيه معروف "Stosszahlansatz" (بر مبنای شمار برخوردها بين مولکول‌ها) را معرفی نمود، که بعدها، نقش برجسته‌ای در کار به ياد ماندنی بولتزمن ايفا کرد.<sup>۱</sup> با وجود کلازيوس، ورود ديدگاه‌های ميكروسکوپي و آماري در نظریه فيزيکي، قطعي بود. بر اين اساس، ماكسول، در مقاله معروف خود تحت عنوان «مولکول‌ها» که آن را برای Britannica Encyclopedia نوشت، از کلازيوس به عنوان «بنيانگذار اصلی نظریه جنبشی گازها» ياد کرد، در حالی که گيبس، در آگهی در گذشت کلازيوس، او را «پدر مکانيك آماري» خواند.<sup>۲</sup>

كار کلازيوس، نظر ماكسول را به اين حوزه جلب نمود. او اولين حضور خود را با يادداشت «مثال‌های در نظریه دیناميکی از گازها» (۱۸۶۰) به ثبت رساند، که در آن، او با استنتاج قانون معروف خود يعني «توزيع سرعت‌های مولکولی»، پا را بسيار فراتر از پيشينيان خود نهاده بود. روابط ماكسول بر مبنای اصول اوليه احتمال بودند و به طور واضح، از قانون گاوسي «توزيع خطاهای تصادفي» الهام گرفته بودند. يك رابطه بر اساس اين شرط که «وقتی يك بار توزيع تعادلي سرعت‌های مولکولی بدست آورده شد، مى‌بايست تحت شرایط برخوردهای مولکولی ثابت باقی بماند»، در سال ۱۸۶۷ ارائه شد. اين ماكسول را بر آن داشت تا آنچه که امروز تحت عنوان «معادله انتقال ماكسول» شناخته شده است را طرح کند، معادله‌اي که اگر ماهرانه استفاده شود، همان نتایجي را بدست خواهد

<sup>۱</sup> برای مروی عالی بر اين موضوع و مباحث مرتبط، مرجع ارنفست و ارنفست (۱۹۱۲) را ملاحظه نمائید.

<sup>۲</sup> برای جزئيات بيشتر، رجوع شود به مرجع مونترول (۱۹۶۳) که در آن، گزارشي از کار پيشگام واترستون (۱۸۴۶)، (۱۸۹۲) نيز ارائه شده است.

داد که در صورت استفاده از معادله بنیادی‌تر بولتزمن قابل استحصال هستند.<sup>۱</sup>

همکاری‌های ماکسول در این عرصه پس از انتسابش به عنوان Cavendish Professor در کمبریج در سال ۱۸۷۱، بطور قابل توجهی کاهش یافت. در آن زمان بولتزمن، تازه اولین گام‌های خود را در این زمینه برداشته بود. در دوره زمانی ۱۸۶۸–۱۸۷۱، او قانون توزیع ماکسول را به گازهای چند اتمی تعمیم داد، همچنین اثر نیروهای خارجی (در صورت وجود) را منظور نمود؛ این کار به معرفی ضریب معروف بولتزمن یعنی  $\exp(-\beta E)$  انجامید که در آن،  $E$  بیانگر انرژی کل یک مولکول است. این تحقیقات همچنین به ارائه قضیه هم‌بخشی منجر شد. علاوه بر این، بولتزمن نشان داد که درست مانند توزیع اصلی ماکسول، توزیع تعمیم یافته (که امروز ما آنرا توزیع ماکسول–بولتزمن می‌خوانیم) نسبت به برخوردهای مولکولی، ایستا است.

در سال ۱۸۷۲ قضیه معروف  $H$  مطرح شد، که یک مبنای مولکولی برای گرایش طبیعی سیستم‌های فیزیکی به میل کردن (و باقی ماندن) به سمت یک حالت تعادلی فرآهن می‌آورد. این یک ارتباط بسیار شفاف‌تر از قبل بین رویکرد میکروسکوپی (که مشخصه مکانیک آماری است) و رویکرد پدیده شناختی (که مشخصه ترمودینامیک بود) ایجاد نمود؛ همچنین یک روش مستقیم برای محاسبه آنتروپی یک سیستم فیزیکی معین از روی بررسی‌های کاملاً میکروسکوپی ارائه می‌دهد. به عنوان نتیجه‌ای فرعی از قضیه  $H$ ، بولتزمن نشان داد که توزیع ماکسول–بولتزمن تنها توزیعی است که تحت شرایط برخورد مولکولی بدون تغییر باقی می‌ماند و هر توزیع دیگر تحت تاثیر برخوردهای مولکولی در نهایت به یک توزیع ماکسول–بولتزمن می‌رسد. در سال ۱۸۷۶، بولتزمن معادله انتقالی معروف خود را بدست آورد که بعدها توسط چاپمن و انسگوک (۱۹۱۶–۱۹۱۷) ثابت شد که این معاله ابزاری بسیار توانمند برای بررسی خواص ماکروسکوپی سیستم‌ها در حالت‌های غیر تعادلی است.

