



دانشگاه سیام نور
پی

فیزیک پایه ۴

(رشته فیزیک)

محمود جنوبی

«امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.»^۱

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چند هزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار	یازده
فصل اول. مقدمه‌ای بر فیزیک و تاریخ فیزیک در قرن بیستم	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
مقدمه	۱
۱-۱ تاریخچه فیزیک در قرن بیستم	۶
۲-۱ مروری بر فیزیک کلاسیک	۱۴
۳-۱ امواج و ذرات	۱۶
۴-۱ مسائل حل نشده سال ۱۸۹۵ و افق‌های جدید	۱۷
۵-۱ یکاها و ابعاد کمیت‌ها	۱۸
۱-۵-۱ طول	۱۹
۲-۵-۱ انرژی	۱۹
۳-۵-۱ بار الکتریکی	۱۹
۴-۵-۱ جرم	۱۹
۶-۱ برخی ثابت‌های بنیادی برحسب یکاهای ساده‌تر	۲۰
خلاصه فصل اول	۲۲
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول	۲۲
خودآزمایی تشریحی فصل اول	۲۴
فصل دوم. نظریه نسبیت خاص	۲۵
هدف کلی	۲۵
هدف‌های یادگیری	۲۵

۲۶	مقدمه
۲۶	۱-۲ نظریه نسبیت خاص
۲۸	۲-۲ آزمایش مایکلسون - مورلی
۳۲	۳-۲ اصول موضوعه‌های نسبیت خاص
۳۳	۴-۲ تبدیل‌های گالیه
۳۴	۱-۴-۲ تبدیل‌های سرعت گالیه
۳۵	۲-۴-۲ تبدیل لورنتس
۳۷	۳-۴-۲ هم‌زمانی
۳۹	۴-۴-۲ انقباض طول
۴۲	۵-۴-۲ اتساع زمان
۴۵	۵-۲ تبدیل‌های سرعت
۴۷	۶-۲ جرم، انرژی و تکانه در نسبیت
۴۷	۷-۲ قانون دوم نیوتن در نسبیت
۴۸	۸-۲ رابطه جرم و انرژی
۴۹	۹-۲ رابطه تکانه و انرژی
۵۰	۱۰-۲ یکاهای انرژی و تکانه
۵۲	۱۱-۲ اثر دوپلر نسبیتی
۵۵	۱۲-۲ انبساط عالم
۵۶	خلاصه فصل دوم
۵۹	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۶۱	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۶۵	فصل سوم. فیزیک کوانتومی: خواص ذره‌ای امواج
۶۵	هدف کلی
۶۵	هدف‌های یادگیری
۶۶	مقدمه
۶۷	۱-۳ امواج الکترومغناطیسی
۶۸	۲-۳ طیف امواج الکترومغناطیسی
۷۰	۳-۳ تابش جسم سیاه
۷۵	۴-۳ فرمول تابش پلانک
۷۷	۵-۳ فوتون‌ها و اثر فوتوالکتریک
۸۳	۶-۳ نظریه کوانتومی اینشتین درباره فوتوالکتریک
۸۷	۷-۳ پرتو X
۹۱	۸-۳ پراش پرتو X
۹۴	۹-۳ اثر کامپتون
۱۰۲	۱۰-۳ فوتون‌ها و گرانش
۱۰۳	خلاصه فصل سوم

۱۰۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم.....
۱۰۶	خودآزمایی تشریحی فصل سوم.....
۱۰۹	فصل چهارم. فیزیک کوانتومی: خواص موج گونه ذرات و اصل عدم قطعیت.....
۱۰۹	هدف کلی.....
۱۰۹	هدف‌های یادگیری.....
۱۱۰	مقدمه.....
۱۱۰	۱-۴ امواج دوبروی.....
۱۱۳	۲-۴ پراش ذره و آزمایش دیویسون- گرمر.....
۱۲۰	۳-۴ دوگانگی ذره- موجی.....
۱۲۰	۴-۴ امواج دوبروی چگونه امواجی هستند؟.....
۱۲۰	۴-۴-۱ امواج احتمال.....
۱۲۲	۴-۴-۲ توصیف یک موج.....
۱۲۴	۴-۴-۳ سرعت فاز و سرعت گروه.....
۱۲۸	۵-۴ میکروسکوپ الکترونی.....
۱۲۹	۶-۴ ذره در یک جعبه.....
۱۳۲	۷-۴ تابع موج.....
۱۳۴	۸-۴ بهنجارش.....
۱۳۵	۹-۴ معادله شرودینگر.....
۱۳۵	۹-۴-۱ مشتقات جزئی.....
۱۳۸	۹-۴-۲ معادله شرودینگر: شکل وابسته به زمان.....
۱۴۴	۹-۴-۳ ذره آزاد.....
۱۴۴	۹-۴-۴ ذره در جعبه یک‌بعدی.....
۱۴۷	۹-۴-۵ معادله مستقل از زمان شرودینگر.....
۱۴۸	۱۰-۴ اصل عدم قطعیت.....
۱۵۲	۱۱-۴ اچ- بار ($\hbar$).....
۱۵۳	خلاصه فصل چهارم.....
۱۵۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم.....
۱۵۵	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم.....
۱۵۹	فصل پنجم. مدل‌های ابتدایی مکانیک کوانتوم و طیف اتم هیدروژن.....
۱۵۹	هدف کلی.....
۱۵۹	هدف‌های یادگیری.....
۱۶۰	مقدمه.....
۱۶۳	۱-۵ پراکندگی رادرفورد.....
۱۶۴	۲-۵ فرمول پراکندگی رادرفورد.....
۱۶۵	۳-۵ ابعاد هسته.....

