

مکانیک کوانتومی

خلاصه ای از تاریخ مکانیک کوانتومی

گرچه مکانیک کوانتومی برای توصیف دنیای اتمی ابداع شد و به نظر می‌رسید که با دنیای تجارت روزمره فاصله زیادی خواهد داشت ولی تأثیر آن در زندگی امروزی بدون شک فوق‌العاده است. پیشرفتهای هیجان‌انگیز در شیمی بیولوژی پزشکی و هر آنچه امروز به عنوان علم شناسایی می‌شود مرهون وسایلی است که پس از پیدایش این علم و در ارتباط با این علم ساخته شده‌اند. بدون مکانیک کوانتومی صحبت از اقتصاد جهانی ممکن نبود زیرا انقلاب الکترونیکی که باعث این نوع دگرگونی در تفکر بشری شد کامپیوتر بود و کامپیوتر خود مولود مکانیک کوانتومی بود.

از دیگر انقلابها انقلاب فوتونیک است که باعث زمانه نظریه اطلاعات شده است خود فوتونیک ریشه در مکانیک کوانتومی دارد. ابداع مکانیک کوانتومی دنیای گذشته را تبدیل به دنیای جدیدی کرده که از مواهب آن استفاده می‌کنیم و می‌بایست با مضار آن نیز مقابله کنیم. به زبان دیگر مکانیک کوانتومی یک دستاورد انقلاب علمی برای بشریت است.

بر خلاف نسبیت عام و توصیف دی ان آ مکانیک کوانتومی از تلاش یک فرد حاصل نشد و مجموعه‌ای از نوابع عالم در یک زمان محدود کوشیدند تا این علم ظهور و بروز نماید. پس از مدت بیست سال پس از پیدایش ایده‌های کوانتومی دانشمندان چنان سردرگم بودند که امید کمی به پیشرفت داشتند ولی گروه کوچکی از آنها در سه سال پر التهاب این علم را آفریدند.

این دانشمندان از کاری که می‌کردند می‌ترسیدند و در دسرهای فراوانی برای آنها ایجاد شد. این موفقیت یگانه برای این نظریه جدیدی که پایه استواری ندارد را به صورت زیر می‌توان بیان کرد. نظریه کوانتومی با دقیق‌ترین روشها مورد ارزیابی قرار گرفته است و موفقیت‌آمیزترین نظریه در تاریخ علم بشری است. با این وجود در زمان بنیان‌گذاران این نظریه کاملاً ارضاء کننده نبود و پس از گذشت ۵۷ سال هم این مشکلات نظری دامن‌گیر این نظریه است. بزرگان این علم هنوز هم ارضاء نشده‌اند و اساس این نظریه هم هنوز به طور کامل پذیرفته نشده است. اگرچه قدرت فوق‌العاده‌ای از این نظریه در عمل مشاهده شده است سال دو هزار میلادی صدومین سال آفرینش مفهوم کوانتوم ماکس پلانک است. در مقاله تاریخی او پلانک تصور نمود که انرژی دستگاههای ارتعاشی نمی‌توانند به صورت پیوسته تغییر کنند. بجای این پیوستگی از مقداری به مقدار دیگری پرش خواهند کرد. این پرشها یا قدمهای گسسته یا کوانتایی امکان‌پذیر است. پذیرش این ایده کوانتایی آنچنان سخت بود که پلانک اجازه داد در ابهام باقی بماند. در سال ۱۹۰۵ اینشتین این خاصیت را در مورد نور تشخیص داد و آنرا در پدیده فوتوالکترونیک بکار گرفت. گرچه این مفهوم چندان جلب توجه نمی‌کرد و امید کمی به پیشرفت آن وجود داشت. ۲۰ سال طول کشید تا نسل جدیدی از فیزیکدانان از این ایده استفاده کنند و نظریه کوانتومی را بنا کنند.