با این وجود، شرایط برای بولتزمن بسیار بد پیش رفت. قضیه  $H$  او و برآیند آن (رفتار برگشت‌ناپذیر سیستم‌های فیزیکی) بویژه از سوی لاشمیت (۱۸۷۶–۱۸۷۷) و زرملو (۱۸۹۶) مورد انتقادات و حملات شدیدی قرار گرفت. در حالی که لاشمیت، از این بسیار متعجب بود که چگونه نتایج این قضیه می‌توانند با خصلت برگشت‌پذیر معادلات اساسی حرکت مولکول‌ها قابل انطباق باشند، تعجب زرملو بیشتر به این خاطر بود که چگونه این نتایج می‌توانند با رفتار شبه‌تناوی سیستم‌های بسته (که اصلاحاً از چرخه‌های Poincaré نشأت می‌گیرد) همخوانی داشته باشند. بولتزمن در برابر این انتقادات با تمام توان از خود دفاع کرد، اما متأسفانه، نتوانست مخالفان خود را نسبت به درستی دیدگاهش متقاعد کند. در همان زمان، متخصصان انرژی و انرژی دانان به رهبری مج و استوالد در حال نقادی مبانی نظریه جنبشی بودند،<sup>۲</sup> در حالی که کلوین بر این تأکید داشت که «ابرهای قرن

<sup>۱</sup> این تعادل در مرجع گوگنهیم (۱۹۶۰) که در آن، ضرایب گرانروی، هدایت گرمایی و نفوذ یک گاز متشکل از کره‌های سخت بر مبنای معادله انتقال بولتزمن محاسبه شده است، نشان داده شده است.

<sup>۲</sup> این نقادان توسط اینشتین، کسی که بر روی حرکت براونی کار می‌کرد (۱۹۰۵ b) و نظریه اتمی را یک بار و برای همه طرح نمود، ساكت شدند.

نوزدهم بر سر نظریه دینامیکی نور و گرما سایه افکنده‌اند».<sup>۱</sup>

همه این اتفاقات بولتزمن را در حالتی از نامیدی فرو برد و نوعی درماندگی آزاردهنده در وی القاء نمود.<sup>۲</sup> او در مقدمه جلد دوم رساله خود تحت عنوان Vorlesungen über Gastheorie (۱۸۹۸) می‌نویسد:<sup>۳</sup>

من معتقدم که انتقادات (بر نظریه جنبشی) نوعی سوء تفاهم است و نقش نظریه جنبشی هنوز ایفا نشده است. به عقیده من، اگر مخالفت‌های امروزی بر آنند تا نظریه جنبشی به دست فراموشی سپرده شود، همچون نظریه موجی نور که بواسطه نیوتن به آن سرنوشت دچار شد، این می‌تواند ضربه و تقصانی به علم وارد کند. من از ضعف شخص در برابر جریان عقاید عمومی آگاه هستم. برای حصول اطمینان از اینکه وقتی مردم به مطالعه نظریه جنبشی برگردند، درک مجدد آن توسط آنان زیاد به طول نخواهد انجامید، من دشوارترین و نامفهوم‌ترین بخش‌های این موضوع را به واضح‌ترین شیوه‌ای که می‌توانم ارائه خواهم نمود.