۱۶۶	۴-۵ پایداری اتم.....
۱۶۹	۴-۵ شکست فیزیک کلاسیک.....
۱۶۹	۵-۵ طیف اتمی.....
۱۷۱	۵-۶ سری های طیفی.....
۱۷۶	۵-۷ اصول موضوع بور.....
۱۷۸	۵-۸ اتم بور.....
۱۸۴	۵-۹ آزمایش فرانک - هرتز.....
۱۸۶	۵-۱۰ اصل هم خوانی.....
۱۸۷	۵-۱۱ نارسائی های مدل بور.....
۱۸۸	خلاصه فصل پنجم.....
۱۹۰	خودآزمایی چهارگزینه ای فصل پنجم.....
۱۹۱	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم.....
۱۹۵	فصل ششم. ساختار هسته.....
۱۹۵	هدف کلی.....
۱۹۵	هدف های یادگیری.....
۱۹۶	مقدمه.....
۱۹۷	۶-۱ ترکیب هسته.....
۱۹۹	۶-۲ جرم اتمی.....
۲۰۰	۶-۳ چند خاصیت هسته ای.....
۲۰۳	۶-۴ گشتاور مغناطیسی هسته.....
۲۰۶	۶-۵ واپاشی هسته ای.....
۲۰۶	۶-۵-۱ واپاشی آلفا.....
۲۰۷	۶-۵-۲ گسیل پوزیترون.....
۲۰۷	۶-۶ انرژی پیوند یا بستگی.....
۲۱۰	۶-۷ واکنش های هسته ای.....
۲۱۲	۶-۸ نیروی هسته ای قوی.....
۲۱۴	۶-۹ مدل قطره مایع.....
۲۱۸	۶-۱۰ اصلاح فرمول.....
۲۲۱	۶-۱۱ مدل پوسته ای.....
۲۲۵	خلاصه فصل ششم.....
۲۲۶	خودآزمایی چهارگزینه ای فصل ششم.....
۲۲۷	خودآزمایی تشریحی فصل ششم.....
۲۳۱	فصل هفتم. واپاشی هسته ای و واکنش های هسته ای.....
۲۳۱	هدف کلی.....
۲۳۱	هدف های یادگیری.....

۲۳۲	مقدمه
۲۳۳	۱-۷ واپاشی رادیواکتیو (پنج نوع واپاشی).....
۲۳۶	۲-۷ هسته‌های پایدار و ناپایدار.....
۲۳۸	۳-۷ قانون واپاشی رادیواکتیو.....
۲۳۸	۱-۳-۷ نیمه‌عمر.....
۲۴۲	۲-۳-۷ عمریابی.....
۲۴۵	۳-۳-۷ روش‌های ردیابی.....
۲۴۵	۴-۷ فروپاشی زنجیره‌ای.....
۲۴۷	۵-۷ واپاشی آلفا.....
۲۵۰	۶-۷ واپاشی بتا.....
۲۵۳	۷-۷ واپاشی گاما.....
۲۵۴	۸-۷ شکافت.....
۲۵۸	۹-۷ هم‌جوشی در ستارگان.....
۲۶۱	۱۰-۷ راکتورهای هم‌جوشی.....
۲۶۲	خلاصه فصل هفتم.....
۲۶۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم.....
۲۶۵	خودآزمایی تشریحی فصل هفتم.....
۲۷۱	فصل هشتم. معرفی برهم‌کنش‌ها و ذرات بنیادی.....
۲۷۱	هدف کلی
۲۷۱	هدف‌های یادگیری
۲۷۲	مقدمه
۲۷۴	۱-۸ ذرات آشنا.....
۲۷۴	۲-۸ فوتون.....
۲۷۵	۳-۸ الکترون.....
۲۷۶	۴-۸ پروتون.....
۲۷۶	۵-۸ نوترون.....
۲۷۷	۶-۸ قوانین پایستگی و اصول ناوردایی.....
۲۷۸	۷-۸ برهم‌کنش‌ها و ذرات.....
۲۷۹	۱-۷-۸ برهم‌کنش گرانشی.....
۲۸۱	۲-۷-۸ برهم‌کنش الکترومغناطیس.....
۲۸۲	۳-۷-۸ نیروهای هسته‌ای قوی.....
۲۸۶	۸-۸ نظریهٔ مزون درباره نیروهای هسته‌ای.....
۲۸۸	۹-۸ برهم‌کنش ضعیف.....
۲۸۹	۱۰-۸ خانوادهٔ ذرات بنیادی.....
۲۹۲	۱۱-۸ قوانین بقا: کمیت‌های پایسته.....
۲۹۵	۱۲-۸ قانون بقای بار الکتریکی.....

۲۹۵	۸-۱۲-۱ قانون بقای عدد باریون
۲۹۶	۸-۱۲-۲ قانون بقای عدد لبتون
۲۹۷	۸-۱۳ منشأ قوانین بقای دقیق
۲۹۷	۸-۱۴ کوارک‌ها
۳۰۱	خلاصه فصل هشتم
۳۰۳	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هشتم
۳۰۴	خودآزمایی تشریحی فصل هشتم
۳۰۷	فصل نهم. نسبیت عام و کیهان‌شناسی
۳۰۷	هدف کلی
۳۰۷	هدف‌های یادگیری
۳۰۸	مقدمه
۳۰۸	۹-۱ نسبیت عام
۳۱۴	۹-۲ جایه‌جایی قرمز گرانشی
۳۱۵	۹-۳ تکامل ستاره‌ای
۳۱۶	۹-۴ سیاه‌چاله، اختروش یا کوازارها و کهکشان‌ها
۳۱۸	۹-۵ مدل استاندارد
۳۱۹	۹-۶ بوزون هیگز یا ذره عامل تولید جرم
۳۲۲	۹-۷ قانون هابل
۳۲۳	۹-۸ آینده جهان
۳۲۴	۹-۹ ماده تاریک و انرژی تاریک
۳۲۶	۹-۱۰ امواج گرانشی
۳۲۷	خلاصه فصل نهم
۳۲۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل نهم
۳۲۹	پوست
۳۳۳	پاسخنامه خودآزمایی‌های چهارگزینه‌ای
۳۴۷	منابع

به نام خداوند جان و خرد
کزین برتر اندیشه بر نگذرد

پیشگفتار

هدف اصلی فیزیک مشاهده پدیده‌های فیزیکی، انجام آزمایش‌های دقیق برای درک بهتر این پدیده‌ها و تحلیل نتایج به دست آمده و تدوین قوانینی بر پایه این آزمایش‌ها برای درک کمی آن‌ها است هدف انسان ابداع مفاهیم و اصولی است که بتواند او را در درک همه پدیده‌های طبیعی کمک کند. هرچه یک قانون عمومی‌تر و کاربردی‌تر باشد بهتر از عهده پیش‌بینی نتایج مشاهدات تجربی مختلف برمی‌آید.