برای فهمیدن تأثیر مکانیک کوانتومی بر فیزیک کافی است به مطالعه فیزیک قبل از مکانیک کوانتومی بپردازیم. در بین سالهای ۱۸۹۰ تا ۱۹۰۰ مجلات فیزیک پر از مقالاتی بود که به مطالعه طیفهای اتمی و هر کمیت قابل سنجش فیزیکی بود. این موارد شامل ویسکوزیته الاستیسیته هدایت گرمایی و هدایت الکتریکی اجسام است ضریب انبساط سنجش ظرایب شکست نور ضرایب کشسانی و حرارتی اجسام را نیز شامل می‌شدند. با استفاده از نبوغ بشری و بکارگیری این نبوغ در استفاده از روشهای تجربی و انرژی حاصل از محترم بودن و ارزشمند شدن کار دانش بشری به شدت افزایش پیدا کرد. آنچه در این دوره مشاهده می‌کنید و با آنچه امروز می‌بینید تفاوت اساسی دارد. تمام مشاهدات و خواص ماده تنها تجربی بودند. هزاران صفحه راجع به تابش اتمی عناصر مختلف وجود داشت ولی هیچکس نمی‌دانست که چرا این خطوط طیفی وجود دارند و چه اطلاعاتی را ارائه می‌دهند. قوانین تجربی فراوانی معرفی شدند ولی ارضاء کننده نبودند به عنوان مثال قانون دولانگ و پتیه (۰ $dulong$ petit) وجود داشت که رابطه مشخصی بین ظرفیت حرارتی و جرم اتمی ماده بیان می‌کرد. غالباً از این قانون پیروی می‌شد ولی بعضی از اجسام از آن پیروی نمی‌کردند. جرم حجمهای مساوی از گازها غالباً از نسبت دو عدد درست پیروی می‌کرد گاهی اوقات و در بعضی موارد این قانون کافی نبود. ضرایب هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی توسط الگوهای مختلفی بیان می‌شدند ولی غالباً نیمی از حقایق را بیان می‌کردند. جدول تناوبی مندلیف که اصل اساسی برای مرتب کردن عناصر و پایه‌ای برای توسعه علم شیمی بود هیچ نوع پایه نظری نداشت.

بین دستاوردهای مکانیک کوانتومی می‌توان موارد زیر را بیان کرد. مکانیک کوانتومی نظریه کمی برای توصیف ماده را ارائه کرده است. ما به طور نسبتاً کاملی جزئیات ساختار اتمی را فهمیده ایم. جدول تناوبی توصیف طبیعی و ساده‌ای به خود گرفته است. و هرگونه دادههای طیف اتمی عناصر با توصیف کوانتومی آن مطابقت می‌کند. نظریه مکانیک کوانتومی اجازه فهمیدن کمی مولکولها را نیز می‌دهد همین موارد در مورد جامدات مایعات هادیها و نیمه هادیها نیز صحت دارد. پدیدههای نسبتاً غیر متعارف ابررسانایی و ابر سیال را توضیح می‌دهد. فرمهای غیر عادی ماده نظیر ستاره نوترونی و چگالش بوزه اینشتین که آنها به صورت یک اتم بسیار بزرگند را تشریح می‌کند. مکانیک در حقیقت باعث ساختن وسائلی شده است که

بوسیله آنها هر نوع تکنولوژی پیشرفته ایی را می توانیم سامان دهیم. مکانیک کوانتومی در حقیقت دو واقعیت را به نمایش می گذارد. مکانیک کوانتومی نظریه مادی است که تراز اتمی را شناسایی و در نهایت به ما اجازه می دهد ساختار آنرا بفهمیم و مطابق ذوق خود در آنها تغییر ایجاد کنیم. نظریه مکانیک کوانتومی میدان نقشی کاملاً مختلف از کوانتومی ایفا می کند و در آینده راجع به آن بحث خواهیم کرد.

