بسم الله الرحمن الرحیم

شرحی بر مکانیک کوانتومی

(جلد اول)

ابوالفضل فرداد

ندا حجاری

سر شناسنامه	:	**فرداد، ابوالفضل ،۱۳۵۰-**
عنوان و نام پدید آور	:	شرحی بر مکانیک کوانتومی (جلد اول) /ابوالفضل فرداد- ندا حجاری
مشخصات نشر	:	**تهران ، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی ،۱۳۸۷،**
مشخصات ظاهری	:	**۲ ج: مصور ،جدول ، نمودار .**
شابک	:	**ج ۹۷۸۹۶۴۲۶۵۱۲۰۷، ۹۷۸۹۶۴۲۶۵۱۱۸۴ ج.۲: ۱-۱۹-۲۶۵۱-۹۶۴-۹۷۸**
وضعیت فهرست نویسی	:	**فیپا**
یادداشت	:	**کوانتم- راهنمای آموزشی(عالی)**
موضوع	:	**کوانتم – مسائل ،تمرین ها و غیره (عالی)**
موضوع	:	**کوانتم- آزمون ها وتمرین ها (عالی).**
شناسه افزوده	:	**حجازی ، ندا ، ۱۳۵۱.**
شناسه افزوده	:	**دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی .**
رده بندی کنگره	:	**QC ۱۷۴/۱۴ ۴ف ۴ش ۱۳۸۷**
رده بندی دیویی	:	**۵۳۰/۱۲۰۷**
شماره کتابشناسی ملی	:	**۱۵۳۷۴۰۲**

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	شرحی بر مکانیک کوانتومی (جلد اول)
تألیف	:	/ابوالفضل فرداد- ندا حجار
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
چاپ اول	:	زمستان ۱۳۸۷
حروف نگاری	:	طرح و نشر هامون (فاطمه نظری)
طراح جلد	:	حسین مجلسی
رسم شکل ها	:	محمد هادی مجلسی
لیتوگرافی	:	یاس
چاپ	:	عمران
شمارگان	:	۱۰۰۰ جلد
قیمت دوره ۲ جلدی	:	۱۶۰۰۰تومان
شابک(جلد اول)	:	۹۷۸-۹۶۴-۲۶۵۱-۱۸-۴ ISBN: 978—964-2651-18-4(VoI.1)
شابک(دوره)	:	۹۷۸-۹۶۴-۲۶۵۱-۲۰-۷ ISBN:978-964-2651-20-7(2VoI.Set)

کلیهٔ حقوق این اثر برای مؤلفین و مترجمین و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان – کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ – صندوق پستی ۱۶۳ – ۱۶۷۸۵ – تلفن: (۲۶۳۲) ۹ – ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۲۲۹۷۰۰۷۰، نمابر: ۲۲۹۷۰۰۰۳، پست الکترونیکی: Publish@srttu.edu، وب سایت: http://Publish.srttu.edu

تقدیم به همه آنهائیکه دوستشان داریم

پیش‌گفتار *Preface*

دو کتاب حاضر اولین سری از یک مجموعهٔ چهار جلدی است که در صورت فراهم شدن شرایط، به تدریج شاهد قسمت‌های بعدی آن نیز خواهید بود. ایدهٔ اولیهٔ نگارش این کتاب‌ها در پائیز سال ۸۴ شکل گرفت و دلیل اصلی آن مشکلات بی‌شمار و متنوع ارائه این درس برای دانشجویانی بود که بعضاً یا پایهٔ مناسبی از دروس قبلی و نحوهٔ استدلال منطقی برای این موضوع جدید را نداشتند و یا حداقل اینکه هیچ تسلطی بر زبان انگلیسی برای مراجعه به کتاب‌های اصلی و معرفی شده را دارا نبودند.

در ابتدا سعی نمودیم به منظور ارتقاء سطح زبان دانشجویان تمامی مطالب فراهم شده را بصورت انگلیسی و فصل به فصل در اختیار آنها قرار دهیم که عملاً با وجود تلاش بسیار زیاد آنها نتیجهٔ مناسبی نداشت و از همین روی عزم ما برای نوشتن این کتاب‌ها قطعی گردید، ولی در عین حال به این نکته نیز باید اشاره نمائیم که در ابتدا هیچ تصوری از مدت زمان طولانی مورد نیاز برای انجام کار را در ذهن خود نداشتیم و البته رویدادهای ناخواستهٔ بسیاری نیز مزید بر علت گردیدند.

اما نکته‌ای که ذکر آن بیش از هر چیزی شایان اهمیت است، مسئله **خواستن** جمعی از دانشجویانی بود که با تمام وجود و علی‌رغم همهٔ کمبودها، تأخیرها و حجم بسیار بالای کار هیچ‌گاه کوتاه نیامده و همواره مشوق اصلی و موتور محرکهٔ روحی ما در ادامهٔ این راه ناهموار بودند. آنها با تمام وجود خود برای نیل به این هدف مایه گذاشته و به یاری آنها بود که توانستیم این واقعیت را به اثبات برسانیم که مکانیک کوانتومی نیز همانند بسیاری از مباحث زیبای فیزیک، سنگین اما فهمیدنی بوده و با کمی سعی و تلاش می‌توان به نحو مطلوبی آنرا فرا گرفته و از درک آن لذتی مافوق تصور را بهره‌مند شد.

اما در رابطه با نحوهٔ استفاده از کتاب، ذکر چند نکته کاملاً ضروری است. کتاب‌های حاضر در گام نخست برای دانشجویان و در گام دوم برای اساتید این درس نگارش یافته و از همین روی دانشجو می‌تواند آنرا بصورت مستقل و یا همراه با هر کتابی که به عنوان پایهٔ کار از طرف استاد مربوطه معرفی می‌گردد، به خدمت گرفته و از مطالب آن به نحو قابل توجهی بهره‌مند گردد.

واقعیت آن است که متأسفانه در ایران کتاب گاسیورووِیچ همواره مبنای آموزش این درس بوده که البته به جهت ساختار خاص آن به هیچ عنوان کتابی خودآموز نبوده و همواره دانشجوی کنجکاو را سردرگم روش‌های خلاصه شدهٔ خود می‌نماید. به بیان دقیق‌تر، کتاب گاسیورووِیچ هر چقدر که برای اساتید مسلط بر این موضوع درسی، زیبا، عمیق و البته مختصر و منسجم می‌باشد، از دیگر سو برای دانشجویان به هیچ روی کتابی راحت و قائم به ذات نبوده و همین نکته همراه با استفادهٔ غلط و روش‌های ناصحیح به خدمت گرفته شده برای تدریس آن، همواره تصویری کاملاً مخدوش و نخ‌نما را از این کتاب و مباحث زیبای آن در ذهن دانشجویان تداعی می‌نماید.

ما برای رفع این مشکل مجبور شدیم که تا سرحد امکان روند توالی مطالب حاضر نیز برمبنای کتاب گاسیورووِیچ قرار داده شود که البته کار ما را به جهت تفاوت با سایر کتاب‌های زیباتر و مفهومی‌تر این حوضه بسیار دشوار نمود. به عنوان نمونه بسیاری از نویسندگان در همان فصول اولیه به معرفی ماتریس‌ها می‌پردازند که در اغلب موارد محاسبات مواجه شده را بی‌نهایت ساده‌تر می‌نماید، اما گاسیورووِیچ تنها در مباحث از نیمه به بعد خود به معرفی این مبحث می‌پردازد، که البته ما نیز مجبور به ادامهٔ همین روند بودیم. اما دانشجوی مستعد و کوشا قادر خواهد بود تا پس از مطالعهٔ مطالب حاضر، روند معکوس را به راحتی هر چه تمامتر (و یا با استعانت از کتاب بی‌نظیر ساکورائی،

J. J. Sakurai) خود به تنهایی و در کمال سهولت طی نماید.

حال اجازه دهید کمی به محتوای اصلی این کتاب‌ها بپردازیم. نخست آنکه فصول ۱ و ۲ را صرفاً به عنوان شمائی کلی و البته شوق‌آور برای آغاز درس کوانتومی می‌توان برشمرد که دانشجو ضمن مطالعهٔ آنها تصویری زیبا و البته لذت‌بخش از موضوع را در ذهن خود تداعی نموده و بتواند ره توشهٔ لازم برای طی این مسیر دشوار ولی امکانپذیر را در وجود خود ذخیره نماید. در حقیقت تابش جسم سیاه و دوگانگی موج ـ ذره‌ای از نفس‌گیرترین و در عین حال زیباترین سرچشمه‌های پیدایش مکانیک کوانتومی می‌باشند که توانستند اذهان کلاسیکی دانشمندان را به ضرورت یک خانه‌تکانی اساسی وادار نمایند، واقعیاتی که سیر تاریخی آن بسیار مظلوم واقع شده و از همین روی امروزه کمتر کسی از آن اطلاع داشته و یا حتی در گامی فراتر رغبتی نیز برای دانستن آنها از طرف کسی بروز داده نمی‌شود. امیدواریم که این مطالب ناچیز، هم جان بسیاری از عاشقان شیفته را سیراب نموده و هم بسیاری از دوستداران واقعی فیزیک را به مطالعهٔ هر چه بیشتر آنها تشویق و ترغیب نماید.