در نیمه آخر قرن نوزدهم به نظر می‌رسید که ساختمان سازه اساسی فیزیک کامل شده است به طوری که آلبرت مایکلسون در سال ۱۹۸۴ می‌گوید «همه قوانین بنیادی فیزیک کشف شده‌اند. کشف قوانین جدیدی در فیزیک در آینده بعید به نظر می‌رسد. آنچه باقی است تمرکز روی اعشار نتایج آزمایش‌هاست» و لورد کلوین برای تأکید روی این مسئله می‌گوید «چیز دیگری در فیزیک باقی نمانده است که کشف شود آنچه باقیمانده است دقت در آزمایش‌ها است».

به عقیده فیزیک‌دانان قرن نوزدهم خداوند در آغاز قوانین حرکت نیوتن را آفرید و چیزهای دیگر را باقی گذاشت تا به کمک ابداع روش‌های ریاضی از راه استنتاج به دست آوریم. فیزیک کلاسیک نیوتنی بیش از دویست سال بدون منازع حاکم بود و موفقیت‌های فراوانی، به ویژه در مکانیک آسمانی به دست آورد و همین عقیده عزم فیزیک‌دانان را در این راه جزم‌تر کرد.

در بین سال‌های ۱۸۹۵ تا ۱۹۰۵ یک سری پدیده‌های جدید که بیشتر آن‌ها درباره فیزیک ذرات اتمی بود کشف شد. اگرچه بُعد اتمی کوچک‌تر از آن است که حتی با قوی‌ترین میکروسکوپ‌ها دیده شود ولی با طراحی دقیق آزمایش‌ها می‌توان به مطالعه ذرات

اتمی و قوانین حاکم بر آنها پرداخت. با کشف دو نظریه انقلابی در سال‌های اولیه قرن بیستم، یعنی نظریه کوانتومی و نظریه نسبیت پایه‌های جزم‌اندیشی فروریخت و قوانین جدیدی جای قوانین فیزیک کلاسیک نیوتنی را برای مطالعه دنیای کوچک مقیاس فراهم ساخت. فیزیک جدید در سال ۱۹۰۰ با کشف ماکس پلانک در مورد نقش کوانتش انرژی در تابش جسم سیاه آغاز شد. این نظریه انقلابی به‌زودی با نظریه انقلابی دیگری توسط آلبرت اینشتین در مورد نسبیت و کوانتوم همراه شد و پایه‌ای برای شاخه‌ای از علم فیزیک به‌نام فیزیک جدید شد و امروزه جنبه‌های اندکی از علم معاصر را می‌یابید که تحت تأثیر فیزیک جدید قرار نگرفته باشد. فیزیک جدید به مطالعه اتم‌ها، مولکول‌ها و کلیه شکل‌های ماده، هسته‌ها و ذرات زیر اتمی می‌پردازد. درعین حال قوانین مکانیک کوانتوم آماری روش جدیدی برای دستگاه‌های چندین ذره‌ای است. هدف از تدوین این کتاب بررسی مفاهیمی از فیزیک جدید است که به‌عنوان درس فیزیک پایه ۴ در دوره کارشناسی فیزیک ارائه می‌شود.

این کتاب به‌عنوان منبع درس ۳ واحدی فیزیک پایه ۴ برای دانشجویان رشته فیزیک تدوین شده است و هدف عمده آن بررسی و درک مفاهیم و روش‌های فیزیک قرن بیستم است. این درس می‌تواند مقدمه و پیش‌نیازی برای درس‌های پیشرفته‌تر مانند مکانیک کوانتوم، نسبیت، ذرات بنیادی، فیزیک هسته‌ای و دیگر دروس مرتبط باشد. سعی شده است که مطالب به‌طور مشروح و با ابهام کم و به‌طور خودآموز که مناسب دانشجویان دانشگاه پیام نور باشد، بیان شود.

با توجه به اینکه دانشجویان هنوز فیزیک کوانتومی و نسبیت را نیاموخته‌اند کتاب را با مروری بر فیزیک کلاسیک و تاریخچه علم فیزیک در قرن بیستم آغاز کرده و سپس با مثال‌های متعدد به‌مرور نظریه نسبیت خاص می‌پردازیم. سپس به فیزیک کوانتومی به بحث دیدگاه‌های خواص ذره‌ای امواج، خواص موج‌گونه ذرات، مکانیک کوانتوم و معادله شرودینگر، طیف اتم هیدروژن، ساختمان اتم و هسته‌ها، واپاشی ذرات و برهم‌کنش بین ذرات و ذرات بنیادی پرداخته و این قسمت از فیزیک پایه ۴ را با نسبیت عام و کیهان‌شناسی به پایان می‌بریم.

در این راه سعی شده است که نحوه بیان مطالب روشن و کم ابهام باشد و شکی وجود ندارد که کتاب بدون نقص هم نیست امید است که همکاران محترم و دانشجویان عزیز ما را از نظرات انتقادی و راهنمایی برای چاپ‌های احتمالی بعدی بی‌بهره ن سازند.

محمود جنوبی

۱۳۹۹

فصل اول

مقدمه‌ای بر فیزیک و تاریخ فیزیک در قرن بیستم

هدف کلی

هدف از این فصل آشنا ساختن دانشجو با تاریخ علم فیزیک در قرن بیستم که بر پایه دست‌آوردهای آن فیزیک جدید بنیان نهاده شده است. دانشجو پس از فراگیری این فصل باید بتواند به‌طور اجمالی تاریخ فیزیک قرن بیستم و نیز هدف فیزیک کلاسیک و قوانین بنیادی این علم را بیان کند و یکاها و ابعاد کمیت‌های فیزیک جدید را بشناسد.