مکانیک کوانتومی

اولین جرقه راجع به انقلاب کوانتومی از بررسی ماده به دست نیامد. این موضوع در بررسی تابش حضور خود را اعلام کرد. به طور مشخص فهمیدن طیف تابشی گسیلی از اجسام بسیار داغ منجر به این نظریه شد. این پدیده برای هر فردی که خود به تماشای آتش بپردازد آشنا است. ماده داغ می درخشد و هر چه گرمتر باشد درخشش آن روشنتر می شود. طیف آن گسترده

است و بیشینه این طیف از نور قرمز به زرد و بالاخره به نور آبی متمایل می شود. امکان فهمیدن این طیف به صورت نظری توسط نظریه الکترومغناطیس و ترمودینامیک می بایست حاصل شود. ولی با استفاده از این دو نظریه این امر امکان پذیر نشد

پلانک با فرض این که الکترونهاى مرتعش از خود تابش گسیلی انجام می دهند و این طیف نیز کوانتایی است توانست توزیع تابش را بدست آورد و این توزیع با نتایج تجربی مطابقت کامل داشت. اما او به خوبی تشخیص داد که این نظریه به صورت فیزیکی کاملاً غیر قابل قبول است و او به عنوان آخرین حربه برای توصیف توزیع تابش انجام داد. پلانک این فرضیه کوانتایی را برای اجسامی که در دیواره تابش می کنند و ارتعاش دارند در نظر گرفت.

اگر اینشتین در سال ۱۹۰۵ به این ایده کوانتایی توجه نمی کرد شاید مکانیک کوانتومی به پایان عمر خودش می رسید ولی بدون اشتیاق فراوان قبول کرد که اگر انرژی ارتعاشی به صورت کوانتایی است خود نور نیز می بایست به صورت کوانتایی

باشد. این نتیجه به عمر موجی بودن نور خاتمه داد و ذره گونه بودن نور را باعث شد. این مثالی برای توضیح مکانیک کوانتومی اجسام شد که در تمام عمر مکانیک کوانتومی با آن مواجه هستیم. این دو گانگی به مدت بیست سال یک معما برای فیزیک نظری بود. قدم دوم در ارتباط با این نابسامانی در مورد ماده بود. به عنوان یک اطلاع بشر در یافته بود که ماده شامل ذرات حاوی بارهای مثبت و منفی است. ولی این دو بار الکتریکی می بایست بر اساس الکترومغناطیس همدیگر را جذب نمایند. و بر اساس همین نظریه این دو بار بدور یکدیگر به صورت مارپیچی چرخیده تا با هم برخورد کنند و در این راه از خود تابش نموده و در نهایت در هم پیچیده و نابود شوند.

پیشرفت از طرف یک تازه وارد یعنی بور صورت گرفت. در سال ۱۹۱۳ فرضیه انقلابی دیگری ارائه شد الکترونها در اتمها در حالتهاى ایستای خاصی حضور دارند و از جمله حالت زمینه الکترونها می توانند بین حالتهاى ایستا جهش کنند. از تراز پایین با دریافت انرژی به تراز بالا روند و از ترازهای بالا با گسیل فوتون به ترازهای پایین بیایند. بدین ترتیب بور پایداری اتمی را زیر سوال برد و مشکل آنرا حل کرد. نظریه بور حاوی تناقضات فراوانی بود ولی توصیف کمی مناسبی برای طیف اتم هیدروژن را بیان کرد. با این وجود که این نظریه کامل نیست و کمبودهایی دارد بور همراه با سایر فیزیکدانان در جستجوی فیزیک جدیدی بود که تناقضات این نظریه را بر طرف کند. ۱۲ سال طول کشید و توسط نسل جدیدی از فیزیکدانان این امر محقق شد.

دوبروی در سال ۱۹۲۳ در تز دکترای خود پیشنهاد رفتاری مشابه با فوتون در مورد ذرات را پیش کشید. به زبان دیگر گفت که ذرات نیز از خود رفتار موجی نشان می دهند. این پیش بینی به صورت تجربی اثبات شد. ولی این پیشنهاد ساختار اتمی را به وضوح روشن نمی کرد. در سال ۱۹۲۴ بوزه روش جدیدی برای توصیف قانون تابش پلانک ارائه کرد در این نظریه نور به عنوان ذرات بدون جرم و از نظر طبیعت غیر قابل تمیز با ساختار آماری جدیدی بیان کرد و از آن طریق قانون توزیع تابش را بدست آورد. اینشتین همین مطلب را در مورد ذرات نیز بکار گرفت و توزیع بوزه اینشتین در مورد ذرات با اسپین درست بدست آمد. در این شرایط بود که غیر قابل تمیز بودن ذرات در فیزیک به خوبی حس شد.

