

مکانیک آماری

نویسنده:
آر. کی. پاتریا
پائول دی. بیل

برگردان:
محمد بهتاج لجبینی - محمد کریمی

نیاز دانش

سرشناسه	: پتريا، آر. کی.	Pathria, R.K
عنوان و نام پدیدآور	: مکانیک آماری / نویسنده آر.کی پاتریا، پائول دی بیل؛ برگردان محمد بهتاج لجبینی، محمد کریمی	
مشخصات نشر	: تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۳.	
مشخصات ظاهری	: ۳۶۰ ص.	
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۶۴۸۱-۶۱-۶	ISBN: 978-600-6481-61-6
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا.	
یادداشت	: عنوان اصلی:	Statistical mechanics, 3 rd ed., 2011
موضوع	: مکانیک آماری	
شناسه افزوده	: بیل، پل دی	Beale, Paul D.
شناسه افزوده	: کریمی، محمد، ۱۳۶۵ - مترجم.	
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ م۷/پ۲/۱۷۴/۸/۱۷۴	
رده بندی دیویی	: ۵۳۰/۱۳	
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۵۵۹۵۱۹	



نیاز دانش

نام کتاب	: مکانیک آماری
پدیدآورندگان	: آر. کی. پاتریا - پائول دی. بیل
برگردان و گردآوری	: محمد بهتاج لجبینی - محمد کریمی
مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ	: حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس
ناشر	: نیاز دانش
صفحه آرا	: واحد تولید انتشارات نیاز دانش
لیتوگرافی / چاپ	: گنجینه
نوبت چاپ	: اول ۱۳۹۳
شمارگان	: ۵۰۰ نسخه
قیمت	: ۱۶۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۴۸۱-۶۱-۶ ISBN: 978-600-6481-61-6

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیهی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است. متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۶۶۴۷۸۱۰۸-۰۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۲۱

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲-۲۱۰۶۷۰۹

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 گستردگی 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 نقایص ذکر شده برآید کاملاً احساس می‌شد. 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 بیشتر 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 متشمل 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 مثمر 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. بی‌شک 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) 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 بازبهنجارش تمرکز داشتند - موضوعاتی که در طول سال‌های پس از انتشار ویرایش نخست در سال ۱۹۷۲ متحمل 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 بپیوندد. 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 نمودند 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 ۷-۲، ۸-۴، ۱۱-۲-الف و ۱۱-۹. 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 کوانتومی 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 توجهی 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 متحمل 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 پویشرگر ناهمسازگردی 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 میدل شده‌اند. در اینجا مقدمه‌ای کوتاه در مورد تکنیک‌ها و الگوریتم‌های مونت کارلو و دینامیک مولکولی ارائه شده است.

توابع همبستگی و پراکندگی: بخش ۱۰-۷. 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 ضریب 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 ضریب ساختار دینامیکی: بخش‌های ۱۵-۳-الف، ۱۵-۶-الف و ۱۵-۶-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 اشتقاق نتایج کلیدی از نظریه پاسخ خطی (مبحثی در مورد ضریب ساختار دینامیکی) و تحلیل حرکت براونی نوسانگرهای هماهنگ که مثال‌های کاربردی مفیدی فراهم می‌آورد، را بسط داده‌ایم.

تعادل فاز و معادله کلازیوس-کلاپیرون: بخش‌های ۴-۶ و ۴-۷. 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 ۱۳-۱. 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 ۱۳-۴-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 فراهم می‌آورد که می‌تواند برای آزمون روش‌های مونت کارلو مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تحلیلی برای توزیع انرژی، انرژی داخلی، و ظرفیت گرمایی از سیستم فراهم 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 گردآوری این اطلاعات در یک جا بسیار مفید خواهد بود.

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

گوسی ارائه کرده‌ایم و خواص آن‌ها را تشریح نموده‌ایم.
ده‌ها مسئله و تکلیف.

بقیه متن تا حد زیادی بدون تغییر باقی مانده است.