در تمامی مراحل کار، همواره مطلوب خود را بر این هدف متعالی متمرکز نموده‌ایم که دانشجو به محض مطالعه اولین صفحات هر فصل، آنچنان شوقی در وجودش شعله‌ور گردد که تا فصل را به پایان نرسانده، احساس آرامش نکرده و البته در طی این مسیر نیز تنها نیازمند تلاشی معقول و در حد توان خود باشد. از همین روی در تمامی مراحل کار، خودآموز بودن اصل نخست و بنیادی نگارش هر مبحث جدیدی بوده است.

اما از فصل ۳ شاهد آغاز جنبه‌های محاسباتی‌تر و البته مورد نیاز مکانیک کوانتومی خواهیم بود. بحث بسته موج و نمایش جنبه‌های ریاضی و مقدماتی آن هدفی است که در این فصل ارائه گردیده و البته سعی نموده‌ایم جنبه‌های مفید و فیزیکی آن نیز تا حد امکان و با عنایت به جنبه‌های موجی ـ ذره‌ای بسط و گسترش یابند.

در فصل ۴ واقعیت پهن‌شدگی بسته موج، همراه با مفاهیم عملگری و معادلهٔ شرودینگر به تفصیل مورد بحث واقع شده‌اند که دامنه آن فصول ۵ و ۶ را نیز در بر می‌گیرد. درست بمانند مطالب آغازین سعی گردیده تا نحوهٔ استدلال‌ها و اثبات‌ها کاملاً روشن و بدور از هرگونه ابهامی باشد، از همین روی تمامی جنبه‌های مرتبط با جواب‌های معادلهٔ شرودینگر هم از دیدگاه ریاضی و هم از دیدگاه مفهومی، به کامل‌ترین صورت ممکن و بی‌هیچ کم و کاستی بررسی گردیده‌اند تا دانشجو در اولین مواجههٔ خود با حل مسائل کوانتومی به امان خدا رها نشده باشد.

در استفاده از مدارهای الکتریکی و خازن‌ها، مسئله شهود و تجسم‌پذیری تمامی پتانسیل‌ها هدف اصلی ما بوده که امیدوارم رهگشای دانشجویان برای عینیت بخشیدن حالت‌های پیچیده‌تر نیز باشد. پدیدهٔ زیبای تونل‌زنی، امواج ایستادهٔ کوانتومی، عملگر پاریته، تبدیل فوریه، همراه با مبحث جالب توجه حد کلاسیکی ارنفست به گونهٔ جامعی در این فصول مورد بررسی واقع شده‌اند که هم برای پدیده‌های نظری و هم برای پدیده‌های تجربی از مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده می‌باشند.

در فصول ۷ و ۸ سعی در ارائه فرمولبندی بنیادی مکانیک کوانتومی داشته‌ایم که همراه با سیستم نمادگذاری دیراک و البته مبحث مهم اندازه‌گیری و مجموعهٔ ویژه توابع هم‌زمان، به اضافهٔ مجموعهٔ کامل عملگرهای جابجاشونده را باید به عنوان جهشی بزرگ در تکمیل و ارائه مفاهیم جدید نظریهٔ کوانتومی دانست که بی‌اطلاع از آنها طی مسیرهای آتی مکانیک کوانتومی به هیچ وجه امکانپذیر نخواهد بود.

اما فصل ۹ را باید نقطه عطفی در مطالب این کتاب در نظر گرفت، مفهوم اندازه حرکت زاویه‌ای از دیدگاه کوانتومی، زمینه را برای درک و حل بسیاری از مطالب مهم و اساسی پیش روی دانشجویان آماده کرده و نخستین گام در بسترسازی مناسب برای درک مفهوم اسپین یعنی یک اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی می‌باشد. در این فصل

مدل‌برداری برای نخستین‌بار معرفی می‌گردد تا بتوان از طریق آن تفاوت‌های موجود میان دیدگاه کلاسیکی و دیدگاه کوانتومی، پیرامون اندازه حرکت زاویه‌ای را به راحتی هر چه تمام‌تر درک و تجسم نمود.

در فصل ۱۰ مسئله اتم هیدروژن غیرنسبیتی بطور کامل و جامع بررسی شده و سعی گردیده تا مفاهیمی همچون حرکت نسبی و حرکت مرکز جرم و همینطور اتم‌های هیدروژن‌گونه از هر نظر فاقد ابهام باشند. اما فصل ۱۱ را باید نوعی جمله معترضه و یا پرداختن به جنبه‌های ریاضی (و البته مرتبط با جبر خطی) مورد نیاز مکانیک کوانتومی در نظر گرفت. در گردآوری و تألیف مطالب این فصل سعی بسیار مبذول گردید تا از تمامی منابع ریاضی مفید و دسترس‌پذیر بطور کامل استفاده گردد (این فصل ۷ بار بازنویسی گردید). دانشجویان مفهوم قطری‌سازی ماتریس‌ها را نخستین بار در کتاب‌های ریاضی فیزیک و یا مکانیک تحلیلی مشاهده می‌نمایند که معمولاً بدون کسب بینشی عمیق از آن گذر نموده و آنگاه در مکانیک کوانتومی مجدداً درگیر آن می‌شوند که البته نتیجه نیز از پیش کاملاً معین است. به همین جهت سعی بسیار گردید که تا حد امکان، این فصل جامع و بی‌نقص باشد که البته امیدواریم حق مطلب نیز به درستی اداء شده باشد.

واقعیت آن است که در مکانیک کوانتومی ماتریسها با نام هایزنبرگ آغاز می‌شوند و از همین روی بی‌مناسبت ندیدیم تا تمام گفتنیهای پیرامون اصل عدم قطعیت را نیز در خاتمهٔ همین فصل ارائه نمائیم، که در این راه سایت دائره‌المعارف فلسفه دانشگاه استانفورد

SEP, Stanford Encyclopedia of Philosophy

زیباترین و در عین حال کامل‌ترین مباحثات را در اختیار ما گذاشت.

اما فصل ۱۲ را باید جالب‌توجه‌ترین و در عین حال مفهومی‌ترین بخش کار در نظر گرفت که در هم‌خوانی کاملی با نخستین مبحث کتاب یعنی تابش جسم سیاه می‌باشد. به بیان دقیق‌تر سعی نمودیم تا خواننده در هر دوی این موارد شاهد دو اوج‌گیری چشم‌گیر در نحوهٔ ارائه مطالب باشد که امیدواریم موفق به انجام آن شده باشیم. هدف اصلی این فصل آن بود که مفهوم جدید و کاملاً کوانتومی اسپین را همراه با تمام حواشی آن به بیانی ساده و کاملاً قابل درک ارائه نمائیم تا تمامی دانشجویان بتوانند از جنبه‌های زیبای آن بهره‌مند گردند.

بدون شک تسلط بر اندازه حرکت زاویه‌ای کل (اسپینی و مداری) قابلیتی است که می‌تواند زمینه را برای درک بسیاری از رویدادهای کوانتومی هموار نماید، از همین روی سعی بسیار گردید تا تمامی جزئیات مرتبط با آن به نحوی شایسته و کامل مورد بررسی قرار گیرند.

از نگاه کلی و در سرتاسر این کتاب‌ها سعی نموده‌ایم تا واژه‌های کلیدی همراه با معادل‌های انگلیسی آنها در کنار هم (و نه در پانوشت‌ها) ارائه شوند تا دانشجوی مستعد و علاقمند بتواند ضمن داشتن شروعی قرص و استوار، ره‌توشهٔ مناسب برای ادامهٔ این راه یعنی استفاده از کتاب‌های اصلی (که جملگی به زبان انگلیسی می‌باشند) را نیز فراهم نموده باشد.