از ژانویه ۱۹۲۵ تا ژانویه ۱۹۲۸ حوادث مختلفی اتفاق افتاد که ذکر آنها بسیار مهم است. پائولی اصل طرد را پیشنهاد کرد که اساس توصیف جدول مندلیف شد. ورنر هایزنبرگ ماکس بورن و پاسکال جردن مکانیک ماتریسی را پیشنهاد کردند. اروین شرودینگر فرم جدیدی برای مکانیک کوانتومی معرفی کرد در این فرم حالتهاى مکانیک کوانتومی توسط توابع موج که جواب معادله شرودینگر بودند توصیف می شدند. گر چه به صورت ظاهری مکانیک ماتریسی و مکانیک موجی با هم تفاوت داشتند ولی اثبات شد که این دو در حقیقت یک مطلب را بیان می کنند و به یکدیگر مربوط هستند. مشخص شد که الکترونها نیز از آمار جدیدی به نام آمار فرمی دیراک پیروی می کنند که با آمار بوزه اینشتین یکی نیست. هایزنبرگ اصل عدم قطعیت خود را معرفی

کرد. دیراک یک معادله نسبیتی برای الکترونها نوشت و در این معادله اسپین الکترونها در خود معادله لحاظ می شد و در عین حال توصیف کننده ماده و پاد ماده نیز شد. دیراک اساس نظریه میدان کوانتومی که توصیف کننده میدان الکترومغناطیس بود را پیشنهاد داد. بور نیز اصل همخوانی خود که جنبه فلسفی داشت را نیز معرفی کرد.

بازیگران اصلی صحنه مکانیک کوانتومی جوان بودند در سال ۱۹۲۵ پائولی ۲۵ سال داشت هایزنبرگ و فرمی هر دو ۲۴ ساله بودند دیراک و جردن تنها ۲۳ سال داشتند شرودینگر ۳۶ سال بور و بورن هر دو از شرودینگر پیرتر بودند. سالمندان بیشتر در تعبیر و تفسیر کار می کردند و جوانها نیز ایدههای نو ظهور را پیش می کشیدند. این ایدههای تازه توسط پیرترها به خصوص توسط اینشتین به چالش کشیده می شدند. آخرین کار مهم اینشتین آمار بوزه و اینشتین بود که در این زمان ارائه شد و دیگر اندیشه نوظهوری از او ارائه نشد. نسل جدیدی از فیزیکدانان می بایست این ایدهها را به وجود آورند و هملنطور که لرد کلونین با مواجهه به ایده بور ابراز نومییدی کرد در مورد این ایده جوانها نیز پیرها به مقابله برخواستند ولی در آخر نظریه های جدید با تجربه موافقت بیشتری داشتند.

در سال ۱۹۲۸ انقلاب مکانیک کوانتومی به نتیجه رسید و بر اساس کاملی بیان شد. ایده اسپین توسط سامونل گود اسمیت و جرج او هن بک (uhlenbeck) ارائه شد و این بور نسبت به آن نظر مساعدی ابراز نکرد و پس از مدتی این نظریه را قبول کرد. آخر این که مکانیک کوانتومی یک بمب علمی بود زیرا هایزنبرگ ساختار اتمها را با استفاده از آن توضیح داد. در سال ۱۹۲۷ اتم هلیوم توسط معادله شرودینگر به طور تقریبی حل شد. اسلیتر ساختار اتمی تقریبی توسط معادله شرودینگر را بیان کرد. این نظریه توسط اسلیتر هارتری و بالاخره فوک به تکامل خود رسید و ساختار اتمها توضیح داده شد. ملکول اتم هیدروژن توسط فریتز لندن و والتر هیتر بیان شد و لینوس پائولینگ pauling نظریه شیمی کوانتومی را ارائه کرد. زومرفلد و پائولی اساس نظریه الکترون در فلزات را بیان کردند و خاصیت کاتوره ای بودن واپاشی مواد پرتوزا نخست توسط گاموف بیان شد و در سالهای بعد هانس بته اساس فیزیک هسته ای که در تولید انرژی ستارگان نقش دارند را بیان کرد. با این پیشرفتها فیزیک اتمی ملکولی حالت جامد و هسته ای به طور کامل بیان شدند و بشریت به زمانه جدیدی قدم گذاشت.