تکمیل این کار مرهون زحمات 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 دی‌جراند، 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 دی‌جراند، میشل شال، دیوید نسبیت، جیمی نگل، مت گلاسر، ماری هولاند، لئو راجیوفسکی، ویکتور گوراری، ادموند میر، متیو گرو، اندرو سیزلر، میشل فاس - فیگ، آلان فرانکلین، شانتا دی‌آلویز، دیمیتری رزنیک و اریک کرنل، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

P.D.B. مایل است تا از این فرصت استفاده کرده و از پروفیسور 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 مفرحش طی تهیه این ویرایش جدید ابراز دارد. مشاوره‌ها و تدابیر 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 بازهنجارش که این مفاهیم را به یک ابزار 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 روزافزونی 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 ناامیدی برای بعضی از افراد شود اما من اطمینان دارم که آنها منطقی پس این کار را درک می‌کنند و اگر لازم باشد به ویرایش اول به عنوان منبع، رجوع خواهند کرد. من به نوبه خود امیدوارم که اکثریت کاربران از چنین حذفی 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 فراهم آورده و اساساً به‌روز شدن کتاب خواهد انجامید. به اعتقاد من، این فصل‌ها همراه با مجموعه‌ای متشکل از بیش از ۶۰ مسئله، سودمندی کتاب را برای هم دانشجویان و هم مدرسین ارتقاء خواهد بخشید.

تکمیل این کار مرهون زحمات افراد زیادی است. اول از همه، همان طور که در «مقدمه‌ای بر ویرایش اول» گفته شده، این کار مرهون کسانی است که قبلاً در مورد این موضوع تألیفاتی داشته‌اند و ویرایش حاضر از نوشته‌های 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 مک مستر (۱۹۶۴-۱۹۶۵)، دانشگاه آلبرتا (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 ارزش والایی برای فیزیک در ۱۰۰ سال گذشته برخوردار بوده است. با توجه به فراگیری آن، کسب دانشی پایه در این موضوع برای هر دانشجوی رشته فیزیک، صرفه‌نظر از زمینه تخصصی مورد نظر دانشجوی، 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 کوانتومی و این ادعا که «ترمودینامیک سیستم بوسیله چندگانگی این حالت‌ها تعیین می‌شود»، نشان داده می‌شود. ارتباط اساسی بین توصیفات میکروسکوپی و ماکروسکوپی یک سیستم با بررسی شرایط تعادل بین دو سیستم فیزیکی در تماس ترمودینامیکی کشف می‌شود. این مهم با کار در جوهره نظریه کوانتومی درست از همان آغاز به بهترین وجه محقق می‌شود؛ پس از آن، آنتروپی و سایر متغیرهای ترمودینامیکی سیستم به بدیهی‌ترین 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 فراهم 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 پیشرفته (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 ناپیوستگی‌هایی ناشی از افزودن مباحث تاریخی در خلال متن مختل 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.

تکمیل این کار مرهون زحمات افراد بسیاری است. همچون بسیاری از نویسندگان، من خود را مدیون کسانی می‌دانم که قبلاً در مورد این موضوع نوشتجاتی داشته‌اند. کتابشناسی در پایان کتاب ادای احترامی است به این افراد. با این حال، مایلم تا به طور خاص، آثار ارنفستس، فاولر، گوگنهایم، شرودینگر، راشبروک، تر هار، هیل، لاند و لیفشیتز، هوانگ و کوبو را ذکر کنم که برای سالیان متمادی به عنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به طرق مختلف در فهم من از موضوع مؤثر بوده‌اند. من همچنین خود را مرهون زحمات رابرت تشیما که بیشتر نمودارها را ترسیم و اکثر مسائل را بررسی نمود، راویندار بانسال، ویشوا میتار و سورجیت سینگ که کل متن را مرور کرده و پیشنهادهای ارائه دادند که گره از برخی نکات گشود، ماری آنتس که متن را با صبر، تلاش و دقت استثنایی تایپ نمود، فرد هتزل، 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 دهلی نو می‌دانستم، کسانی که من حرفه خود را با آنها آغاز کردم و آنها بودند که مرا به تحصیل در این موضوع تشویق نمودند، و پروفیسور آر. سی. ماجومدر که علاقه بسیاری به کار من در این موضوع و سایر پروژه‌هایی 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. دلیو. لیچ، جی. گریندلی و ای. دی. سینگ ناگی از دانشگاه واترلو به خاطر ابراز احساسات و علاقه‌شان که بيمودن این راه طولانی را بر من خوشایند نمود، متشکرم.