هدف‌های یادگیری

- دانشجو پس از مطالعه و فراگیری این فصل باید بتواند:
۱. به‌طور اجمالی تاریخ فیزیک در قرن بیستم را بیان کند.
 ۲. به‌طور اجمالی هدف اصلی فیزیک کلاسیک را بیان کند.
 ۳. یکاها و ابعاد کمیت‌های به‌کار رفته در فیزیک جدید را بیان کند.

مقدمه

مهم‌ترین قوانین بنیادی و حقایق علم فیزیک کشف شده است، و این قوانین به‌طور بسیار محکمی پایه‌ریزی شده‌اند و احتمال اینکه قوانین جدیدی جایگزین آن‌ها شود بسیار بعید است. کشف‌های آینده ما باید به دنبال رقم ششم اعشار باشد.

آلبرت ای مایکلسون

اکنون چیز دیگری که در فیزیک کشف شود وجود ندارد. آنچه باقی است دقت بیشتر در اندازه‌گیری است.

ویلیام تامسون [لرد کلونین]

اگرچه ارسطو و اراتستن دانشمندان فیزیک یونان، اندازه‌گیری‌ها و محاسبه‌هایی انجام دادند که امروز ما آن را فیزیک می‌نامیم ولی ریشه‌های فیزیک در کارهای گالیله و نیوتن و دیگران در انقلاب علمی قرن شانزده و هفدهم قرار دارد. دانش و علم تجربی فیزیک به آرامی به مدت ۲۰۰ و ۳۰۰ سال رشد کرد تا انقلاب دیگری که موضوع این کتاب است روی داد. فیزیک‌دانان بین فیزیک کلاسیک که بیشتر آن قبل از ۱۸۹۵ توسعه یافته بود و فیزیک جدید که مدیون کشف‌های بعد از ۱۸۹۵ است تمایز قائل می‌شوند. اگرچه سال دقیق اهمیت ندارد ولی تغییرات تاریخی در فیزیک در حدود سال ۱۹۰۰ اتفاق افتاد. از سال ۱۸۳۷ تا ۱۹۰۱ تغییرات قابل ملاحظه‌ای در اجتماع، سیاست و قلمرو فکری انسان روی داد ولی شاید هیچ‌یک از این تغییرات مانند دست‌آوردهای قابل توجه فیزیک نیست. مثلاً، ارتباطات سریع امروز ما پیامد نظریه الکترومغناطیس ماکسول در آن دوران است. در این فصل به‌طور خلاصه وضعیت فیزیک را در محدوده ۱۸۹۵، از جمله قوانین نیوتن، معادلات ماکسول و قوانین ترمودینامیک را به‌طور خلاصه مرور می‌کنیم. دانشمندان و مهندسين اواخر قرن نوزدهم حقیقتاً از خود راضی بودند و فکر می‌کردند که همه چیز را تحت کنترل خود دارند. (به سخنان مایکلسون و کلونین در بالا توجه کنید). آنان تصور می‌کردند که اگر به آن‌ها وقت کافی داده شود می‌توانند هر پدیده‌ای را تبیین کنند. اگرچه در مقیاس ماکروسکوپی می‌توانستند موتورهای بزرگی بسازند و با کشتی اقیانوس‌ها را به پیمایند و بین کشورها مسافرت کنند ولی به‌روشنی ساختمان ماده را نمی‌شناختند.

فیزیک یک علم بنیادی است که فهم پدیده‌هایی که در جهان روی می‌دهد را تسهیل می‌کند و شالوده آن مشاهدات و اندازه‌گیری‌های چندی است. هدف اصلی روش علمی، توسعه نظریه‌های علمی بر پایه قوانین بنیادی است که نتایج آزمایشات را پیشگویی کنند. خوشبختانه رفتار بسیاری از دستگاه‌های فیزیکی بر پایه تعداد محدودی از قوانین بنیادی قابل توضیح است. این قوانین به زبان ریاضی، که پلی بین نظریه و آزمایش هستند، بیان می‌شوند.

فیزیک کلاسیک قبل از سال ۱۹۰۰ توسعه یافت و شامل نظریه‌ها، اصول، قوانین و آزمایش‌هایی در سه شاخه مکانیک کلاسیک، ترمودینامیک و الکترومغناطیس بود. فیزیک کلاسیک نیوتنی بیش از دویست سال بدون منازع بود و موفقیت‌های جالب و فراوانی، به‌ویژه در مکانیک آسمانی، کسب کرد که اعتقاد قاطع فیزیک‌دانان را جزم‌تر کرد؛ اما با کشف دو نظریه انقلابی در سال‌های اول قرن بیستم، یعنی نظریه کوانتومی و نظریه نسبیت، شالوده‌های این جزم‌اندیشی فرو ریخت. این نظریه‌های جدید مفهوم ذره و مفاهیم فضا و زمان از نظر نیوتن را کنار گذاشتند. کشف کوانتش و نسبیت آغاز فیزیک نوین را بشارت داد.

توسعه هر شاخه از فیزیک بر پایه قوانین معینی صورت می‌گیرد. فیزیک کلاسیک بر پایه قوانین نیوتن، که شامل جرم، فضا و زمان مطلق بود توسعه یافت. قوانین نیوتن هرچند که تقریبی‌اند اما تقریب‌های بسیار مفیدی هستند. این قوانین برای بیان حرکت تمام اجسام بزرگ‌مقیاس (ماکروسکوپی) که در زندگی روزمره با آن‌ها مواجه‌ایم مناسب‌اند. حتی، اگر مدار حرکت الکترون‌ها و سایر ذرات زیر اتمی بزرگ، و سرعت آن‌ها نه خیلی کم و نه خیلی زیاد باشند این قوانین برای توصیف آن‌ها مناسب‌اند. به علاوه مفاهیم فیزیک کوانتومی و فیزیک نسبیتی از فیزیک نیوتنی وام گرفته شده‌اند. از این رو در این فصل ابتدا تاریخچه کوتاهی از فیزیک قرن بیستم را به‌طور اجمالی مرور می‌کنیم و آنگاه قوانین بنیادی فیزیک کلاسیک که زمینه‌ای برای توسعه فصل‌های بعدی است را به‌طور اجمالی بررسی می‌کنیم.