سردرگمی و تناقضات

همراه با پیشرفتهای این علم مناظره سختی بین طرفداران و مخالفان در مورد تفسیر و درست بودن آن وجود داشت و دارد. طرفداران قدیمی عبارتند از هایزنبرگ و بور و ناراضیان نیز اینشتین به همراه شرودینگر بودند. برای درک بهتر لازم است که خواص اصلی این نظریه بیان شوند و به خصوص به دلیل فراوانی استفاده از معادله شرودینگر این خواص به این زبان بیان می شوند. توصیف اساسی از طریق تابع موج دستگاه است. رفتار دستگاه کوانتومی از طریق حل معادله شرودینگر بدست می آید. جوابهای این معادله به عنوان توابع موج دستگاه معرفی می شود. تمام دانش مربوط به این دستگاه از طریق این تابع موج بیان می شوند. از این طریق هر کمیت مشاهده پذیر مربوط به دستگاه به توصیف تابع موج مربوط می شود. احتمال یافتن یک دستگاه در حجم کوچکی در فضا برابر است با مربع قدر مطلق تابع موج ضربدر حجم بی نهایت کوچک فضا در آن نقطه که تابع موج توصیف می شود. نتیجتاً موقعیت احتمالی ذره بر روی فضا پخش می شود. اندازه حرکت ذره نیز به شیب منحنی تابع موج وابسته و بدین ترتیب شیب بیشتر متناظر با اندازه حرکت بزرگتر است. و از آنجا که شیب در تابع موج متغیر است اندازه حرکت نیز متغیر خواهد بود و وابسته به مکان است. اندازه حرکت نیز مثل موقعیت ذره در فضای اندازه حرکت پخش خواهد بود. از دست دادن تصویر کلاسیک ذره در مکانیک کوانتومی از مطلبی که به طور دقیق دارای موضع و سرعت مشخص است تا تصویر پخش احتمال در مکان و اندازه حرکت مهمترین مساله فیزیکدانان است. در مکانیک کوانتومی اندازه گیری برای دستگاههایی که به صورت یکسانی آماده می شوند نتایج یکسانی را نخواهد داشت. اصل عدم یقین به صورت کمی بدین مضمون است که برای یافتن مکان دقیق یک جسم می بایست تابع موجش به صورت فوق العاده ای بزرگ باشد (نه این که پخش باشد) ولی این کمیت بسیار بزرگ شیبهای بزرگی نیز خواهد داشت و بدین ترتیب پخش در فضای اندازه حرکت آن نیز بزرگ خواهد شد. بدین ترتیب مفهوم یافتن یک ذره در یک موقعیت مشخص و با اندازه حرکت معین مفهوم خود را در مکانیک کوانتومی از دست خواهد داد.

تابع موج می تواند تداخل کند.

بر اساس این که توابع موج چه اختلاف فازی داشته باشند می توانند باهم تداخل نمایند این تداخل بیشینه از جمع دو تابع و کمینه آن از تقریب این دو تابع موج حاصل می شود. بدین ترتیب که ترکیب آنها وابسته به اختلاف فاز آنها است. اگر همفاز باشند جمع و خارج از فاز یکدیگر باشند از هم کم خواهند شد. همانطور که نور در بین دو شکاف نقاط تاریک و روشن را به وجود می آورد الکترونها نیز می توانند همین رفتار را از خود بروز دهند. به طور کلاسیک اغتشاش در یک محیط را موج تلقی

می کنیم . در مکانیک کوانتومی محیطی وجود ندارد و در نتیجه نمی بایست موجی حضور داشته باشد. با این وجود در مکانیک کوانتومی در واقع وجود تابع موج به منزله دانشی است که ما از دستگاه کوانتومی خواهیم داشت.