ادای احترام آخر نثار همسر به خاطر همکاری و تفاهم او در تمامی مراحل این پروژه 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 متشکل 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 موفقیت بالایی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، رویکرد مکانیک آماری ما را قادر به بررسی حالات غیرتعادلی و تعادلی ماده می‌سازد؛ در واقع، این بررسی‌ها ما را در درک شیوه‌ای که یک سیستم فیزیکی در زمان معین t «خارج از تعادل» بوده و با گذشت زمان به سمت «حالتی از تعادل» میل می‌کند، یاری می‌دهند.

صرف نظر از مراجع ابتدایی، از قبیل گاسندی، هوک و غیره، کار واقعی بر روی موضوع مکانیک آماری با ژرف اندیشی‌های برنولی (۱۷۳۸)، هراپات (۱۸۲۱) و ژول (۱۸۵۱) آغاز شد که هر یک به روش‌های منحصر به خود، اقدام به پی‌ریزی شالوده‌ای برای نظریه جنبشی گازها نمودند، رشته‌ای که در نهایت به طلایه‌دار مکانیک آماری مبدل شد. کار پیشگام این محققان این اصل را بنا نهاد که فشار یک گاز ناشی از حرکت مولکول‌های آن است و بنابراین، با لحاظ تأثیر دینامیکی بمباران مولکولی دیواره‌های ظرف قابل محاسبه می‌باشد. از اینرو، برنولی و هراپات توانستند نشان دهند که، اگر دما ثابت باقی بماند، فشار P یک گاز معمولی به طور معکوس با حجم V ظرف متناسب است (قانون بویل)، و اینکه فشار اساساً مستقل از شکل ظرف است. البته این قانون مشتمل بر این فرض صریح و روشن بود که، در یک دمای T معین، سرعت (متوسط) مولکول‌ها مستقل از فشار و حجم است. برنولی حتی به تعیین تصحیح (مرتبه اول) این قانون، ناشی از اندازه متناهی مولکول‌ها، همت گمارد و نشان داد که عبارت حجم V موجود در این قانون باید بوسیله عبارت $(V-b)$ جایگزین شود، که در آن b حجم «واقعی» مولکول است.^۱

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

$$P = \frac{1}{3} nmc^2 \quad (1)$$

^۱ همانطور که می‌دانیم، این «تصحیح» توسط اندروالس (۱۸۷۳) بدرستی تعیین شد؛ او نشان داد که به ازای حجم بزرگ V ، b چهار مرتبه بزرگتر از حجم «واقعی» مولکول است؛ مسئله ۱-۴ را ملاحظه نمایید.

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 روی معادله (۱) نتیجه گرفت که انرژی جنبشی مولکول‌ها می‌بایست به طور مستقیم با دمای مطلق گاز متناسب باشد. کرونیگ روش خود را در این جملات توجیه نمود: «احتمالاً مسیر هر مولکول بسیار نامنظم است به طوری که تلاش بسیار زیادی را برای محاسبه می‌طلبید. با این حال، با توجه به قوانین احتمال، می‌توان یک حرکت کاملاً منظم را به جای یک حرکت کاملاً نامنظم فرض نمود!» علی‌رغم این، باید توجه داشت که این تنها به دلیل شکل ویژه عملیات جمع‌زنی در محاسبه فشار است که استدلال کرونیگ منجر به همان نتیجه‌ای می‌شود که از مدل‌های بیشتر اصلاح شده منتج می‌شوند. در مسائل دیگر، از جمله مسائل مربوط به نفوذ، گرانیوی یا هدایت گرمایی، این استدلال دیگر معتبر نخواهد بود.