هدف اصلی فیزیک مشاهده پدیده‌های فیزیکی، انجام آزمایشات دقیق و تحلیل موشکافانه نتایج و تدوین قوانینی است که به‌وسیله آن‌ها بتوان به‌طور کمی نتایج به‌دست آمده را درک کرد. هدف عینی این تلاش‌ها در ابداع مفاهیم و اصول جدید، کمک به فهم پدیده‌های طبیعی است. این قوانین روابط معینی بین کمیت‌های مختلف مورد مشاهده برقرار می‌سازند هر چه قانون بنیادی‌تر باشد کاربرد آن عمومی‌تر خواهد بود. صحت این قوانین فیزیکی در پیش‌بینی دقیق نتایج مشاهدات مختلف نهفته است.

در اواخر قرن نوزدهم به‌نظر می‌رسید که بنای سازه اساسی فیزیک کم‌وبیش کامل شده است. به‌عنوان مثال قوانین مکانیک کلاسیک و گرانش که به‌وسیله اسحاق نیوتن و گالیله بنیان نهاده شده بود پایه محکمی برای دینامیک بود و حرکت‌های پیچیده منظومه خورشیدی با استفاده از قوانین نیوتن و با دقت قابل توجهی با توجه به جاذبه گرانشی

بین خورشید و سیاره‌ها حرکت این اجرام قابل پیش‌بینی بود. این قوانین بعداً به دانشمندان کمک کردند که سیاره‌های جدید را کشف کرده و سازوکار فیزیکی برای مطالعه منشأ ستارگان و کهکشان‌ها پایه‌ریزی کنند. گذشته از این مکانیک کلاسیک در کاربردهای نجومی و توصیف حرکت اجسام نقش مهمی ایفا کرد. مثلاً کار کلیه ماشین‌های مکانیکی براساس مکانیک کلاسیک استوار است. کارهای کولن، آمپر و فاراده به قوانین مربوط به پدیده‌های الکتریسته و مغناطیس انجامید این قوانین باهم به شکل نظریه الکترومغناطیس توسط ماکسول ارائه گردید. این نظریه کلیه پدیده‌های نوری که از وصف نور به شکل موج الکترومغناطیسی حاصل می‌شود را بیان می‌کند.

قوانین ترمودینامیک که به وسیله کلاوسیوس و کلونین پایه‌ریزی شد، انتقال حرارت بین دو جسم را به شکل رضایت بخشی تبیین می‌کرد فهم عمیق‌تر مفاهیم حرارت و دما فقط بعد از بیان مفاهیم اتم‌ها و مولکول‌ها امکان‌پذیر شد. نظریه انرژی جنبشی گازها و موفقیت‌های آن، فرضیه اتمی را تأیید می‌کرد. پیشرفت‌های بعدی در این زمینه مدیون بولتزمن و گیسیس است. این حوزه از فیزیک امروز پایه فهم بیشتر دستگاه‌های چند ذره‌ای را تشکیل می‌دهد.

در بین سال‌های ۱۸۹۵ تا ۱۹۰۵ کشفیات جدیدی که بیشتر آن‌ها مربوط به فیزیک ذرات اتمی بود انجام شد، ابعاد اتم (10^{-10}m) حتی با به کارگیری قوی‌ترین میکروسکوپ‌ها در مشاهدات مستقیم بسیار ضعیف‌اند ولی با انجام آزمایشات دقیق می‌توان ذرات اتمی را مطالعه و مورد تحلیل دقیق قرار داد. معلوم شد که قوانین فیزیک نیوتنی برای فهم نتایج این آزمایشات کافی نیست. کوشش برای تبیین این نتایج به بنیان قوانین فیزیک جدید و مکانیک کوانتوم انجامید.

پیش‌بینی این قوانین با نتایج حاصل از آزمایشات مطابقت داشت و در مورد اجسام ماکروسکوپی، اعمال این قوانین به همان نتایج فیزیک کلاسیک می‌انجامد؛ بنابراین قوانین فیزیک جدید تصویر درستی از پدیده‌های مربوط به اجسام بزرگ (ماکروسکوپی) و کوچک (میکروسکوپی) به دست می‌داد و قوانین فیزیک کلاسیک فقط در حد اجسام بزرگ صادق بودند. همچنین مشخص شد که قوانین نیوتن برای مطالعه ذراتی که با سرعت قابل مقایسه با سرعت نور حرکت می‌کنند درست نیست و به جای آن قوانین نسبیت که به وسیله آلبرت اینشتین پایه‌ریزی شد به درستی ذراتی را که با هر نوع سرعتی حرکت می‌کنند تبیین می‌کند و در مورد ذراتی که با سرعت کم

حرکت می‌کنند به همان نتایج و قوانین نیوتن می‌انجامد. قوانین فیزیک نسبیت در این قرن ابداع شد و حوزه مطالعه آن شامل اتم‌ها، مولکول‌ها و کلیه شکل‌های ماده، هسته و ذرات زیر اتمی است.

به‌طور هم‌زمان قوانین مکانیک کوانتوم آماری که روشی برای فهم دستگاه‌های چند ذره‌ای است پایه‌ریزی شد.

بنابراین در پایان قرن نوزدهم به‌نظر می‌رسید که درک عمیق و منسجمی از طبیعت به‌دست آمده است دینامیک نیوتنی در حوزه خود موفق بود. الکتریسته و مغناطیس بر اثر کارهای ماکسول وحدتی پیدا کرده بود. امواج الکترومغناطیسی که به‌وسیله معادله‌های ماکسول پیش‌بینی شده بود به‌وسیله هرتز کشف و قانون‌های ترمودینامیک و نظریه جنبشی گازها در تشریح گستره وسیعی از پدیده‌ها موفق بود.

در دهه‌های بعد قوانین جدید در زمینه نسبیت و نظریه کوانتومی نگرش ما را نسبت به جهان فیزیک تغییر داد که کاربردهای آن‌ها تأثیر عظیمی در زندگی روزمره ما داشته است و سبب رشد فیزیک اتمی، هسته‌ای و حالت جامد شده است.