آغاز شرح زندگینامه‌ها در کتب فیزیکی (در زبان فارسی) را باید با کتاب مکانیک آماری رایف (*Reif*) هم معنا انگاشت، اما ایدهٔ نکات تاریخی را بی‌شک مدیون کتاب هاناباس (*Hannabuss*) می‌باشیم که البته در طی مراحل آن سعی بسیار نموده‌ایم که به جهت نقش بسیار پراهمیت آن، به گونه‌ای کامل و جامع و در خور زحمات بی‌شائبهٔ دانشمندان در موارد لزوم ارائه شده باشند.

شاید در نگاه نخست تنها نقص بارز این کتاب را باید در نبود تمرینات پرشمار و متنوع مورد نیاز برای بخش‌های پایانی هر فصل برشمرد که به علت ذیق وقت فراهم نمودن آن هرگز امکانپذیر نگردید. البته سعی نمودیم تا

تمامی مسائل مهم و بنیادی مورد نیاز را در قالب تمرین‌های حل شده و در داخل بخش‌ها بگنجانیم که از همین روی دانشجوی نکته‌بین قادر خواهد بود تا این مسیر را با اتکاء بر توانایی‌های کسب شده و البته کمی سخت‌کوشی به بهترین نحوی طی نماید. اما در صورت لزوم کتاب جدید نورالدین زتیلی (*Nuredine Zettili*) که در دو جلد نگارش یافته و بمانند کتابهای گراینر (*Greiner*) بر روش تفهیم مطالب از طریق حل مسئله استوار می‌باشند، راهنمای بسیار مفیدی است که خوش‌بختانه به نحو شایسته‌ای نیز تجدید چاپ شده و در تمامی کتابفروشی‌ها در دسترس می‌باشد (البته در بررسی‌های چندین و چندبارهٔ خود به این اطمینان رسیده‌ایم که نویسنده این کتاب و گردآورنده و حل‌کنندهٔ مسائل آن حداقل دو فرد یا افراد متفاوتی می‌باشند!) و از همین روی دانشجویان را به استفاده از آنها ترغیب می‌نمائیم.

اما در نهایت ادامه مراتب تشکر و تقدیر خود را نیز باید اعلام نموده و دست همهٔ عزیزانی را که در طی این مسیر دشوار ما را همیاری نمودند، به گرمی بفشاریم.

نخستین و پی‌گیرترین مشوق ما در آغاز نمودن و ادامهٔ این مسیر ناهموار، بی‌هیچ تردیدی دوست بزرگوارمان **آقای حاتم صفایی** بودند که لحظه‌ای از بذل توجهات خیرخواهانهٔ خود دریغ نفرموده و قطعاً بدون حمایت‌های همه‌جانبهٔ ایشان انتشار این کتاب‌ها هیچ‌گاه امکان‌پذیر نمی‌گردید. بخاطر همهٔ محبت‌های دلسوزانه‌ای که در تمامی این سال‌های آشنایی از آن بهره‌مند بوده‌ایم، بر دستان نوازشگر او بوسه می‌زنیم.

تلاش‌های برادران مجلسی (آقایان حسین و محمد هادی) که زحمت طراحی روی جلدها و همین‌طور ترسیم شکل‌های این کتاب‌ها را برعهده داشته‌اند، تأثیر انکارناپذیری در درک هر چه بهتر مطالب این کتاب‌ها و همینطور کیفیت آنها داشته است که شاید اوج آنرا باید در فصل‌های آغازین جلد اول و فصل‌های پایانی جلد دوم جستجو نمود (البته در آخرین مراحل کار تصمیم برای چاپ عکس‌های رنگی در انتهای هر جلد گرفته شد، به نحویکه تمامی شکل‌های مشخص شده با علامت * ، بصورت یک پیوست در انتهای هر جلد قرار گرفته‌اند). بدون شک محمدهادی مجلسی برای رسیدن به این توانایی و البته سرعت مافوق تصور خود در روزهای پایانی کار، رنج بسیاری را متحمل گردید که البته همراه با راهنمائیها و نظارت‌های دلسوزانهٔ حسین مجلسی شاهکاری را پدید آورد که چشم هر بیننده‌ای را نوازش می‌دهد. از همین روی همواره سپاسگزار آنها خواهیم بود.

اما در طی مراحل آماده‌سازی دست‌نوشته‌ها برای چاپ، تنها فرد حرفه‌ای تیم ما سرکار خانم فاطمه نظری در انتشارات طرح و نشر هامون (همراه با آقای شهرام نبی‌پور) بودند که با صبر و حوصله‌ای مثال‌زدنی و با تبحری بی‌نظیر، تمام کاستی‌های تیم آماتوری ما را با دقت کامل برطرف می‌نمودند. ایشان درواقع بهترین انتخاب و تنها فردی بودند که توانستند این کار سنگین، طولانی‌مدت و البته فرسایشی را به سرمنزل مقصود برسانند و از این بابت همگی سپاسگزار ایشان می‌باشیم.

سعید نائیه از نیمهٔ کار همراه ما شد، اما در مراحل پایانی نقش هوای تازه و تقویت‌کنندهٔ تیم ما را داشت. پس از تایپ نهایی، کتاب‌ها پنج بار غلط‌گیری شدند، اما ششمین و مهمترین آنها را سعید علی‌رغم مشغله فراوان کاری و تنها در طی نخوابیدن‌های شبانهٔ خود به انجام رسانید. او در مباحثاتی که با یکدیگر داشتیم از هیچ کمکی مضایقه نمی‌کرد و از همین روی تا ابد سپاسگزار او خواهیم بود.

آقای عبدالله حمیدی نیز با شوق فراوان مطالب ما را دنبال و نظرات مفید خود را اعلام می‌نمود، که از ایشان نیز سپاسگزاری می‌کنیم.

این کتاب بدون دسترسی به منابع اصلی و جدید هیچ‌گاه صورت واقعیت به خود نمی‌گرفت. زحمات آقای علی ارسطوئی، مدیر چاپ و تکثیر ارس، در این زمینه انکارناپذیر بوده و بیش از نیمی از منابع مورد استفاده خود را

مرهون جدیدت و پشتکار ایشان می‌باشیم. امیدواریم تشکر صمیمانهٔ ما را بپذیرند.

عزیزان ما در چاپ و تکثیر جوان، چه در زمینهٔ تأمین منابع جدید و چه در زمینهٔ پرینت‌های بی‌نقص خود، همواره یار و یاور ما بوده‌اند. بدین جهت از آقایان مرتضی فراهانی و مجید رحیمی نهایت تشکر را داریم.

اما گمنام‌ترین و در عین حال مؤثرترین اجزاء این داستان را، بدون شک و همانگونه که اشاره گردید، دانشجویان ما تشکیل می‌دهند.

گفتگوها و مباحثاتی که در کلاسها مطرح می‌گردید، همراه با بررسی‌های نقادانه و موشکافانهٔ آنها از چنان نقش انکارناپذیری در کیفیت مطالب این کتاب‌ها برخوردار است که نمی‌توان در مورد آن حق مطلب را اداء نمود. بررسی‌های دقیق آقایان مهدی نجفی، جواد قربانی، .... و خانم‌ها زرنق، آرش، عبدی، جبلی، مصباح، ذاکری، رشیدی، زارع و خواهران موسی‌الرضایی و ... از آنچنان تأثیر شگرفی برخوردار است که در صورت نبود آنها مسلماً این مطالب از کیفیت کمتری بهره‌مند می‌شدند که از این بابت بسیار مدیون آنها می‌باشیم.

در خاتمه قصد داریم به جهت احترام به زحمات شبانه‌روزی تمامی این دانشجویان و به‌منظور زنده‌نگهداشتن خاطرهٔ شیرین آن کلاس‌ها، اسامی تمامی آنها را به یادگار بر این صفحات نقش ببندیم،

فاطمه آرانی‌زاده، معصومه آرش، صدیقه اشراقی، نسرین امامی میبدی، مریم بهمن، حمیده پرویز، مرضیه تمیم‌داری، زهرا جعفری، زهرا جهانبانی، زهرا حاجی علو زرنق، آزاده حسین‌جمال، پیمان حشمتی، محبوبه خشن، آمنه خورشیدی، الهه داودآبادی، طیبه ذاکری، معصومه رشیدپور، عصمت رضائی، عاطفه زارع مهرجردی، نجمه‌الصباح زاهدی، فاطمه شریف یزدی، ابوالفضل شوندی، مؤمنه شیخ جبلی، هانیه صالحی، فاطمه صفری زنجانی، صابره صولی، نفیسه طاهری، ناصر عبادی مقدم، نرگس عبدی، سمانه علامه، ماه‌منیر علی، فاطمه قرچکی، محمدباقر کاظمی، مژگان کوهنورد، عباس گل‌چین، منالسادات لاجوردی، حسین مجلسی، لیدا محرابی، راحله محسنی، زهرا محمدی‌نژاد، نجمه مصباح، محمدمهدی منتظری، مریم مهدوی‌فر، حبیبه ناصرو همچنین محمدصادق رمضان‌شیرازی و محمدجواد رضوان‌نیا.