در این مرحله بود که کلازیوس به عرصه وارد شد. اول از همه، در سال ۱۸۵۷، او قانون گاز ایده‌آل را تحت مفروضات به مراتب کمتر سخت‌گیرانه‌تر از مفروضات کرونیگ بدست آورد. او از هر دو فرض اصلی کرونیگ صرفه‌نظر کرد و نشان داد که معادله (۱) همچنان صدق می‌کند؛ البته، در اینجا c^2 میانگین توان دوم سرعت مولکول‌ها خواهد بود. در مقاله بعدی در سال ۱۸۵۹، کلازیوس مفهوم پویس آزاد میانگین را معرفی نمود و در نتیجه نخستین کسی بود که پدیده انتقال را تحلیل نمود. در این مطالعات بود که او فرضیه معروف "Stosszahlansatz" (بر مبنای شمار برخوردها بین مولکول‌ها) را معرفی نمود، که بعدها، نقش برجسته‌ای در کار به یاد ماندنی بولتزمن ایفا کرد.^۱ با وجود کلازیوس، ورود دیدگاه‌های میکروسکوپی و آماری در نظریه فیزیکی، قطعی بود. بر این اساس، ماکسول، در مقاله معروف خود تحت عنوان «مولکول‌ها» که آن را برای Encyclopedia Britannica نوشت، از کلازیوس به عنوان «بنیانگذار اصلی نظریه جنبشی گازها» یاد کرد، در حالی که گیبس، در آگهی در گذشت کلازیوس، او را «پدر مکانیک آماری» خواند.^۲

کار کلازیوس، نظر ماکسول را به این حوزه جلب نمود. او اولین حضور خود را با یادداشت «مثال‌هایی در نظریه دینامیکی از گازها» (۱۸۶۰) به ثبت رساند، که در آن، او با استنتاج قانون معروف خود یعنی «توزیع سرعت‌های مولکولی»، پا را بسیار فراتر از پیشینیان خود نهاده بود. روابط ماکسول بر مبنای اصول اولیه احتمال بودند و به طور واضح، از قانون گاوسی «توزیع خطاهای تصادفی» الهام گرفته بودند. یک رابطه بر اساس این شرط که «وقتی یک بار توزیع تعادلی سرعت‌های مولکولی بدست آورده شد، می‌بایست تحت شرایط برخوردهای مولکولی ثابت باقی بماند»، در سال ۱۸۶۷ ارائه شد. این ماکسول را بر آن داشت تا آنچه که امروز تحت عنوان «معادله انتقال ماکسول» شناخته شده است را طرح کند، معادله‌ای که اگر ماهرانه استفاده شود، همان نتایجی را بدست خواهد

^۱ برای مروری عالی بر این موضوع و مباحث مرتبط، مرجع ارنفست و ارنفست (۱۹۱۲) را ملاحظه نمایید.

^۲ برای جزئیات بیشتر، رجوع شود به مرجع مونترول (۱۹۶۳) که در آن، گزارشی از کار پیشگام واترستون (۱۸۴۶)، (۱۸۹۲) نیز ارائه شده است.

داد که در صورت استفاده از معادله بنیادی تر بولتزمن قابل استحصال هستند.^۱ همکاری‌های ماکسول در این عرصه پس از انتصابش 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 ۱۸۷۱-۱۸۶۸، 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 $\exp(-\beta\varepsilon)$ انجامید که در آن، ε 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 فراهم 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 (۱۹۱۷-۱۹۱۶) ثابت شد که این معادله 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 (۱۸۷۷-۱۸۷۶) و زرمولو (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 زرمولو بیشتر به این خاطر بود که چگونه این نتایج می‌توانند با رفتار شبه‌تناوبی سیستم‌های بسته (که اصلاً 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 مچ و استوالد در حال نقادی مبانی نظریه جنبشی بودند،^۲ در حالی که کلوین بر این تأکید داشت که «برهای قرن

^۱ این تعادل در مرجع گوگنهم (۱۹۶۰) که در آن، ضرایب گرانیروی، هدایت گرمایی و نفوذ یک گاز متشکل از کره‌های سخت بر مبنای معادله انتقال بولتزمن محاسبه شده است، نشان داده شده است.