عنوان فیزیک جدید معمولاً به تحولاتی که با نظریه‌های نسبیت، کوانتومی و کاربرد آن‌ها در درک اتم، هسته اتم و ذرات تشکیل دهنده آن، آرایش اتم‌ها در مولکول‌ها و جامدات و در مقیاس کیهانی، منشأ و تحول عالم سروکار دارد گفته می‌شود. در این کتاب این موضوعات مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد که بیشتر به مباحثی از فیزیک جدید مربوط می‌شود. بعد از مروری کوتاه بر فیزیک کلاسیک با بررسی نظریه نسبیت خاص شروع می‌کنیم. به این علت که کلیه قوانین فیزیک به اندازه‌گیری کمیت‌ها مربوط می‌شود و در نسبیت تشریح می‌شود که چگونه این اندازه‌گیری به ناظر و همچنین حرکت خود شیء بستگی دارد و از نسبیت، مکانیک جدیدی ظاهر می‌شود که نشان‌دهنده روابط نزدیک بین فضا و زمان، جرم و انرژی است. بررسی و درک دنیای کوچک مقیاس در داخل اتم مهم‌ترین موضوع مورد مطالعه فیزیک جدید است که بدون آن امکان‌پذیر نیست. سپس دیدگاه ذره‌ای و موجی و مدل‌های ابتدایی را در مکانیک کوانتومی مورد بحث قرار داده و مسئله عدم قطعیت هایزنبرگ را بررسی می‌کنیم. طیف اتم هیدروژن، هسته‌ها، واپاشی ذرات و برهم‌کنش بین ذرات، ذرات بنیادی مورد بحث قرار می‌گیرد و کتاب را با شرح مختصری از نسبیت عام و کیهان‌شناسی به پایان می‌بریم.

۱-۱ تاریخچه فیزیک در قرن بیستم

سال‌های ۱۹۰۱-۱۹۱۰ سال‌های طلوع فیزیک جدید است. کشفیات این دهه از قرن بیستم بنیان فیزیک را لرزاند. تغییرات علم در این دهه مدیون متفکرین زیادی است ولی بیشتر از همه مدیون منشی ثبت اختراعات سوئیس و زاده آلمان به نام آلبرت اینشتین (۱۸۷۹-۱۹۵۵) است. او در سال ۱۹۰۵ سه مقاله در مجله آلمانی سالانه فیزیک منتشر کرد که حرکت براونی، اثر فوتوالکتریک و نسبیت خاص را توضیح می‌داد و نظر فیزیک‌دان‌ها را در مورد فضا، زمان، ماده، انرژی و ذرات و امواج عوض کرد و نشان داد که جرم و انرژی صورت‌های مختلف یک پدیده فیزیک هستند. اینشتین در سال ۱۹۱۵ نظریه نسبیت عام را منتشر ساخت و این نظریه او را به یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان کلیه زمان‌ها تبدیل کرد. پیش از ارائه معادله‌های ماکسول، همیشه رفتار نور به عنوان یک موج دنبال می‌شد که در اطراف موانع خم می‌شد، بازتاب و تداخل داشت و پراشیده می‌شد. پیشنهاد اینشتین، ایده‌ای بود که نشان می‌داد نور خاصیت موجی و ذره‌ای هر دو را دارد. در این زمان اینشتین نشان داد که نور جریانی از ذرات فوتون است.

نظریه‌های نسبیت خاص و عام اینشتین بسیاری از ویژگی‌های وصف نشده جهان هستی را توضیح می‌دهد. او بر اساس فرض‌های ساده نشان داد که فضا و زمان به هم ارتباط دارند. اینشتین نظریه نسبیت عام را در سال ۱۹۱۵ به چاپ رساند که مطابق آن میدان‌های قوی جاذبه می‌تواند فضا و زمان را واپیچیده کند. در این حالت ستاره‌ای مانند خورشید، یک «گودی» در فضا ایجاد می‌کند و نور هنگام عبور از خورشید مسیر خمیده‌ای طی می‌کند. آرتور ادینگتون در کسوف سال ۱۹۱۹ نشان داد که نور ستاره‌های نزدیک به خورشید مطابق نظریه عام اینشتین هنگام عبور از نزدیکی خورشید واپیچیده می‌شود زیرا جرم خورشید نور آن‌ها را منحرف می‌کند. مقاله‌های بعدی او در پیشرفت فیزیک کوانتوم مؤثر بوده است. آلبرت اینشتین در سال ۱۹۲۱، به خاطر توصیفی که از اثر فوتوالکتریک کرده بود جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد.

در آغاز قرن بیستم، کشف الکترون توسط جوزف جان تامسون دیدگاه فیزیک‌دانان را نسبت به اتم که واحد اصلی ماده تلقی می‌شد تغییر داد و این کشف را در سال ۱۸۹۷ با یک سلسله آزمایش‌هایی روی پرتوهای کاتدی به انجام رسانید و سبب انقلابی در درک ما از اتم شد. در سال ۱۹۰۶ تامسون مدل کیک کشمش اتم که

در آن الکترون‌های دارای بار منفی در درون فضای کروی بار مثبت یکنواختی پراکنده‌اند ارائه داد و او را برنده جایزه نوبل کرد. مدل تامسون به نام کیک کشمشی نامیده می‌شد در این مدل هسته‌ای وجود نداشت. در سال ۱۹۱۱ ارنست رادرفورد مدل جدیدی از اتم ارائه داد که در آن اتم شامل هسته‌ای کوچک و متراکم از اجزای با بار مثبت (هسته) که الکترون‌های با بار مثبت به دور آن در گردش‌اند معرفی کرد. نیلز بور در سال ۱۹۱۳ برای توضیح چگونگی تابش نور از اتم مدل خود را ارائه داد که در آن الکترون‌ها در لایه‌های ثابتی به دور اتم گردش می‌کنند وقتی الکترونی از لایه‌ای به لایه دیگری سقوط می‌کند انرژی متناسب با آن تابش می‌کند.