بیش از این نباید به نظریه جنبشی پیردازیم؛ در عوض، در ادامه به چگونگی ظهور رویکرد پیچیده‌تر یعنی نظریه هنگرد و در واقع به تعبیری مناسب‌تر، نظریه مکانیک آماری، خواهیم پرداخت.<sup>۴</sup> در این رویکرد، حالت‌های دینامیکی یک سیستم معین، همانطور که بوسیله مختصات تعیین یافته  $q_i$  و  $p_i$  و تکانه‌های تعیین یافته  $p_i$  مشخص می‌شوند، بوسیله یک نقطه فازی ( $G(q_i, p_i)$  در یک فضای فازی با بعد مناسب نشان داده می‌شوند. تکامل حالت‌های دینامیکی بوسیله خط سیر یا مسیر  $G$  در فضای فازی به تصویر کشیده می‌شود، «هنده» این مسیر نیز بوسیله معادلات حرکت سیستم و ماهیت محدودیت‌های فیزیکی تحمیل شده بر آن تعیین می‌شود. به منظور توسعه یک رویکرد مناسب، یک سیستم معین همراه با تعداد نامتناهی از «رونوشت‌های ذهنی» متعلق به آن را در نظر می‌گیرند؛ که همان هنگردی از سیستم‌های مشابه تحت محدودیت‌های فیزیکی یکسان است (هر چند، در هر زمان  $t$ ، سیستم‌های مختلف در این هنگرد از نظر حالت‌های دینامیکی تا حد زیادی با هم تفاوت دارند). پس، در فضای فازی، انبوهی نامتناهی از نقاط  $G$  وجود خواهد داشت (که در هر زمان  $t$ ، به طور گسترده‌ای پراکنده شده‌اند و با گذشت زمان، در امتداد مسیر مربوط به خود حرکت می‌کنند). تصور یک گروه متشکل از تعداد نامتناهی سیستم یکسان اما مستقل، اجازه می‌دهد تا فرض‌های مشکوک نظریه جنبشی گازها را با عبارات و روابط قابل قبول مکانیک آماری جایگزین کنیم. فرمولاسیون صریح این عبارات نخستین بار توسط ماکسول (۱۸۷۹) انجام شد، کسی که در آن برره زمانی از واژه «برای توصیف و مطالعه هنگردها (مت Shankle از سیستم‌های گازی) بهره گرفت

<sup>۱</sup> ابر اول مربوط به رموز «اثیر» بود و طلسم آن بوسیله نظریه نسبیت باطل شد. ابر دوم مربوط به نارسایی «قضیه هم-بحشی» بود و بوسیله نظریه کوانتمی برطرف شد.

<sup>۲</sup> برخی خودکشی بولتزمن در ۵ سپتامبر ۱۹۰۶ را به این علت دانسته‌اند.

<sup>۳</sup> به نقل از مونتول (۱۹۶۳).

<sup>۴</sup> برای مروری بر تکامل تاریخی نظریه جنبشی مختوم به مکانیک آماری، مراجع براش (۱۹۵۷، ۱۹۵۸، ۱۹۶۱a,b)، (۱۹۶۵-۱۹۶۶) را ملاحظه نمائید.

(هر چند، هشت سال قبل از آن، بولترمن (۱۸۷۱) اساساً با همان نوع از هنگردها کار کرده بود). مهمترین کمیت در نظریه هنگرد، تابع چگالی،  $t(q_i, p_i)$  برای نقاط  $G$  در فضای فازی است. یک توزیع ایستا  $(\rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0)$  مشخصه یک هنگرد ایستا است، که آن هم به نوبه خود بیانگر یک سیستم در حالت تعادل می‌باشد. ماکسول و بولترمن، مطالعه خود را به هنگردهایی منحصر کردند که در آن‌ها، تابع  $\rho$  تنها به انرژی  $E$  سیستم بستگی دارد. این مشتمل بر حالت خاصی به نام سیستم‌های ارگودیک است که بدین صورت تعریف شده‌اند، «حرکت مختلط نشده چنین سیستمی (اگر برای زمان نامحدودی دنبال شود) نهایتاً (از مجاورت) هر نقطه فازی سازگار با مقدار انرژی ثابت  $E$  گذر خواهد کرد». در نتیجه، میانگین هنگرد،  $\langle f \rangle$ ، کمیت فیزیکی  $f$  که در هر زمان معین  $t$  اتخاذ می‌شود، با میانگین دراز-مدت یعنی  $\bar{f}$  (مربوط به هر عضو مشخص از هنگرد) برابر خواهد بود. در اینجا،  $\bar{f}$  مقداری است که انتظار می‌رود که در هنگام انجام یک محاسبه مناسب بر روی سیستم، برای کمیت مورد نظر بدست آوریم؛ نتیجه این اندازه‌گیری می‌بایست با تخمین نظری  $\langle f \rangle$  در توافق باشد. بر این اساس، دستورالعملی برای ایجاد یک ارتباط میان مطالعات نظری و تجربی بدست می‌آید. در عین حال، ما یک مبنای عقلانی و منطقی برای نظریه میکروسکوپی به عنوان جایگزینی برای روش تجربی ترمودینامیک وضع می‌کنیم!