با آرزوی موفقیت و سربلندی برای تمامی این عزیزان

اردیبهشت ۸۷

ابوالفضل فرداد ـ ندا حجازی

AbolfazlFardad @ yahoo.com

NedHejazi @ yahoo.com

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱: سرچشمهٔ پیدایش نظریهٔ مکانیک کوانتومی، تابش جسم سیاه

۱-۱) تابش اجسام گرم ۱-۳

۱-۲) جسم سیاه ۱-۶

قانون کرشهف ۱-۷

نکات تاریخی ۱-۱۰

مثال‌هایی در اجسام سیاه ۱-۱۳

۱-۳) قانون استفان ـ بولتزمن ۱-۱۴

نکات تاریخی ۱-۱۵

فشار تابشی ۱-۱۶

نکات تاریخی ۱-۱۹

۱-۴) قانون جابجائی وین ۱-۲۳

نکات تاریخی ۱-۲۸

۱-۵) اندازه‌گیری توزیع طیفی تابش‌های جسم سیاه ۱-۳۲

نکات تاریخی ۱-۳۴

۱-۶) نظریهٔ کلاسیکی تابش کاواک، فاجعهٔ فرابنفش ۱-۴۰

نکات تاریخی ۱-۵۰

نکات تاریخی ۱-۵۴

۱-۷) بینش شگفت‌انگیز پلانک ۱-۵۶

نکات تاریخی ۱-۶۵

پیرامون قانون دوم نظریه مکانیک حرارت ۱-۶۷

۱-۸) تابش جسم سیاه مربوط به پرتوهای کیهانی در دمای $3K$ ۱-۷۲

تاریخچهٔ کشف تابش زمینهٔ میکروموجی کیهانی ۱-۷۴

مأموریت ماهوارهٔ کوبه ۱-۷۶

عنوان **صفحه**

فصل ۲: دوگانگی موج ـ ذره‌ای

۲-۱) مفاهیم کلاسیک ذره و موج ۲-۳
۲-۲) رفتار ذره‌گونهٔ تابش الکترومغناطیسی ۲-۴
اثر فوتوالکتریک ۲-۵
اثر کامپتون ۲-۷
۲-۳) رفتار موج‌گونهٔ ذرات ۲-۱۳
فرضیهٔ دوبروی ۲-۱۴
نکات تاریخی ۲-۱۷
آزمایش دیویسون ـ گرمر ۲-۲۳
آزمایش دوشکافی ذرات ۲-۲۸
پراش مولکولهای بزرگ و سنگین از توری پراش ۲-۳۳
اثر کاپیتزا ـ دیراک ۲-۳۶
۲-۴) تعبیر امواج مادی توسط نظریهٔاحتمال ۲-۴۲
تعبیر ماکس بورن از امواج مادی ۲-۴۵
نکات تاریخی ۲-۵۰
۲-۵) اصل برهم‌نهی برای توابع موج ۲-۵۵
۲-۶) تأثیر اندازه‌گیری بر رفتار ذرات ۲-۵۸
۲-۷) آیا فوتون واقعاً وجود دارد؟ ۲-۶۲

فصل ۳: تک‌موج‌ها و بسته‌موج

۳-۱) برهم‌نهی امواج سینوسی ۳-۳
اختلاف در فازهای اولیه ۳-۳

عنوان **صفحه**

اختلاف راه ۳-۴
اختلاف زمانی ۳-۵
اختلاف در فاز، راه و زمان ۳-۷
اختلاف در فرکانس و عدد موج ۳-۸
پدیدهٔ زنش ۳-۹
۳-۲) توصیف‌های ذره‌ای و موجی در فیزیک کلاسیک ۳-۱۲
۳-۳) بسته موج‌ها از دیدگاه کاملاً کلاسیکی ۳-۱۶
مدهای انتقال انرژی و برهم کنش‌ها ۳-۲۵
۳-۴) سرعت‌های فاز و گروه ۳-۶
۳-۵) قضیهٔ پهنای باند ۳-۳۲
۳-۶) بسته موج و خواص ذره‌ای ۳-۴۵

فصل ۴ : معادلهٔ شرودینگر

۴-۱) موجهای تخت و بسته موجها ۴-۳
۴-۲) حرکت بسته‌های موج ۴-۹
۴-۳) تبدیل فوریه ۴-۱۲
۴-۴) قضیهٔ انتگرال فوریه ۴-۱۷
فرمول پارسوال ۴-۱۸
۴-۵) معادلهٔ شرودینگر ۴-۱۹
از معادلهٔ شرودینگر چه انتظاراتی داریم؟ ۴-۲۳
نکات تاریخی ۴-۲۸
شرایط مورد نیاز برای یک تابع موج قابل قبول ۴-۳۱
معادلهٔ شرودینگر در سه بعد ۴-۳۲
عملگر هامیلتونی ۴-۳۵

عنوان **صفحه**

تابع موج و تبدیل فوریه در حالت کلی ۴-۳۸
تابع دلتای دیراک در سه بعد ۴-۴۱
۴-۶) اصل عدم قطعیت هایزنبرگ ۴-۴۲
تعریف عدم قطعیت ۴-۴۳
حدّ کلاسیکی ۴-۴۹
کمیت‌های خوش تعریف ۴-۵۰
عدم قطعیت انرژی ـ زمان ۴-۵۰
۴-۷) تعابیر احتمالاتی و بقای احتمال ۴-۵۲
جریان چگالی احتمال یا جریان احتمال ۴-۵۹
تعبیر فیزیکی ۴-۶۱
۴-۸) مقادیر چشمداشتی ۴-۶۳
۴-۹) تابع موج در فضای اندازه حرکت ۴-۷۰
عملگر x_{op} در فضای اندازه حرکت ۴-۷۴
عملگر انرژی و مقدار چشمداشتی آن ۴-۸۲
عملگر زمان ۴-۸۵
۴-۱۰) ترکیب عملگرها و روابط جابجائی ۴-۸۷
اتحادهای جبری جابجائی‌ها ۴-۹۰

فصل ۵: معادلات ویژه مقداری، قضیهٔ بسط و عملگر پاریته

۵-۱) جداسازی متغیرها ۵-۳
۵-۲) معادلات ویژه مقداری ۵-۷
اندازه حرکت ۵-۹
انرژی ۵-۹
مکان ۵-۱۰

عنوان **صفحه**

۵-۳) حالت‌های مقید در مکانیک کوانتومی ۵-۱۹

پتانسیل با دیواره‌های بی‌نهایت ۵-۲۰

ناحیهٔ I ، $0 < x < L$ ۵-۲۴

ناحیهٔ II ، $x < 0$ ۵-۲۵

ناحیهٔ III ، $x > L$ ۵-۲۶

چاه پتانسیل با دیواره‌های بی‌نهایت ۵-۲۷

پیوستگی در تمامی نواحی فضا ۵-۲۹

توابع متعامد ۵-۳۷

۵-۴) قضیهٔ بسط و تعبیر فیزیکی آن ۵-۴۷

تعبیر فیزیکی ضرائب بسط ۵-۵۰

جواب‌های کلی معادلهٔ شرودینگر وابسته به زمان در حالت $V = V(x)$ ۵-۵۳

۵-۵) ویژه توابع اندازه حرکت و ذرهٔ آزاد ۵-۵۶

ذرهٔ آزاد و مسئلهٔ بهنجارشدن آن ۵-۵۸

تبهگنی ۵-۶۸

۵-۶) عملگر پاریته ۵-۶۹

نکات تاریخی ۵-۷۶

فصل ۶: پتانسیل‌های سادهٔ یک‌بعدی

۶-۱) پلهٔ پتانسیل ۶-۴

پلهٔ پتانسیل حالت $E > V_0$ ۶-۶

شرایط مرزی ۶-۱۰

پلهٔ پتانسیل حالت $E < V_0$ ۶-۲۲

۶-۲) سد پتانسیل مربعی (متقارن) حالت $E > V_0$ ۶-۳۳

عبور تشدید یافته ۶-۳۸

عنوان **صفحه**

سد پتانسیل مربعی، حالت $E < V_0$ ۶-۴۱
پدیدهٔ تونل‌زنی ۶-۴۸
واپاشی آلفائی ۶-۵۶
وارون‌شدگی آمونیاک و ساعت اتمی ۶-۵۸
۶-۳) چاه پتانسیل ۶-۶۱
چاه پتانسیل مربعی حالت $E > 0$ ۶-۶۱
چاه پتانسیل مربعی حالت $E < 0$ ۶-۶۷
حالت $A=0$ ، جواب‌هائی با پاریتهٔ فرد ۶-۷۰
حالت $B=0$ ، جوابهائی با پاریتهٔ زوج ۶-۷۱
۶-۴) نوسانگر هارمونیک خطی ۶-۸۰
انرژی حالت پایه و صفر مطلق ۶-۹۱