در طول قرن نوزدهم انجام آزمایش‌های الکتریکی در لوله‌های خلأ شیشه‌ای به کشف پرتوهای کاتدی، الکترون و پرتوهای ایکس منجر شد. پرتوهای کاتدی در میدان مغناطیسی منحرف می‌شدند پیشرفت لوله پرتو کاتدی به رشد فناوری تلویزیون و رادار منجر شد. در سال ۱۹۰۴ آمبروس فمینگ با استفاده از خاصیت حرکت یک‌طرفه الکترون در لوله‌های خلأ اولین قطعه الکتریکی به نام دیود را ساخت و در سال ۱۹۰۷ لی د فارست مهندس آمریکایی با قرار دادن یک شبکه سیمی بین دو الکتروود دیود توانست جریان الکترون را کنترل و تقویت کند و اولین تقویت کننده جریان را ساخت که انقلابی در صنعت الکترونیک بود. اختراع لوله خلأ نام ویلیام کروکس را در جهان پرآوازه کرد. لوله پرتو کاتدی در سال ۱۸۹۷ توسط دانشمند آلمانی کارل فردینالند براون اختراع شد که در تلویزیون به کار رفت.

در سال ۱۸۹۵ ویلهلم کنراد رونتگن (۱۸۴۵-۱۹۲۳) آلمانی در ضمن تحقیق روی لوله‌های خلأ و پرتوهایی که در این لوله‌ها تولید می‌شوند به کشف پرتو نافذ و ناشناخته‌ای نائل شد و نام آن را پرتو x گذاشت. رونتگن متوجه شد که این پرتو از فلز و مواد متراکم نمی‌گذرد ولی از کاغذ و پوست بدن عبور می‌کند. رونتگن در سال ۱۹۰۱ جایزه نوبل را به خاطر این کشف بزرگ به دست آورد.

در سال ۱۹۱۲، مکس فون لاهو در دانشگاه مونیخ ثابت کرد که این پرتوها تابش‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های کم هستند. او نشان داد که این پرتوها ضمن عبور از بلور پراکنده می‌شوند و الگوی پراکنده می‌تواند راهی برای بررسی ساختار درونی مواد باشد. پرتوایکس به‌زودی وارد علم پزشکی شد و به ابزاری برای تشخیص بیماری تبدیل شد.

ماری کوری (۱۸۶۷-۱۹۳۴) از دانشمندان مشهور فیزیک است. نخستین زنی که جایزه نوبل را در طول عمر خود دو بار در دو زمینه مختلف دریافت کرد و رادیواکتیویته را به جهانیان معرفی کرد. او در ورشو، که در آن زمان جزو امپراتوری روسیه بود به دنیا آمد و در سال ۱۸۹۱ در دانشگاه سوربن فرانسه ثبت نام کرد و تابعیت فرانسوی گرفت. در سال ۱۸۹۵ با پییر کوری ازدواج کرد. در سال ۱۹۱۰ موفق به جداسازی فلز خالص رادیوم شد و در سال ۱۹۱۱ به خاطر جداسازی فلزات جایزه نوبل شیمی را دریافت کرد. ماری و پییر کوری متوجه شدند که سنگ معدن اورانیوم، اغلب رادیواکتیو تر از فلز خالص اورانیوم است و دریافتند که باید در سنگ معدن مواد رادیواکتیو دیگری نیز وجود داشته باشد و موفق به کشف عنصر جدید پلونیوم و رادیوم شدند و برای کشف این عناصر دومین جایزه نوبل را دریافت می کنند.

کشف عناصر رادیواکتیو، عناصری که هنگام تبدیل هسته آنها از شکلی به شکل دیگر، از خود ذره و انرژی تابش می کنند آغازگر انقلابی در فیزیک اواخر قرن نوزدهم است. رادیواکتیویته، یکی از مهم ترین کشفیات تصادفی در علم فیزیک است.

در سال ۱۸۹۶ هنری بکرل، دانشمند فرانسوی متوجه شد که اگر نمک اورانیوم را در کاغذ عکاسی به پیچد کاغذ سیاه می شود او ابتدا حدس زد که پرتوهای تابشی از این نمک ها باید شبیه پرتوهای ایکس باشد اما وقتی دریافت که آنها در میدان مغناطیسی منحرف می شوند متوجه شد که این پرتوها در واقع ذرات باردار هستند و عبور آنها در هوا مولکول های هوا را یونیده و باردار می کند. این پدیده جدید تابش یونیزه کننده نام گرفت. بکرل با این کشف جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۰۳ دریافت کرد.

در سال ۱۸۹۹، ارنست رادرفورد فیزیکدان نیوزیلندی و فردریک سادی دانشمند انگلیسی، دو نوع مختلف از ذرات رادیواکتیو را کشف کردند و رادرفورد آنها را آلفا و بتا نامید. ذرات آلفا سنگین و دارای خاصیت یونیدگی بالا بودند که با برگ کاغذ متوقف می شدند و چند سال بعد معلوم شد که یون با بار مثبت اتم هلیوم است. ذرات بتا سبک تر و دارای بار منفی بود. در واپاشی آلفا یک ذره آلفا از هسته که شامل دو پروتون و دو نوترون است خارج می شود و واپاشی بتا تبدیل خود به خودی یک نوترون در هسته اتم به یک پروتون است که طی آن یک الکترون گسیل می شود. این دو نوع رادیواکتیویته علاوه بر اینکه ذراتی را تولید می کنند خود اتم های رادیواکتیو را نیز تغییر می دهند و طی آن یک عنصر به عنصر دیگری تبدیل می شود.

در سال ۱۹۰۰ شیمی‌دان فرانسوی، پاول ویلارد، تابش یونیزه کننده دیگری به نام تابش گاما را که می‌توانست تا ۲۰ سانتی‌متر در آهن نفوذ کند کشف کرد. این پرتو شبیه پرتو ایکس اما با طول موج کمتر است.