پیشرفت قابل توجهی در این راستا توسط گیبس محقق شد، کسی که با اصول بنیادی مکانیک آماری خود (۱۹۰۲)، نظریه هنگرد را به کارآمدترین ابزار برای نظریه پردازان مبدل نمود. او بر استفاده از هنگردهای «تعییم یافته» تأکید داشت و روش‌هایی را خلق نمود که اصولاً، محاسبه مجموعه کاملی از کمیت‌های ترمودینامیکی یک سیستم معین را از روی خواص مکانیکی محض اجزاء میکروسکوپی تشکیل دهنده آن مهیا ساختند.<sup>۱</sup> کار گیبس از نظر روش‌ها و نتایج آن، خیلی کلی‌تر از همه کارهای پیشین به نظر می‌رسید؛ روش او در مورد هر سیستم فیزیکی که حائز این شروط ساده بود، بکار گرفته شد: (۱) از لحاظ ساختار، مکانیکی باشد و (۲) از معادلات حرکت لاگرانژ و هامیلتون پیروی کند. در این راستا، می‌توان کار گیبس را به همان اندازه برای ترمودینامیک مفید در نظر گرفت که کار ماکسول برای الکترودینامیک مفید واقع شد.

این پیشرفت‌ها تقریباً با انقلاب بزرگی که کار پلانک در سال ۱۹۰۰ در عرصه فیزیک به وجود آورد، همزمان بودند. همانطور که به خوبی می‌دانیم، فرضیه کوانتوموی پلانک به طور موقیت آمیزی روز اصلی تابش جسم سیاه (موضوعی که در آن سه رشته مسلم قرن نوزدهم، یعنی مکانیک، الکترودینامیک و ترمودینامیک کاملاً دخیل بودند) را حل نمود. فرضیه کوانتوموی در عین حال، هم نقاط قوت و هم نقاط ضعف این رشته‌ها را افشاء نمود. آن مایه شگفتی شده بود که چگونه مکانیک آماری که ترمودینامیک را با مکانیک پیوند می‌دهد، توانست از پیامدهای آن انقلاب رهایی یابد.

<sup>۱</sup> اینشتین (۱۹۰۳، ۱۹۰۲) نیز به روشی بسیار مشابه با روش گیبس اما کاملاً مستقل از او، نظریه هنگردها را طرح نمود.

به دنبال آن، کار اینشتین ( $a$ ) بر روی اثر فوتوالکتریک و کار کامپتون ( $a, b$ ) بر روی پراکندگی پرتوهای  $X$  «وجود» کوانتم تابش یا فوتون (همانطور که امروز ما آنرا می‌خوانیم) را اثبات نمود.<sup>۱</sup> بنابراین، طبیعی به نظر می‌رسد که شخص برای استقاق فرمول تابش پلانک، تابش جسم سیاه را به عنوان گازی متشکل از فوتون‌ها در نظر بگیرد یعنی به همان صورتی که ماسکول قانون توزیع سرعت‌های مولکولی خود را برای یک گاز متشکل از مولکول‌های متداول بدست آورد. اما، در این صورت آیا یک گاز متشکل از فوتون‌ها اساساً با یک گاز متشکل از مولکول‌های متداول فرق دارد تا دو قانون توزیع لزوماً با هم تفاوت داشته باشند؟

پاسخ به این سوال بوسیله شیوه‌ای که بوز فرمول پلانک را از آن بدست آورد، ارائه شده است. بوز در مقاله معروف خود در سال ۱۹۲۴، تابش جسم سیاه را به عنوان یک گاز متشکل از فوتون در نظر گرفت؛ با این حال، به جای توجه به تخصیص فوتون «منفرد» به حالت‌های مختلف انرژی سیستم، او توجه خود را به تعداد حالت‌هایی که شامل «شمار خاصی» از فوتون‌ها بودند، معطوف کرد. اینشتین، که به نظر می‌رسد مقاله بوز را از انگلیسی به آلمانی ترجمه می‌کند، به یک باره به اهمیت این رویکرد پی‌برد و این نکته را به ترجمه خود می‌افزاید: «به نظر من استقاق فرمول پلانک توسط بوز گام مهمی به سمت جلو است. روشی که در اینجا بکار گرفته شده است، همچنین به نظریه کوانتموی گاز ایده‌آل خواهد انجامید که پیشنهاد می‌کنم در جایی دیگر ارائه شود».