فصل ۷: فرمولبندی مکانیک کوانتومی، روش‌های عملگری I

۷-۱) فضاهای برداری و عملگرها ۷-۳
حالت‌های تبهگن ۷-۶
عملگرهای یکانی و عملگرهای وارون ۷-۷
۷-۲) مشاهده‌پذیرهای هم‌زمان ۷-۹
مشاهده‌پذیرهای فیزیکی ۷-۹
مشاهده‌پذیرهای هم‌سازگار ۷-۱۰
عملگرهای غیرجابجا شونده و روابط عدم قطعیت ۷-۲۱
۷-۳) بستگی زمانی و حد کلاسیکی ۷-۲۴
بقای انرژی ۷-۲۶
بقای اندازه حرکت ۷-۲۷
قضیهٔ ارنفست، حد کلاسیکی ۷-۲۷
نکات تاریخی ۷-۳۱

عنوان **صفحه**

فصل ۸: فرمولبندی مکانیک کوانتومی، روش‌های عملگری *II*

۸-۱) فضای کت ۸-۳
عملگرها ۸-۴
فضای برا و ضرب داخلی ۸-۵
عملگرهای تصویر (تصویرگر) ۸-۱۵
۸-۲) طیف انرژی نوسانگر هارمونیک ساده ۸-۱۸
رسیدن از عملگرها به معادلهٔ شرودینگر ۸-۲۸
۸-۳) تغییر پایه‌های فضا و عملگر تبدیل ۸-۳۳
تبدیل یکانی ۸-۳۵
تبدیلات یکانی بی‌نهایت کوچک ۸-۴۵
۸-۴) عملگر تحول زمانی ۸-۴۷
قضیهٔ ویریال ۸-۵۱
۸-۵) تصویر شرودینگر و تصویر هایزنبرگ ۸-۵۷
نکات تاریخی ۸-۶۹
۸-۶) نوسانگر هارمونیک ساده ۸-۷۱
تصاویر شرودینگر و هایزنبرگ ۸-۷۱
نکات تاریخی ۸-۸۲

فصل ۹: اندازه حرکت زاویه‌ای مداری

۹-۱) اندازه حرکت زاویه‌ای مداری، روابط جابجائی ۹-۳
اندازه‌گیری در مکانیک کوانتومی ۹-۸
۹-۲) اندازه حرکت زاویه‌ای مداری و دوران‌های فضایی ۹-۱۶
۹-۳) ویژه مقادیر و ویژه توابع عملگرهای $\mathcal{L}^2$ و $\mathcal{L}_z$ ۹-۲۴
ویژه توابع هم‌زمان $\mathcal{L}^2$ و $\mathcal{L}_z$ ۹-۲۷

عنوان **صفحه**

حالت خاص $m = 0$ ۹-۲۹
فرمول رودریگز ۹-۳۵
چند جمله‌ایهای لژاندر در حالت کلی ۹-۴۱
هماهنگهای کروی..... ۹-۴۷
عملگر پاریته و هماهنگ‌های کروی ۹-۵۱
۹-۴) اثر عملگرهای $\mathcal{L}_x$ و $\mathcal{L}_y$ بر روی $Y_{l,m}(\theta,\varphi)$..... ۹-۵۶
حالت $m= 0$ ۹-۷۰
حالت $l = 0$ ۹-۷۲
۹-۵) ذره‌ای واقع بر سطح کره ۹-۷۳
دوران‌کنندهٔ صلب ۹-۷۴
ترازهای انرژی دورانی یک مولکول دواتمی ۹-۷۵
نکات تاریخی ۹-۷۸

فصل ۱۰: حل معادله شرودینگر در سه بعد (حالت‌های مانا) و اتم هیدروژن (مدل غیرنسبیتی)

۱۰-۱) معادلهٔ شرودینگر برای یک سیستم دو جسمی؛ حرکت نسبی ۱۰-۴
۱۰-۲) جداسازی معادلهٔ شرودینگر در دستگاه مختصات دکارتی ۱۰-۸
ذرهٔ آزاد (در سه بعد) ۱۰-۱۰
بهنجارش..... ۱۰-۱۳
جعبه سه بعدی (مکعب مستطیل) ۱۰-۱۴
تبهگنی ۱۰-۱۸
نوسانگر هارمونیک سه بعدی..... ۱۰-۲۰
در دستگاه مختصات دکارتی ۱۰-۲۰
ترازهای انرژی ۱۰-۲۱

عنوان **صفحه**

نوسانگر هارمونیک سه بعدی همسانگرد ۱۰-۲۲
تبهگنی ۱۰-۲۳
۱۰-۳) پتانسیل‌های مرکزی ۱۰-۲۴
جداسازی معادلهٔ شرودینگر در مختصات کروی ۱۰-۲۴
تبهگنی ۱۰-۲۷
چگالی احتمال ۱۰-۲۸
پاریته ۱۰-۲۹
تبدیل به حالت یک بعدی ۱۰-۳۰
۱۰-۴) ذرهٔ آزاد (در مختصات کروی) ۱۰-۳۶
معادلهٔ دیفرانسیل بسل کروی و جوابهای آن ۱۰-۳۸
توابع هنکل کروی ۱۰-۴۲
ویژه توابع ذرهٔ آزاد در مختصات کروی ۱۰-۴۳
بسط یک موج تخت براساس هماهنگ‌های کروی ۱۰-۴۴
۱۰-۵) چاه پتانسیل مربعی (متقارن) سه بعدی ۱۰-۴۸
جواب قسمت داخلی ۱۰-۵۰
جواب قسمت خارجی ۱۰-۵۰
ترازهای انرژی ۱۰-۵۳
حالتهای مقید با $E=0$ $(l>1)$ ۱۰-۶۱
تبهگنی ۱۰-۶۵
پتانسیل مربعی (متقارن) با دیواره‌های بی‌نهایت ۱۰-۶۶
۱۰-۶) اتم هیدروژن ۱۰-۶۹
ترازهای انرژی ۱۰-۷۸
تبهگنی ۱۰-۷۹
ویژه توابع حالت‌های مقید ۱۰-۸۴
ویژه توابع شعاعی حالت‌های مقید ۱۰-۸۵

عنوان **صفحه**

چند جمله‌ای‌های لاگر وابسته ۱۰-۸۹
چند جمله‌ای لاگر وابسته و چند جمله‌های فوق هندسی هم شار ۱۰-۹۱
توابع موج هیدروژنی مربوط به طیف‌های گسسته ۱۰-۹۳
توزیع احتمال ۱۰-۱۰۰
مقادیر چشمداشتی ۱۰-۱۰۶
حالت $A=1$ ۱۰-۱۰۸
حالت $A=2$ ۱۰-۱۱۱
۱۰-۷) رشتهٔ هیدروژن گونه‌های تک اتمی، ایزوتوپهای هیدروژن، پوزیترونیوم و ۱۰-۱۱۵
اتمهای میوآنی ۱۰-۱۱۸
۱۰-۸) نوسانگر همسانگرد سه بعدی ۱۰-۱۱۹
ترازهای انرژی ۱۰-۱۲۴
ویژه توابع نوسانگر همسانگرد سه بعدی ۱۰-۱۲۵
تبهگنی ۱۰-۱۲۶