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

نوزدهم بر سر نظریه دینامیکی نور و گرما سایه افکنده‌اند.^۱ همه این اتفاقات بولتزمن را در حالتی از ناامیدی فرو برد و نوعی درماندگی آزاردهنده در وی القاء نمود.^۲ او در مقدمه جلد دوم رساله خود تحت عنوان Vorlesungen über Gastheorie (۱۸۹۸) می‌نویسد:^۳

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 نقصانی 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 بیردازیم؛ در عوض، در ادامه به چگونگی ظهور رویکرد پیچیده‌تر یعنی نظریه هنگرد و در واقع به تعبیری مناسب‌تر، نظریه مکانیک آماری، خواهیم پرداخت.^۴ در این رویکرد، حالت‌های دینامیکی یک سیستم معین، همانطور که بوسیله مختصات تعمیم یافته q_i و تکانه‌های تعمیم یافته p_i مشخص می‌شوند، بوسیله یک نقطه فازی $G(q_i, p_i)$ در یک فضای فازی با ابعاد مناسب نشان داده می‌شوند. تکامل حالت‌های دینامیکی بوسیله خط سیر یا مسیر G در فضای فازی به تصویر کشیده می‌شود، «هندسه» 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 برهه زمانی از واژه "statistico-mechanical" برای توصیف و مطالعه هنگردها (متشکل از سیستم‌های گازی) بهره گرفت

^۱ ابر اول مربوط به رموز «اثر» بود و طلسم آن بوسیله نظریه نسبیت باطل شد. ابر دوم مربوط به نارسایی «قضیه هم-بخشی» بود و بوسیله نظریه کوانتومی برطرف شد.

^۲ برخی خودکشی بولتزمن در ۵ سپتامبر ۱۹۰۶ را به این علت دانسته‌اند.

^۳ به نقل از مونتول (۱۹۶۳).

^۴ برای مروری بر تکامل تاریخی نظریه جنبشی مختوم به مکانیک آماری، مراجع برایش (۱۹۵۷، ۱۹۵۸، ۱۹۶۱a,b، ۱۹۶۶-۱۹۶۵) را ملاحظه نمایند.

(هر چند، هشت سال قبل از آن، بولتزمن (۱۸۷۱) اساساً با همان نوع از هنگردها کار کرده بود).
 مهم‌ترین کمیت در نظریه هنگرد، تابع چگالی، $\varphi(q_i, p_i, t)$ برای نقاط G در فضای فازی است. یک توزیع ایستا ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) مشخصه یک هنگرد ایستا است، که آن هم به نوبه خود بیانگر یک سیستم در حالت تعادل می‌باشد. ماکسول و بولتزمن، مطالعه خود را به هنگردهایی منحصر کردند که در آن‌ها، تابع ρ تنها به انرژی E سیستم بستگی دارد. این مشتمل بر حالت خاصی به نام سیستم‌های ارگودیک است که بدین صورت تعریف شده‌اند، «حرکت مختل 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!

بیشرفت قابل توجهی در این راستا توسط گیسیس 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 «تعمیم 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.^۱ کار گیسیس 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 گیسیس را به همان اندازه برای ترمودینامیک مفید در نظر گرفت که کار ماکسول برای الکتروپدینامیک 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 کوانتومی پلانک به طور موفقیت آمیزی رموز اصلی تابش جسم سیاه (موضوعی که در آن سه رشته مسلم قرن نوزدهم، یعنی مکانیک، الکتروپدینامیک و ترمودینامیک کاملاً دخیل بودند) را حل نمود. فرضیه کوانتومی 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.

^۱ اینشتین (۱۹۰۲، ۱۹۰۳) نیز به روشی بسیار مشابه با روش گیسیس اما کاملاً مستقل از او، نظریه هنگردها را طرح نمود.