مفهوم روش بوز بر این اصل استوار بود که در مورد فوتون‌ها آنچه حائز اهمیت است «مجموعه اعداد (تعداد) فوتون‌ها در حالت‌های مختلف انرژی سیستم» است و نه خصوصیاتی مربوط به اینکه «کدام فوتون در کدام حالت است»؛ به عبارت دیگر، فوتون‌ها دو به دو تمیزناپذیر هستند. اینشتین استدلال کرد که آنچه بوز برای فوتون‌ها اثبات نمود می‌باشد برای ذرات مادی نیز صادق باشد (زیرا خاصیت تمیزناپذیری اساساً از خصلت موجی نشأت می‌گیرد و با توجه به دوبروی، ذرات مادی نیز از این خصلت برخوردارند).<sup>۲</sup> اینشتین (۱۹۲۵) در دو مقاله، که چندی بعد ارائه شدند، روش بوز را برای مطالعه یک گاز ایده‌آل بکار برد و به موجب آن، آنچه که ما امروز آنرا با نام آمار بوز- اینشتین می‌شناسیم، را بنا نهاد. در دو مقاله از این مقالات، تفاوت اساسی میان آمار جدید و آمار کلاسیک ماسکول - بولتزمن از نظر تمیزناپذیری مولکول‌ها به وضوح ارائه می‌شود.<sup>۳</sup> در همان مقاله،

<sup>۱</sup> اگر دقیقت به مسئله نگاه کنیم، ذکر کار اینشتین بر روی اثر فوتوالکتریک به عنوان گواه و شاهدی بر وجود فوتون تا اندازه‌ای گمراه کننده است. در واقع، بسیاری از این اثرات (از جمله اثر فوتوالکتریک) که استناد کردن به فوتون‌ها برای اثبات آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد، را می‌توان بر مبنای نظریه موجی تابش توضیح داد. تنها پدیده‌هایی که وجود فوتون‌ها در آن‌ها انکارناپذیر به نظر می‌رسد، پدیده‌هایی هستند که مشتمل بر نوساناتی از قبیل اثر هانبری براون- تویس یا جايجایی لامب می‌باشند. برای درک ارتباط نوسانات با مسئله تابش، مرجع ترهار (۱۹۶۷) را ملاحظه نمائید.

<sup>۲</sup> البته، در مورد ذرات مادی، تعداد کل ذرات  $N$  نیز می‌باشد ثابت نگه داشته شود؛ این در مورد فوتون‌ها لازم نیست انجام شود. برای جزئیات بیشتر، بخش ۱-۶ را ملاحظه نمائید.

<sup>۳</sup> اینجاست که شخص بسته به اینکه آیا ذرات (الف) تمیزپذیر و یا (ب) تمیزناپذیر هستند، با روش صحیح شمارش «تعداد روش‌های متمایز استقرار  $n_i$  ذره در  $g_i$  حالت انرژی» موافق می‌شود. عدد اشغال حالت‌های منفرد در هر مورد، نامحدود است یعنی  $n_i = 0, 1, 2, \dots$ .

اینشتین پدیده چگالش بوز-اینشتین را کشف می‌کند که ۱۳ سال بعد، توسط لاندن (۱۹۳۸<sup>a,b</sup>) به عنوان مبنایی برای درک میکروسکوپی خواص عجیب  $\text{He}^4$  مایع در دماهای پایین اتخاذ شد. پس از اعلام اصل طرد پائولی (۱۹۲۵)، فرمی (۱۹۲۶) نشان داد که سیستم‌های فیزیکی معین از نوعی آمار دیگر، یعنی آمار فرمی-دیراک پیروی می‌کنند که در آن هر ذره می‌تواند فقط یک حالت انرژی یکسان ( $n_i = 0$ ) را اشغال کند. ذکر این نکته مهم به نظر می‌رسد که در اینجا روش بوز در سال ۱۹۲۴ به توزیع فرمی-دیراک نیز ختم می‌شود به شرطی که عدد اشغال یک حالت انرژی تنها منحصر به یک ذره باشد.<sup>۱</sup>