فصل ۱۱: نمایش ماتریس توابع موج و عملگرها

۱۱-۱) نمایش ماتریسی توابع موج و عملگرها ۱۱-۴
ضرب داخلی (اسکالر) و ضرب خارجی ماتریسها ۱۱-۸
خواص جبری ماتریسها ۱۱-۱۰
۱۱-۲) عملگرهای هرمیتی، عملگرهای یکانی و خواص جبری ۱۱-۱۳
۱۱-۳) ماتریسهای قطری ۱۱-۱۶
معادلهٔ ویژه مقداری ماتریسی و ویژه مقادیر ۱۱-۱۷
رابطه کامل بودن یا بسته بودن ۱۱-۲۰
تغییر نمایش و تبدیلات یکانی ۱۱-۲۳
تعبیر فیزیکی ۱۱-۲۸

عنوان **صفحه**

۱۱-۴) قطری سازی یک ماتریس هرمیتی ۱۱-۲۹

تبدیلات متعامد ۱۱-۳۷

قطری‌سازی ۱۱-۴۲

تعبیر فیزیکی ۱۱-۵۳

۱۱-۵) نوسانگر هارمونیک ساده، یک بررسی مجدّد ۱۱-۶۲

۱۱-۶) اندازه حرکت زاویه‌ای مداری ۱۱-۷۱

۱۱-۷) نمایش ماتریسی عملگرهای نمائی..... ۱۱-۷۶

نکات تاریخی ۱۱-۸۴

پیرامون روابط عدم قطعیت ۱۱-۸۴

اصل عدم قطعیت ۱۱-۸۶

مسیر هایزنبرگ در رسیدن به روابط عدم قطعیت ۱۱-۸۷

استدلال هایزنبرگ..... ۱۱-۹۰

تعبیر رابطهٔ هایزنبرگ..... ۱۱-۹۳

روابط عدم قطعیت یا اصل عدم قطعیت ۱۱-۹۴

شرح و تفسیر ریاضی ۱۱-۹۸

فصل ۱۲: اسپین

۱۲-۱) نگاهی کلی به اندازه حرکت زاویه‌ای، طیف ویژه مقادیر J^2 و J_z ۱۲-۳

۱۲-۲) نمایش ماتریسی عملگرهای اندازه حرکت زاویه‌ای کل..... ۱۲-۱۰

۱۲-۳) اسپین و اندازه حرکت زاویه‌ای ۱۲-۱۶

برهم کنش ممان دوقطبی مغناطیسی با یک میدان مغناطیسی خارجی ۱۲-۱۹

الف) حالت $\vec{B} = cte$ (میدان یکنواخت) ۱۲-۱۹

ب) حالت $\vec{B} \neq cte$ (میدان غیریکنواخت)..... ۱۲-۲۴

آزمایش اشترن ـ گرلاخ ۱۲-۲۵

عنوان **صفحه**

اسپین، یک اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی (درونی)..... ۱۲-۳۳
نکات تاریخی ۱۲-۴۲
۱۲-۴) اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی..... ۱۲-۴۹
اسپین و تابع موج ۱۲-۵۳
۱۲-۵) اسپین یک دوم..... ۱۲-۵۸
نمایش ماتریسی اسپین $\frac{1}{2}$ ۱۲-۶۷
ماتریس‌های اسپین پائولی..... ۱۲-۷۵
ویژه مقادیر و ویژه توابع یک مؤلفهٔ دلخواه از حالت اسپین $s = \frac{1}{2}$ ۱۲-۷۸
I) حالت $m = \frac{1}{2}$ ۱۲-۸۰
II) حالت $m = -\frac{1}{2}$ ۱۲-۸۲
دوران در فضای اسپینی دو مؤلفه‌ای $(s = \frac{1}{2})$ ۱۲-۸۴
۱۲-۶) اندازه حرکت زاویه‌ای کل ۱۲-۸۶
اندازه حرکت زاویه‌ای کل و دوران ۱۲-۸۸
۱۲-۷) جمع نمودن اندازه حرکت‌های زاویه‌ای ۱۲-۸۹
روابط بازگشتی برای ضرائب کلبش ـ گوردن ۱۲-۱۰۴
ضرائب کلبش ـ گوردن برای $j_2 = s, j_1 = l$ ۱۲-۱۱۱
ویژه توابع $j_2 = \frac{1}{2}$, $j_1 = l$ ۱۲-۱۱۸
افزودن دو اسپین با مقدار $\frac{1}{2}$ ۱۲-۱۱۹
۱۲-۸) برهم کنش اسپین ـ مدار..... ۱۲-۱۲۳
جمع اندازه حرکت‌های زاویه‌ای و مدل برداری ۱۲-۱۲۸
نسبیت و ترازهای انرژی اتم هیدروژن..... ۱۲-۱۳۴
۱۲-۹) میدان مغناطیسی خارجی ۱۲-۱۳۸
میدان مغناطیسی ضعیف خارجی ۱۲-۱۳۹
(اثر نابهنجار زیمن) ۱۲-۱۳۹
میدان مغناطیسی قوی خارجی ۱۲-۱۵۰
(اثر پاشِن ـ بَک) ۱۲-۱۵۰
نکات تاریخی ۱۲-۱۵۱

Chapter 1

The Origin of Quantum Mechanics Manifestation, Black Body Radiation

فصل ۱

سرچشمهٔ پیدایش نظریهٔ مکانیک کوانتومی، تابش جسم سیاه

۱-۱) تابش اجسام گرم

۱-۲) جسم سیاه

۱-۳) قانون استفان ـ بولتزمن

۱-۴) قانون جابجایی وین

۱-۵) اندازه‌گیری توزیع طیفی تابش‌های جسم سیاه

۱-۶) نظریهٔ کلاسیکی تابش کاواک، فاجعه فرابنفش

۱-۷) بینش شگفت‌انگیز پلانک

۱-۸) تابش جسم سیاه مربوط به پرتوهای کیهانی در دمای $3K$

مقدمه *Introduction*

«همانند این است که آدم بتواند آب را یا یک لیوان پر بخورد یا اصلاً هیچ نخورد، ولی از نوشیدن هر مقداری بین صفر و یک لیوان پر، دستش به حکم یک قانون طبیعت کوتاه باشد»

جورج گاموف

اصطلاح فیزیک کوانتومی برای بسیاری از افراد غیرمتخصص هراس‌آور بنظر می‌رسد ولی این نظریه علی‌رغم مفاهیم عمیقی که در بر دارد، به همان اندازه‌ایکه جورج گاموف تشبیه کرده قابل درک است. به جرأت می‌توان گفت که از لحاظ عمق تأثیر بر دانش فیزیک این نظریه دست‌کمی از نظریهٔ نسبیت ندارد. اگر چه دانشمندان زیادی در توسعهٔ نظریهٔ‌کوانتومی تلاش کرده‌اند ولی مسئول اصلی پیدایش این نظام بنیادی انقلابی کسی نبود جز ماکس پلانک. وی در سال ۱۹۰۰ هنگام مطالعه توزیع فرکانسی تابش گرمائی کشف نمود که سیستم‌های اتمی انرژی تابشی را بصورت مقادیر **گسسته** یا **کوانتوم**، و نه به صورت مقادیر پیوسته، مبادله می‌کنند. حال قصد داریم در این فصل به شرح کامل این موضوع بپردازیم.

۱-۱) تابش اجسام گرم *Heated Bodies Radiations*

امروزه این واقعیت که سطح جسم داغ انرژی را بصورت تابش الکترومغناطیس از خود گسیل می‌کند، پدیده‌ای کاملاً معمولی و شناخته شده می‌باشد. درواقع این گسیل در هر دمائی بالاتر از صفر مطلق می‌تواند روی داده و طیف آن دارای توزیعی از تمامی طول موج‌ها است. البته از زمان گذشته درکی کلی پیرامون این رویداد وجود داشته و همواره عقیده بر این بوده که گرما سبب می‌شود مولکول‌ها و اتم‌ها در یک جسم جامد به حالت ارتعاش درآیند. مولکول‌ها و اتم‌ها نمونه‌های پیچیده‌ای از بارهای الکتریکی هستند و از آزمایش‌های هرتز و پیش‌بینی‌های ماکسول اثبات می‌گردد که بارهای الکتریکی در حال نوسان، از خود تابش‌های الکترومغناطیسی را گسیل می‌نمایند. علاوه بر این با توجه به معادلات ماکسول این حقیقت را در می‌یابیم که این تابش با سرعت نور در فضا منتشر شده و از همین روی ماهیت نور و تابش گرمائی درواقع همان امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. به بیان دقیق‌تر توضیح کلی این پدیده را می‌توان بصورت ذیل ارائه نمود،