به دنبال آن، کار اینشتین (۱۹۰۵ a) بر روی اثر فوتوالکتریک و کار کامپتون (۱۹۲۳ a,b) بر روی پراکندگی پرتوهای X، «وجود» کوانتوم تابش یا فوتون (همانطور که امروز ما آنرا می‌خوانیم) را اثبات نمود.^۱ بنابراین، طبیعی به نظر می‌رسد که شخص برای اشتقاق فرمول تابش پلانک، تابش جسم سیاه را به عنوان گازی متشکل از فوتون‌ها در نظر بگیرد یعنی به همان صورتی که ماکسول 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 پی می‌برد و این نکته را به ترجمه خود می‌افزاید: «به نظر من اشتقاق فرمول پلانک توسط بوز گام مهمی به سمت جلو است. روشی که در اینجا بکار گرفته شده است، همچنین به نظریه کوانتومی 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 خصوصیات مربوط به اینکه «کدام فوتون در کدام حالت است»؛ به عبارت دیگر، فوتون‌ها دو به دو تمییزناپذیر هستند. اینشتین استدلال کرد که آنچه بوز برای فوتون‌ها اثبات نمود می‌بایست برای ذرات مادی نیز صادق باشد (زیرا خاصیت تمییزناپذیری اساساً از خصلت موجی نشأت می‌گیرد و با توجه به دوپروی، ذرات مادی نیز از این خصلت برخوردارند).^۲ اینشتین (۱۹۲۴، 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 دومین مقاله از این مقالات، تفاوت اساسی میان آمار جدید و آمار کلاسیک ماکسول-بولتزمن از نظر تمییزناپذیری مولکول‌ها به وضوح ارائه می‌شود.^۳ در همان مقاله،

^۱ اگر دقیقتر به مسئله نگاه کنیم، ذکر کار اینشتین بر روی اثر فوتوالکتریک به عنوان گواه و شاهدهی بر وجود فوتون تا اندازه‌ای گمراه‌کننده 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 جابجایی لامب می‌باشند. برای درک ارتباط نوسانات با مسئله تابش، مرجع ترهار (۱۹۶۷، ۱۹۶۸) را ملاحظه نمایید.

^۲ البته، در مورد ذرات مادی، تعداد کل ذرات N نیز می‌بایست ثابت نگه داشته شود؛ این در مورد فوتون‌ها لازم نیست انجام شود. برای جزئیات بیشتر، بخش ۶-۱ را ملاحظه نمایید.

^۳ اینجاست که شخص بسته به اینکه آیا ذرات (الف) تمییزپذیر و یا (ب) تمییزناپذیر هستند، با روش صحیح شمارش «تعداد روش‌های متمایز استقرار n_i ذره در g_i حالت انرژی» مواجه 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 *a, b*) به عنوان مبنایی برای درک میکروسکوپی خواص عجیب He^4 مایع در دماهای پایین اتخاذ شد.

پس از اعلام اصل طرد یائولی (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 ($n_i = 0, 1$) 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.^۱

بلافاصله پس از ظهور 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 قلبیایی 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 عملاً توانست همه خواص اصلی فلزات که برخاسته از الکترون‌های رسانش هستند را توضیح دهد و در هر مورد، نتایجی بدست آورد که در مقایسه با نتایج بدست آمده از نظریه‌های کلاسیک ریگی (۱۸۹۸)، درود (۱۹۰۰) و لورنتز (۱۹۰۵-۱۹۰۴)، توافق بسیار بهتری با نتایج تجربی داشتند. در همان زمان، توماس (۱۹۲۷) و فرمی (۱۹۲۸) توزیع الکترونی در اتم‌های سنگین‌تر را بررسی کردند و تخمین‌هایی نظری برای انرژی‌های بستگی مربوطه به دست آوردند؛ این تحقیقات منجر به خلق مدل اتمی معروف توماس- فرمی شد، که بعدها به گونه‌ای بسط داده شد که می‌توانست در مورد مولکول‌ها، جامدات و همچنین هسته‌ها بکار گرفته شود.^۲

بنابراین، کل ساختار مکانیک آماری با معرفی مفهوم تمییزناپذیری ذرات (یکسان) مورد بازنگری قرار گرفت.^۳ جنبه آماری مسئله، که با توجه به تعداد زیاد ذرات موجود همچنان پابرجا 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، لاندن (۱۹۲۷) و فن نیومن (۱۹۲۷) اصطلاح ماتریس چگالی را معرفی کردند، که همتای مکانیک کوانتومی تابع

^۱ 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 متشکل از ذرات یکسان که از آمار بوز- اینشتین (یا فرمی- دیراک) پیروی می‌کند، می‌بایست نسبت به تبادل دو ذره متقارن (یا نامتقارن) باشد.