بلافاصله پس از ظهر آمار فرمی-دیراک، این آمار توسط فاولر (۱۹۲۶) برای بحث در مورد حالت‌های تعادلی ستارگان کوتوله سفید و همچنین توسط پائولی (۱۹۲۷) برای توضیح خصلت پارامغناطیس ضعیف مستقل از دما فلزات قلیایی بکار گرفته شد؛ در هر مورد، لزوماً با یک گاز «بسیار تباهیده» از الکترون‌ها سر و کار داریم که از آمار فرمی-دیراک تبعیت می‌کند. در پی این، سامرفلد کار بزرگ و به یاد ماندنی خود را در سال ۱۹۲۸ ارائه نمود، که نه تنها مبای فیزیکی محکمی برای نظریه الکترونی فلزات فراهم نمود بلکه امکان یک شروع تازه در مسیر درست برای آن فراهم آورد. بنابراین، سامرفلد عملآ توانست همه خواص اصلی فلزات که برخاسته از الکترون‌های رسانش هستند را توضیح دهد و در هر مورد، تنبیحی بدست آورد که در مقایسه با نتایج بدست آمده از نظریه‌های کلاسیک ریکی (۱۸۹۸)، درود (۱۹۰۰) و لورنتز (۱۹۰۴-۱۹۰۵)، توافق بسیار بهتری با نتایج تجربی داشتند. در همان زمان، توماس (۱۹۲۷) و فرمی (۱۹۲۸) توزیع الکترونی در اتم‌های سنگین‌تر را بررسی کردند و تخمين‌هایی نظری برای انرژی‌های بستگی مربوطه به دست آوردن؛ این تحقیقات منجر به خلق مدل انتی معروف توماس-فرمی شد، که بعدها به گونه‌ای بسط داده شد که می‌توانست در مورد مولکول‌ها، جامدات و همچنین هسته‌ها بکار گرفته شود.<sup>۲</sup>

بنابراین، کل ساختار مکانیک آماری با معرفی مفهوم تمیزناپذیری ذرات (یکسان) مورد بازنگری قرار گرفت.<sup>۳</sup> جنبه آماری مسئله، که با توجه به تعداد زیاد ذرات موجود همچنان پایرچا بود، حال بوسیله جنبه آماری دیگری که از ماهیت احتمالی توصیف مکانیک موجی نشأت می‌گرفت، تقویت می‌شد. از این‌رو، شخص برای حصول مقادیر مورد انتظار مربوطه، می‌بایست از متغیرهای دینامیکی حول کل حالت‌های سیستم مورد نظر دو بار میانگین‌گیری کند. این نوع وضعیت، لزوم فرمول‌بندی جدید خود نظریه هنگرد را ایجاب می‌کرد، که به صورت گام به گام انجام شد. نخست، لاندا (۱۹۲۷) و فن نیومن (۱۹۲۷) اصطلاح ماتریس چگالی را معرفی کردند، که همتای مکانیک کوانتومی تابع

<sup>۱</sup> دیراک که نخستین کسی بود که ارتباط میان آمار و مکانیک موجی را بررسی نمود، در سال ۱۹۲۶ نشان داد که توابع موجی توصیف‌کننده یک سیستم مشکل از ذرات یکسان که از آمار بوز-اینشتین (یا فرمی-دیراک) پیروی می‌کند، می‌بایست نسبت به تبادل دو ذره متقاضن (یا نامتقارن) باشد.

<sup>۲</sup> برای مروی عالی بر این مدل، مرجع مارچ (۱۹۵۷) را ملاحظه نمائید.

<sup>۳</sup> البته، در وضعیت‌هایی که در آن ماهیت موجی ذرات چندان حائز اهمیت نیست، همچنان از آمار کلاسیک استفاده می‌شود.

چگالی فضای فازی کلاسیک بود؛ این موضوع توسط دیراک (۱۹۲۹-۱۹۳۱) از هر دو نقطه نظر آماری و مکانیک کوانتمی، به تفصیل تشریح شد. با راهنمایی از نظریه هنگرد کلاسیک، این نویسنده‌گان هر دو هنگردهای میکروبندادی و بندادی را بررسی نمودند. وارد کردن هنگردهای بندادی بزرگ در آمار کوانتمی توسط پائولی (۱۹۲۷) انجام شد.<sup>۱</sup>

سؤال مهم این است که چه ذراتی از آمار بوز-اینشتین تبعیت خواهند کرد و کدام آمار فرمی-دیراک از لحاظ نظری مختلف باقی ماند تا اینکه بلینفانت (۱۹۳۹) و پائولی (۱۹۴۰) ارتباط حیاتی بین اسپین و آمار را کشف کردند.<sup>۲</sup> به نظر می‌رسد ذراتی که اسپین آنها مضرب صحیحی از  $\frac{1}{2}$  است از آمار بوز-اینشتین پیروی می‌کنند در حالی که ذراتی که اسپین آنها مضرب نیمه صحیح فردی از  $\frac{1}{2}$  باشد از آمار فرمی-دیراک تبعیت می‌کنند. تا به امروز، هیچ دسته سومی از ذرات کشف نشده است.