«وقتی جسمی گرم می‌شود، ارتعاشات مولکول‌ها و اتم‌ها باعث نوسان بارهای الکتریکی آنها شده و این بارهای نوسان کننده نیز تابش‌های الکترومغناطیسی را از خود گسیل می‌نمایند»

همانطور که می‌دانید ماده در حالت چگال خود (جامدات، مایعات و همچنین گازهای چگال داغ) همواره یک طیف پیوسته از تابش الکترومغناطیسی را گسیل می‌نماید. توزیع این طیف برحسب طول موج که اصطلاحاً به آن **توزیع طیفی تابش** (*spectral distribution of radiation*) اطلاق می‌گردد، شدیداً به دما وابسته می‌باشد. در دماهای پائین (دمای زیر $500^{\circ}C$) بخش عمدهٔ انرژی گسیل شده در طول موج‌های بلند نظیر ناحیهٔ مادون قرمز (*infrared*) متمرکز می‌شود، اما با افزایش دما شاهد آن خواهیم بود که کسر قابل توجهی از انرژی گسیل شده در طول موج‌های کوتاه‌تر ساطع خواهد شد. به عنوان مثال در دماهای بین $500^{\circ}C$ تا $600^{\circ}C$، بیشترین بخش انرژی تابشی دارای طول موج‌هائی در محدودهٔ طیف نور مرئی بوده و در این محدودهٔ دمائی، شیء به یک جسم گداخته و فروزان تبدیل شده و شروع به درخشیدن می‌کند.

اما در دمای حدود $3000^{\circ}C$ توزیع طیفی تابش به نحو چشمگیری به طول موج‌های کوتاه‌تر جابجا شده و شاهد جسمی خواهیم بود که کاملاً سفید بنظر می‌رسد. واقعیت آن است که نه تنها توزیع طیفی تابش با دما تغییر می‌کند بلکه حتی توان کل تابش شده (انرژی کل تابش شده در واحد زمان) نیز به دما حساس بوده و با بالا رفتن دما دچار افزایش می‌گردد. آنچه که در این مرحله باید به آن توجه داشت حضور این واقعیت است که تابش گسیل شده از یک جسم گرم علاوه بر دما به ساختار خود آن جسم نیز بستگی دارد. برای درک بهتر این موضوع اجازه دهید که در گام نخست ابتدا بطور اجمالی به بررسی چگونگی فرایند جذب تابش در مواد مختلف بپردازیم. بطور مثال شیشه به آن دسته از مواد تعلق دارد که نور را چندان جذب نکرده و بخش عمدهٔ آنرا از خود عبور می‌دهند. از طرف دیگر، در سطح یک فلز براق و صیقلی شده، نور آنچنان جذب نشده و تقریباً بطور کامل بازتابش می‌شود. اما برای ماده سیاه‌رنگی بمانند دوده، نور نه عبور کرده و نه منعکس می‌شود، بلکه تقریباً به طور کامل جذب شده و از همین روی پس از تابش نور، جسم گرمتر می‌شود. حال قصد داریم که این نوع رفتارهای متفاوت را با در نظر گرفتن نور بصورت یک موج الکترومغناطیسی که می‌تواند با بارهای الکتریکی موجود در ماده برهم کنش نماید، توضیح دهیم. ذکر این نکته کاملاً ضروری است که گرچه درک کامل رویدادهای فوق تنها با کمک گرفتن از مکانیک کوانتومی امکان‌پذیر است، اما از دید کلی و با تکیه بر فیزیک کلاسیک نیز می‌توان بسیاری از جنبه‌های عام آنرا بصورت ذیل توصیف نمود:

واقعیت آن است که در شیشه الکترون‌هائی وجود دارند که می‌توانند در پاسخ به میدان الکتریکی نوسان‌کنندهٔ خارجی (یک موج الکترومغناطیسی) خود نیز به نوسان درآیند، اما از آنجائیکه این بارهای الکتریکی قویاً به اتم‌ها متصل می‌باشند از همین روی تنها در فرکانس‌های معینی قادر به نوسان

می‌باشند. برای یک شیشه معمولی هیچ یک از این فرکانس‌ها در گسترهٔ نـور مرئـی نبـوده و از همـین روی با نور مرئی هیچ نوع تشدیدی (*resonance*) صورت نمی‌پذیرد، بنابراین انرژی نـسبتاً کمـی بـه هنگام عبور نور از آن جذب ماده می‌شود (شیشه نسبت به بعضی از فرکانس‌هـای خـارج از ناحیـهٔ نـور مرئی، یعنی ناحیهٔ مادون قرمز و ماوراء بنفش (*ultraviolet*) کاملاً کدر است).

اما از طرف دیگر، یک قطعه فلز شامل الکترون‌های آزادی است که مـی‌تواننـد بـه راحتـی در سرتاسـر جسم حرکت کنند و همین مسئله دلیل اصلی براق بودن سطح فلزات است. این الکتـرون‌هـای آزاد بـه راحتی می‌توانند در پاسخ به یک میدان الکتریکی نوسان کننده خارجی، با دامنه‌های بزرگـی شـروع بـه نوسان نمایند و همین مسئله سبب می‌شود تا این الکترون‌ها درست بمانند جریان‌های الکتریکی داخـل یک آنتن، تابش الکترومغناطیسی را از خود ساطع نمایند. درواقـع ایـن تـابش ایجـاد شـده همـان نـور منعکس شده از سطح فلز می‌باشد. در چنین وضعیتی بخش کـوچکی از انـرژی فـرودی جـذب شـده و بخش اعظم آن بصورت موج انعکاس‌یافته، مجدداً از سطح جسم تابش می‌گردد.

اما در رابطه با دوده، توجه به این واقعیت کاملاً ضروری است که دوده، البته نه بـه خـوبی فلـزات، بـه علت حضور عنصر کربن هادی جریان الکتریکی است. در این نـوع از مـواد الکتـرون‌هـای غیرمقیـدی وجود دارند که می‌توانند در سرتاسر جسم جامد حرکت نماینـد، امـا در حـین حرکـت خـود بـا اتمهـا و یون‌های واقع در سـر راه خـود نیـز برخـورد مـی‌نماینـد، از همـین روی ایـن الکتـرون‌هـا، نـسبت بـه الکتـرون‌هـای آزاد فلـزات، دارای مـسافت آزاد میـانگین (*mean free path*) کوتـاهی مـی‌باشـند. برخوردهای صورت گرفته باعث ارتعاش اتم‌ها و یون‌ها شده و همین مسئله سبب می‌گردد تا بخـشی از انرژی فرودی بصورت گرما ظاهر شود. از طرف دیگر گرچه الکترون‌هـای موجـود در دوده، نـسبت بـه الکترون‌های آزاد فلزات، دارای مسافت آزاد کوچکی می‌باشند، اما نسبت به الکترون‌های مقیـد در درون اتم‌ها بسیار آزادانه‌تر می‌توانند حرکت نمایند. همین مسئله باعث می‌شود که این الکترون‌هـا بتواننـد در طی مسیر خود شتاب گرفته و این توانایی را داشته باشند که انرژی را از میـدان الکتریکـی مربـوط بـه موج الکترومغناطیسی فرودی دریافت نموده و به نوبهٔ خود آنرا به گرما تبدیل نمایند. به بیـان دقیـق‌تـر آنکه این الکترون‌ها واسطه‌هائی برای تبدیل انرژی تابشی به انرژی گرمائی هستند.

اما اجسام گرم نیز با فرایندهایی مشابه با فراینـدهای جـذب، ولـی بـا عملکـردی در جهـت معکـوس، تابش‌های خود را ارسال می‌نمایند. مثلاً در مورد دوده، گرما سبب می‌شود که شبکه به شـدت ارتعـاش نموده و انرژی (جنبشی انتقالی) خود را به الکترون‌ها منتقل نماید؛ از آنجائیکـه الکتـرون‌هـا خـود ذرات بارداری می‌باشند، این انرژی جنبشی را بصورت تابش الکترومغناطیس از خود گسیل می‌نمایند.