^۲ برای مروری عالی بر این مدل، مرجع مارچ (۱۹۵۷) را ملاحظه نمایید.

^۳ 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 (۱۹۳۱-۱۹۲۹) از هر دو نقطه نظر آماری و مکانیک کوانتومی، به تفصیل تشریح شد. با راهنمایی از نظریه هنگرد کلاسیک، این نویسندگان هر دو هنگردهای میکروبنیادی و بنیادی را بررسی نمودند. وارد کردن هنگردهای بنیادی بزرگ در آمار کوانتومی توسط پائولی (۱۹۲۷) انجام شد.^۱

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

به غیر از دوره‌های برجسته تاریخی اخیرالذکر، 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.

^۱ جزئیات دقیق آن توسط کرامرز (۱۹۳۸) ارائه شده است.

^۲ مرجع لودرز و ژومینو (۱۹۵۸) را نیز ملاحظه نمایید.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول / مبانی آماری ترمودینامیک	۲۳
۱-۱ حالت‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی	۲۴
۲-۱ ارتباط آمار و ترمودینامیک: اهمیت فیزیکی عدد $\Omega(N, V, E)$	۲۵
۳-۱ ارتباط بیشتر میان آمار و ترمودینامیک	۲۸
۴-۱ گاز ایده‌آل کلاسیک	۳۱
۵-۱ آنتروپی اختلاط و تناقض گیس	۳۹
۶-۱ شمارش صحیح میکروحالاتها	۴۳
فصل دوم / عناصر نظریه گروه	۴۹
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
فصل سوم / هنگرد بندادی	۶۵
۱-۳ تعادل میان یک سیستم و یک منبع گرمایی	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 جایگزین 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

فصل چهارم/ هنگرد بندادی بزرگ..... 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-کلاپرون ۱۴۲

فصل پنجم/ فرمول بندی آمار کوانتومی..... ۱۴۹

- ۱-۵ نظریه هنگرد مکانیک - کوانتومی: 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 متشکل از ذرات تمییزناپذیر ۱۶۳
- ۵-۵ ماتریس چگالی و تابع تقسیم یک سیستم متشکل از ذرات آزاد ۱۶۸

فصل ششم/ نظریه‌ی گازهای ساده..... ۱۷۷

- ۱-۶ یک گاز ایده‌آل در یک هنگرد میکروبنداری مکانیک - کوانتومی ۱۷۷
- ۲-۶ یک گاز ایده‌آل در دیگر هنگردهای مکانیک - کوانتومی ۱۸۲
- ۳-۶ آمار اعداد اشغال ۱۸۶
- ۴-۶ بررسی‌های سینتیکی ۱۸۹
- ۵-۶ سیستم‌های گازی متشکل 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

فصل هفتم / سیستم‌های ایده‌آل بوز..... ۲۱۹

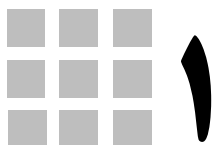
- ۱-۷ رفتار ترمودینامیکی یک گاز ایده‌آل..... ۲۲۰
- ۲-۷ چگالش بوز - انیشتین در گازهای اتمی فوق سرد..... ۲۳۲
- ۲-۷ الف تشخیص چگالیده بوز - انیشتین..... ۲۳۵
- ۲-۷ ب خواص ترمودینامیکی چگالیده بوز - انیشتین..... ۲۳۷
- ۳-۷ ترمودینامیک تابش جسم سیاه..... ۲۴۱
- ۴-۷ میدان امواج صوتی..... ۲۴۷
- ۵-۷ چگالی درونی میدان صوتی..... ۲۵۵
- ۶-۷ برانگیختگی‌های اولیه در هلیوم مایع II..... ۲۵۸