به غیر از دوره‌های برجسته تاریخی اخیر الذکر، کارهای جالب توجه دیگری در جهت توسعه مکانیک آماری در مقاطع زمانی دیگر انجام شده است؛ با این حال، بسیاری از این کارها مربوط به توسعه یا تکمیل تکنیک‌های ریاضی بوده‌اند که کاربرد رویکرد بنیادی را در حل مسائل فیزیکی مفیدتر ساخته‌اند. مرور این تحولات در اینجا خارج از بحث است؛ این پیشرفت‌های تاریخی در محل مناسب خود در متن کتاب بحث خواهند شد.

<sup>۱</sup> جزئیات دقیق آن توسط کرامرز (۱۹۳۸) ارائه شده است.

<sup>۲</sup> مرجع لودرز و ژومینو (۱۹۵۸) را نیز ملاحظه نمائید.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
<b>فصل اول / مبانی آماری ترمودینامیک</b>	<b>۲۳</b>
۱-۱ حالت‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی	۲۴
۱-۲ ارتباط آمار و ترمودینامیک: اهمیت فیزیکی عدد $\Omega(N,V,E)$	۲۵
۲-۱ ارتباط بیشتر میان آمار و ترمودینامیک	۲۸
۴-۱ گاز ایده‌آل کلاسیک	۳۱
۵-۱ آنتروپی اختلاط و تناقض گیبس	۳۹
۶-۱ شمارش صحیح میکروحالتها	۴۳
<b>فصل دوم / عناصر نظریه گروه</b>	<b>۴۹</b>
۱-۲ فضای فازی یک سیستم کلاسیک	۴۹
۲-۲ قضیه لیوویل و نتایج آن	۵۱
۳-۲ هنگرد میکروکانونی	۵۴
۴-۲ مثال‌ها	۵۷
۵-۲ حالات کوانتومی و فضای فازی	۶۰
<b>فصل سوم / هنگرد بندادی</b>	<b>۶۵</b>
۱-۳ تعادل میان یک سیستم و یک منع گرمابی	۶۶
۲-۳ یک سیستم در هنگرد بندادی	۶۷
روش محتمل‌ترین مقادیر	۶۹
روش مقادیر میانگین	۷۰
۳-۳ اهمیت فیزیکی کمیت‌های آماری مختلف در هنگرد بندادی	۷۷
۴-۳ روابط جایگرین برای تابع پارش	۸۰
۵-۳ سیستم‌های کلاسیک	۸۲
۶-۳ نوسانات انرژی در هنگرد بندادی: مطابقت با گروه هنگرد بندادی	۸۶
۷-۳ دو قضیه - «هم‌بخشی» و «ویریال»	۹۰
۸-۳ سیستمی از نوسانگرهای هماهنگ	۹۳
۹-۳ آمار پارامغناطیس	۹۹
۱۰-۳ ترمودینامیک سیستم‌های مغناطیسی: دماهای منفی	۱۰۶