اما از طرف دیگر الکترون‌های آزاد موجود در فلزات (در دماهای نسبتاً پایین) مسافت آزاد میانگین بسیار طولانی داشته و ارتعاشات شبکه تأثیر بسیار کمی بر آنها خواهد داشت و از همین روی در فلزات الکترون‌های آزاد در گسیل تابش الکترومغناطیس نقش چندان قابل توجهی ندارند. از این موضوع به راحتی می‌توان دریافت که چرا،

«جذب کننده‌های خوب، گسیلنده‌های خوبی نیز می‌باشند»

اما در دماهای به حد کافی بالا، تمام اجسام به گسیلنده‌های خوبی تبدیل خواهند شد. این موضوع را در مورد فلزات می‌توان به این صورت توضیح داد که در اثر تداخل ارتعاشات قوی شبکه با حرکت الکترون‌ها، مسافت آزاد میانگین الکترون‌ها نیز کوتاه شده و از همین روی انرژی جنبشی ارتعاشی مؤثری از شبکه به آنها منتقل و در نتیجه آنها قادر خواهند گردید که امواج الکترومغناطیسی قابل ملاحظه‌ای را از خود گسیل نمایند.

اما از دیدگاه کلی، هرگاه که تابشی بر سطح جسمی فرود می‌آید، بخشی از آن بازتابیده و بخشی دیگر نیز جذب خواهد شد. به عنوان مثال اجسام تیره‌رنگ بخش عمدهٔ تابش فرودی را جذب می‌نمایند در حالیکه اجسام با رنگ روشن قسمت اعظم تابش فرودی را منعکس می‌نمایند. ضریب جذب طیفی سطح ماده در یک طول موج معین بمانند λ را با $a(\lambda)$ نمایش می‌دهند و درواقع معرّف کسری از انرژی تابشی فرودی است که توسط سطح جسم در طول موج معین λ جذب می‌گردد. حال اگر جسمی با محیط اطراف خود در حالت تعادل گرمائی باشد (یعنی دارای یک دمای ثابت باشد) در آن صورت مقدار یکسانی از انرژی را در واحد زمان جذب و بطور هم‌زمان گسیل می‌نماید. به تابشی که تحت این شرایط گسیل و یا جذب می‌شود، **تابش گرمائی** (*thermal radiation*) اطلاق می‌گردد.

۱-۲- جسم سیاه *Black Body*

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، هر جسمی در دمای بالاتر از صفر مطلق تا اندازه‌ای قادر است که تابش الکترومغناطیس را از خود گسیل نماید، اما واقعیت آن است که شدت و توزیع فرکانسی این تابش به ساختار گسیلنده نیز بستگی دارد.

برای گریز از این مشکل ساده‌ترین مدل ممکن برای بررسی این تابش‌ها جسمی است که بتواند تمامی امواج الکترومغناطیسی را که بر سطح آن فرود می‌آیند به خود جذب نماید (و بطور عکس، در صورت

گرم شدن بتواند تمامی طول موج‌ها را از خود ساطع نماید). به چنین جسمی اصطلاحاً **جسم سیاه** (*Black body*) اطلاق می‌گردد. به بیان دقیق‌تر برای یک جسم سیاه هیچ موج فرودی نه از آن عبور می‌کند و نه از آن منعکس می‌گردد، بلکه تمامی آن توسط جسم سیاه جذب می‌گردد. البته علی‌رغم اینکه چنین اجسامی به اجسام سیاه مشهورند، اما همیشه هم سیاه بنظر نمی‌آیند زیرا آنها نیز می‌توانند در صورت گرم شدن انرژی را بصورت تابش الکترومغناطیسی از خود گسیل نمایند. اصطلاح جسم سیاه نخستین بار توسط گوستاو کرشهف (*Gustav Kirchhoff*) در سال ۱۸۶۲ بکار رفته و متداول گردید. تابش گسیل شده توسط جسم سیاه را **تابش جسم سیاه** (*black body radiation*) می‌نامند.

قانون کرشهف *Kirchhoff 's Law*

در سال ۱۸۳۳ ریچی (*Ritchie*) با آزمایش خود نشان داد که برای سطوح همهٔ اجسام واقع در دمای T، بین توانایی در گسیل تابش و توانایی در جذب تابش، همواره یک رابطهٔ بنیادی موجود می‌باشد. به عبارت دیگر در تمام اجسام با دمای یکسان، خواص گسیلی با خواص جذبی کاملاً یکسان می‌باشند.

برای بررسی این ویژگی ابتدا اجازه دهید $e(T)$ را معرفی نمائیم که مطابق با تعریف عبارتست از مقدار انرژی که در واحد زمان از واحد سطح یک جسم واقع در دمای T بصورت تابش گسیل می‌شود. ریچی بصورت کاملاً تجربی ثابت نمود که برای دو جسم A و B که از نظر ماهیت بطور کلی متفاوت بوده، اما دارای دمای یکسانی می‌باشند رابطهٔ بنیادی ذیل همواره برقرار می‌باشد

$$\frac{e_A(T)}{a_A(T)} = \frac{e_B(T)}{a_B(T)} \qquad (۱-۲-۱)$$

که در آن $e_A(T)$ و $e_B(T)$ توانهای گسیلی از واحد سطح دو جسم A و B در دمای T بوده، اما $a_A(T)$ و $a_B(T)$ درواقع ضرائب جذب در دمای T (که طبق تعریف، ضریب جذب یک جسم در دمای معین T عبارتست از کسری از انرژی تابشی فرودی که توسط جسم در آن دما جذب می‌شود) مربوط به دو جسم A و B می‌باشند.

رابطهٔ بنیادی فوق را می‌توان با استفاده از یک استدلال سادهٔ ترمودینامیکی به راحتی بدست آورد. فرض کنید که دو جسم کدر A و B در محفظه‌ای بزرگ و تخلیه شده توسط ریسمان‌های بسیار باریکی و با فاصلهٔ بسیار زیاد از یکدیگر آویخته شده‌اند. دیواره‌های محفظه کدر و عایق بوده و از همین روی اجسام و دیوارها تنها قادر خواهند بود که از طریق تابش انرژی را مبادله نمایند. حال فرض کنید

که حالت تعادل گرمائی نیز برقرار باشد. در این حالت دمای سرتاسر درون محفظه و از جمله خود دو ریسمان نیز یکسان و ثابت خواهد بود. از حالت تعادل می‌توان نتیجه گرفت که توان گسیلی از واحد سطح و ضریب جذب هر یک از این دو جسم باید با هم برابر باشند، به نحویکه

$$\begin{cases} e_A(T) = a_A(T) \\ e_B(T) = a_B(T) \end{cases} \qquad (۱-۲-۲)$$

از همین روی

$$\frac{e_A(T)}{a_A(T)} = \frac{e_B(T)}{a_B(T)} = 1 \qquad (۱-۲-۳)$$

که همان رابطهٔ (۱-۲-۱) می‌باشد.

بنابر تعریف، اجسام سیاه صرف‌نظر از ماهیتشان دارای بیشترین ضریب جذب ممکن یعنی یک $(=1)$ می‌باشند. حال اگر یکی از این دو جسم مثلاً جسم B، خود یک جسم سیاه باشد، در آن صورت $a_B(T)$ برابر با یک شده و در این حالت شاهد آن خواهیم بود که

$$\frac{e_A(T)}{a_A(T)} = \frac{e_B(T)}{1} \qquad (۱-۲-۴)$$

به بیان دقیق‌تر، نسبت توان گسیلی از واحد سطح یک جسم به ضریب جذب آن در دمای T، با توان گسیلی از واحد سطح یک جسم سیاه در همان دما (صرف‌نظر از ماهیت آن) برابر می‌باشد. از طرف دیگر با عنایت به این واقعیت که

$$a_A(T) < 1 \qquad (۱-۲-۵)$$

می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که

$$e_B(T) > e_A(T) \qquad (۱-۲-۶)$$

رابطهٔ فوق به معنای آن است که توان گسیلی از واحد سطح یک جسم سیاه در دمای T از توان گسیلی واحد سطح هر جسم دیگری در همان دما، همواره مقدار بیشتری است.

در سال ۱۸۵۹ کرشهف با استفاده از استدلال‌های کاملاً کلی توانست رابطهٔ (۱-۲-۱) را به رابطه‌ای برای تابش‌های مربوط به یک طول موج معین بمانند λ، تعمیم دهد. مطابق با تعریف، گسیلندگی طیفی (*spectral emittance*) یک جسم در دمای T عبارتست از توان گسیل شده از واحد سطح یک جسم در طول موج معین λ که البته آنرا با نماد $e(\lambda,T)$ نمایش می‌دهیم. کرشهف نشان داد که برای تمام اجسام واقع در دمای T (بدون در نظر گرفت ماهیت آنها) همواره شاهد آن خواهیم بود که