فصل هشتم / سیستم‌های ایده‌آل فرمی..... ۲۷۵

- ۱-۸ رفتار ترمودینامیکی یک گاز ایده‌آل فرمی..... ۲۷۵
- ۲-۸ رفتار مغناطیسی یک گاز ایده‌آل فرمی..... ۲۸۳
- ۲-۸ الف - پارامغناطیس پاولی..... ۲۸۴
- ۲-۸ ب - دیامغناطیس لاندائ..... ۲۸۸
- ۳-۸ گاز الکترونی در فلزات..... ۲۹۲
- ۳-۸ الف نشر گرمایونی (اثر ریچاردسون)..... ۲۹۷
- ۳-۸ ب نشر فوتوالکتریک (اثر هال واجز)..... ۳۰۱
- ۴-۸ گازهای اتمی فرمی فوق سرد..... ۳۰۴
- ۵-۸ تعادل آماری ستارگان کوتوله سفید..... ۳۰۵
- ۶-۸ مدل آماری اتم..... ۳۱۱

پیوست‌ها..... ۳۲۳

- A تأثیر شرایط مرزی بر توزیع حالات کوانتومی..... ۳۲۳
- B توابع ریاضی معین..... ۳۲۷
- C «حجم» و «مساحت سطح» یک کره n -بعدی با شعاع R ۳۳۵
- D در باب توابع بوز - انیشتین..... ۳۳۸
- E در باب توابع فرمی - دیراک..... ۳۴۱
- F تحلیل دقیقی از گاز ایده‌آل بوز و آغاز چگالش بوز - انیشتین..... ۳۴۵
- G در باب توابع واتسون..... ۳۵۰
- H روابط ترمودینامیکی..... ۳۵۲



مبانی آماری ترمودینامیک

در تاریخچه فیزیک گرمایی، دهه ۱۸۵۰ بیانگر آغاز یک دوره بسیار متمایز است. علم ترمودینامیک که اساساً تا آن زمان از مطالعه تجربی رفتار ماکروسکوپی سیستم‌های فیزیکی نشأت می‌گرفت، به واسطه کارهای کارنت^۱، ژول^۲، کلازیوس^۳ و کلونین^۴، به یک عرصه پایدار از علم فیزیک مبدل شد. نتایج نظری حاصل از قانون اول و دوم ترمودینامیک توافق بسیار مطلوبی با نتایج تجربی مربوطه داشتند.^۵ در همان زمان، نظریه جنبشی گازها که خواستگاه آن توضیح و تشریح رفتار ماکروسکوپی سیستم‌های گازی برحسب حرکت مولکول‌های آنها می‌باشد و تاکنون در حدس و گمانه‌زنی بیشتر از محاسبه تفوق داشته است، بیش از پیش به عنوان یک نظریه واقعی و ریاضی پدیدار شد. موفقیت‌های اولیه این نظریه خیره کننده بود؛ با این وجود، ارتباط واقعی نظریه با ترمودینامیک تا سال ۱۹۷۲ محقق نشد؛ در آن زمان بولتزمن^۶ قضیه H خود را مطرح نمود که به موجب آن رابطه مستقیمی میان آنتالپی از یک سو و دینامیک مولکولی از سوی دیگر برقرار شد. نظریه (جنبشی) قدیمی نیز به تدریج جای خود را به جانشین پیچیده‌تر خود یعنی نظریه هنگرد داد. به واسطه قابلیت روش‌هایی که سرانجام پدیدار شدند، ترمودینامیک به نتیجه‌ای «اساسی» از تلفیق علم آمار و مکانیک مولکول‌های

¹ Carnot

² Joule

³ Clausius

⁴ Kelvin

^۵ قانون سوم ترمودینامیک که به قضیه گرمایی نرنست نیز مشهور است، تا سال ۱۹۰۶ مطرح نشد. برای بحث و جزئیات بیشتر در مورد این قانون به منابع سیمون (۱۹۳۰) و ویلکس (۱۹۶۱) مراجعه کنید؛ منابع مذکور همچنین تاریخچه مفصلی در این موضوع ارائه می‌دهند.

⁶ Boltzmann