<b>فصل چهارم / هنگرد بندادی بزرگ</b>	۱۲۳
۱-۴ تبادل میان یک سیستم و یک منبع ذره - انرژی	۱۲۴
۲-۴ یک سیستم در هنگرد بندادی بزرگ	۱۲۵
۳-۴ اهمیت فیزیکی کمیت‌های آماری مختلف	۱۲۷
۴-۴ مثال‌ها	۱۳۰
۵-۴ نوسانات چگالی و انرژی در هنگرد بندادی بزرگ: ارتباط با دیگر هنگردها	۱۳۵
۶-۴ نمودارهای فازی ترمودینامیکی	۱۳۸
۷-۴ تعادل فازی و معادله کلازیوس-کلابیرون	۱۴۲
<b>فصل پنجم / فرمول‌بندی آمار کوانتمی</b>	۱۴۹
۱-۵ نظریه هنگرد مکانیک - کوانتمی: ماتریس چگالی	۱۵۰
۲-۵ آمار هنگردهای مختلف	۱۵۳
۲-۵ -الف هنگرد میکروبندادی	۱۵۳
۲-۵ -ب هنگرد بندادی	۱۵۵
۲-۵ -ج هنگرد بندادی بزرگ	۱۵۷
۳-۵ مثال‌ها	۱۵۷
۳-۵ -الف یک الکترون در یک میدان مغناطیسی	۱۵۷
۳-۵ -ب یک ذره آزاد در یک جعبه	۱۵۸
۳-۵ -ج یک نوسانگر هماهنگ خطی	۱۶۰
۴-۵ سیستم‌های متشكل از ذرات تمیزناپذیر	۱۶۳
۵-۵ ماتریس چگالی و تابع تقسیم یک سیستم متشكل از ذرات آزاد	۱۶۸
<b>فصل ششم / نظریه‌ی گازهای ساده</b>	۱۷۷
۱-۶ یک گاز ایده‌آل در یک هنگرو میکروبنداری مکانیک - کوانتمی	۱۷۷
۲-۶ یک گاز ایده‌آل در دیگر هنگردهای مکانیک - کوانتمی	۱۸۲
۳-۶ آمار اعداد اشغال	۱۸۶
۴-۶ بررسی‌های سینتیکی	۱۸۹
۵-۶ سیستم‌های گازی متشكل از مولکول‌هایی با حرکت درونی	۱۹۲
۵-۶ -الف - مولکول‌های تک‌اتمی	۱۹۴
۵-۶ -ب - مولکول‌های دو‌اتمی	۱۹۵
۵-۶ -ج - مولکول‌های چند‌اتمی	۲۰۵
۶-۶ تعادل شیمیایی	۲۰۷

۲۱۹.....	<b>فصل هفتم / سیستم‌های ایده‌آل بوز</b>
۲۲۰.....	۱- رفتار ترمودینامیکی یک گاز ایده‌آل .....
۲۳۲.....	۲- چگالش بوز - انیشتین در گازهای اتمی فوق سرد .....
۲۳۵.....	۲-۱-الف تشخیص چگالیده بوز - انیشتین .....
۲۳۷.....	۲-۲-ب خواص ترمودینامیکی چگالیده بوز - انیشتین .....
۲۴۱.....	۳- ترمودینامیک تابش جسم سیاه .....
۲۴۷.....	۴- میدان امواج صوتی .....
۲۵۵.....	۵- چگالی درونی میدان صوتی .....
۲۵۸.....	۶- برانگیختگی‌های اولیه در هلیوم مایع II .....
۲۷۵.....	<b>فصل هشتم / سیستم‌های ایده‌آل فرمی</b>
۲۷۵.....	۱- رفتار ترمودینامیکی یک گاز ایده‌آل فرمی .....
۲۸۳.....	۲- رفتار مغناطیسی یک گاز ایده‌آل فرمی .....
۲۸۴.....	۲-۱-الف - پارامغناطیس پاولی .....
۲۸۸.....	۲-۲-ب - دیامغناطیس لاندا .....
۲۹۲.....	۳- گاز الکترونی در فلزات .....
۲۹۷.....	۳-۱-الف نشر گرمایونی (اثر ریچاردسون) .....
۳۰۱.....	۳-۲-ب نشر فوتالکتریک (اثر هال و اچز) .....
۳۰۴.....	۴- گازهای اتمی فرمی فوق سرد .....
۳۰۵.....	۵- تعادل آماری ستارگان کوتوله سفید .....
۳۱۱.....	۶- مدل آماری اتم .....
۳۲۳.....	<b>پیوست‌ها</b>
۳۲۳.....	A تأثیر شرایط مرزی بر توزیع حالات کوانتوسی .....
۳۲۷.....	B توابع ریاضی معین .....
۳۳۵.....	C «حجم» و «مساحت سطح» یک کره $n$ - بعدی با شعاع $R$ .....
۳۳۸.....	D در باب توابع بوز - انیشتین .....
۳۴۱.....	E در باب توابع فرمی - دیراک .....
۳۴۵.....	F تحلیل دقیقی از گاز ایده‌آل بوز و آغاز چگالش بوز - انیشتین .....
۳۵۰.....	G در باب توابع واتسون .....
۳۵۲.....	H روابط ترمودینامیکی .....