مواد رادیواکتیو از طریق مجموعه‌ای از مراحل که طی آن‌ها ذرات آلفا و بتا گسیل می‌شود و عنصر رادیواکتیو طی زنجیره‌ای به سایر مواد رادیواکتیو تبدیل و نهایتاً به حالت پایدار می‌رسد. مشهورترین این زنجیره، واپاشی اورانیوم ۲۳۸ است.

در سال ۱۹۱۹ رادرفورد با بمباران نیتروژن با ذرات آلفا، آن را به اکسیژن تبدیل کرد و در سال ۱۹۳۴، ایرن کوری (دختر ماری کوری) به همراه همسرش فردریک، نخستین ایزوتوپ رادیواکتیو مصنوعی را تولید کردند.

در آغاز قرن بیستم، دو نظریه متفاوت برای توصیف منحنی تابش جسم سیاه وجود داشت. جسم سیاه آرمانی همه تابش تابیده را جذب کرده و نوری را باز نمی‌تاباند. از نظر فیزیک‌دان‌ها جسم سیاه جعبه‌ای است که درون آن کاواک پوشیده از دوده وجود دارد و نوری که از طریق روزنه‌ای وارد آن می‌شود خارج نخواهد شد. مطابق قوانین تابش گرمایی، یک شیء تابان با بالا رفتن دما، انرژی بیشتری می‌تاباند و شدت تابش با توان چهارم دمای مطلق جسم متناسب است. این قانون را قانون استفان-بولتزمن می‌نامند. طبق قانون جابه‌جایی وین بیشینه طول موج شدت تابش با افزایش دما کاهش می‌یابد یعنی با دما نسبت عکس دارد. قانون عمومی‌تری در مورد تابش گرمایی به وسیله دو دانشمند انگلیسی به نام‌های ریلی - جینز بیان شد که مطابق آن شدت تابش با دمای مطلق نسبت مستقیم و با مکعب طول موج نسبت عکس دارد. این قانون با تجربه توافق داشت ولی این توافق فقط در ناحیه طول موج‌های بلند طیف مرئی بود. فرمول ریلی - جینز تابندگی بسیار زیادی را در طول موج‌های کوتاه پیش‌بینی می‌کرد این ناکامی در طول موج‌های کوتاه را فاجعه فرابنفش نامیدند. در سال ۱۹۰۰ تابش جسم سیاه به درستی توسط فیزیک‌دان آلمانی به نام ماکس پلانک تبیین شد. پلانک پیشنهاد کرد که بازتاب‌های جسم سیاه به وسیله جذب و گسیل سریع توسط اتم‌های دیواره کاواک صورت می‌گیرد و اتم‌ها با بسامد تابش نوسان می‌کنند. طبق نظریه پلانک یک اتم نوسانگر فقط انرژی را در بسته‌های گسسته (به نام کوانتم) جذب و گسیل می‌دارد انرژی این کوانتم‌ها با بسامد تابش متناسب بود و با زیاد شدن بسامد انرژی هم زیاد می‌شد و از طرفی هیچ موج منفردی نمی‌توانست بیش از مقدار مشخصی (kT)

انرژی داشته باشد و این تابش در بسامدهای زیاد را محدود و فاجعه فرابنفش را حل می‌کرد. ماکس پلانک پدر علم فیزیک کوانتوم خوانده می‌شود.

در سال ۱۹۰۵ اینشتین نظریه پلانک را یک گام دیگر جلو برد و کوانتیده بودن نور را مطرح کرد و مطابق این نظریه نور هم در بسته‌های مجزا یا کوانتومی وجود دارد که هر کوانتوم نور را یک فوتون می‌نامند. در اواخر سال‌های ۱۹۱۰ بسیاری از فیزیک‌دان‌ها نظریه کوانتومی نور را پذیرفتند.

در سال ۱۹۲۴ لویی دوبروی در رساله دکتری خود پیشنهاد کرد که اگر نور می‌تواند خواص موج و ذره را داشته باشد بنابراین ماده هم ممکن است این خاصیت را داشته باشد. دوبروی رفتار دوگانه موج-ذره را فراتر از نور، به ماده هم تعمیم داد. و فرمولی برای محاسبه طول موج یک ذره ارائه داد. چند سالی پس از اعلام نظریه دوبروی، دانشمندان آمریکایی دیویسون و گرمر با مشاهده پراش الکترون در نتیجه عبور از بلور این نظریه را تأیید کردند. شناگری که بر قله یک موج بزرگ سوار می‌شود و موج او را به ساحل هدایت می‌کند در واقع موج مانند یک راهنما عمل می‌کند. دوبروی عقیده داشت که امواج ماده نیز ذرات را به همین شیوه هدایت می‌کنند. ولی این موج از کجا می‌آید؟ دوبروی برای این سؤال پاسخی نداشت.

در سال ۱۹۲۶ فیزیک‌دان اتریشی اروین شرودینگر به نظریه دوگانه موج-ذره دوبروی یک گام اضافه کرد. شرودینگر استدلال کرد که رفتار دوگانه موضوع اصلی نیست و موج به تنهایی حقیقت را آشکار می‌کند. شرودینگر معادله‌ای ارائه داد که به وسیله آن «تابع موج» ذره به دست می‌آید که به کمک آن می‌توانستیم توزیع انرژی ذره در فضا را محاسبه کنیم. شرودینگر احتمال را وارد این قسمت از فیزیک کرد و توانست موقعیت ذره را به صورت آماری بیان کند. معادله شرودینگر بخش اساسی مکانیک کوانتومی است. این معادله دنیای فیزیک را دگرگون کرد. شرودینگر ایده تابع موج را برای بیان احتمال بودن ذره در یک بازه زمانی در یک محل خاص به کار گرفت و همه اطلاعات قابل درک درباره آن ذره را از تابع موج استخراج کرد. کمیت مجهول در معادله شرودینگر تابع موج است و مربع تابع موج، احتمال وجود ذره در زمان و مکان معین است.

در سال ۱۹۲۷ رورن هایزنبرگ (۱۹۰۱-۱۹۷۶) نشان داد که نظریه کوانتوم چند پیش‌گویی غیرعادی دارد و نشان داد آزمایش به طور مستقل انجام نمی‌شود و عمل