تقارن و یکسانی

یک اتم هلیوم شامل یک هسته و دو الکترون است این دو الکترون هسته را پوشش می دهند تابع موج هلیوم توسط موقعیت این دو الکترون توصیف می شود . ولی یکسانی دو الکترون ایجاب می کند که تشخیص دو الکترون امکان پذیر نباشد. نتیجتاً اگر دو الکترون جا بجا شوند تغییری در دستگاه در دستگاه کوانتومی مشاهده نخواهد شد. دلیل این امر احتمال متناسب با قدر مطلق تابع موج است. تابع موج این دو الکترون در جابجایی دو حالت را می تواند قبول کند یکی تابع موج قدیم و جدید تغییری نکنند و یا این که این دو تابع موج در جابجایی علامت عوض کنند. یکی از اکتشافات مهم در مکانیک کوانتومی این است که تابع موج الکترونها همواره علامت عوض می کند. نتایج این مطلب خیلی اهمیت دارد که اگر الکترونها در یک حالت کوانتومی باشند تابع موج آنها در یک موقعیت مکانی صفر خواهد شد. این به عنوان اصل طرد پائولی است. تمام ذراتی که دارای اسپین نیمه درست هستند از این اصل پیروی می کنند و آنها را فرمیون می گویند. برای ذراتی که حاوی اسپین درست هستند (شامل فوتونها نیز هست) تابع موج تغییر علامت نمی دهد و نه تنها در یک موقعیت صفر نیست بلکه تداخل سازنده خواهد داشت. این ذرات را بوزون می گویند. الکترون در اتمها در پوسته های مختلف جای می گیرند زیرا فرمیون هستند ولی نور ناشی از لیزر به صورت یک پرتو ابر شدید ظهور پیدا می کند . نهایتاً به عنوان یک حالت کوانتومی است زیرا نور بوزون در نظر گرفته

می شود . اخیراً اتمها در گازها را به اندازه کافی سرد کرده اند تا در محدوده مکانیک کوانتومی در آیند و در نتیجه دستگاه بتواند یک پرتو ماده ابر شدید گسیل کند یک لیزر ذره ای تشکیل دهد. این ایدهها تنها در مورد ذرات یکسان در نظر گرفته

می شوند زیرا اگر ذرات متفاوت باشند و ذرات جابجا شوند توابع موج کاملاً متفاوتی را به وجود می آورند. به عبارت دیگر این خواص تنها در مورد ذرات یکسان چه بوزون و چه فرمیون به وجود می آیند. یکسان بودن ذرات یکی از پیچیده ترین و رموزترین موضوع در مکانیک کوانتومی است یکی از بزرگترین محاسن نظریه میدان کوانتومی این است که این پیچیدگی و رمز را توجیه می کند. چه معنی می دهد؟ سوالی نظیر تابع موج چیست "آیا واقعا وجود دارد" و چه معنی می دهد یا "سنجش یک موقعیت" در روزهای نخست به شدت مورد بحث قرار گرفتند. در سال ۱۹۳۰ تغییر مکانیک کوانتومی استاندارد توسط بور و دوستانش ارائه شد و به عنوان تعبیر و تفسیر کپنهاکی مشهور است. عناصر اصلی این تعبیر عبارتند از توصیف احتمالی ماده و حوادث و با استفاده از اصل مکملیت تعبیر همزمان خواص موجی و ذره ای برای ماده. اینشتین این مکانیک کوانتومی را حتی تا لحظه مرگ در سال ۱۹۵۵ قبول نکرد او و بور تا این زمان در مناظره با یکدیگر بودند. نکته اصلی در این مناظره این بود که تابع موج تمام اطلاعات راجع به دستگاه کوانتومی را بیان می کند و یا این که یک متغیر مخفی نیز وجود دارد که نتیجه نهایی اندازه گیری را تعیین می کند. در اواسط دهه ۱۹۶۰ جان بل نشان داد که اگر یک متغیر مخفی وجود داشته باشد. احتمالات مشاهده شده تجربی می بایست از یک حدی کمتر باشند که به نام نامساوی بل معروف است. آزمایشهای متعددی از طرف گروههای مختلف انجام شده و این آزمایشها موید بر این هستند که نامساوی بل برآورده نمی شود و از آن تخطی می شود. برای بیشتر دانشمندان این حقایق تجربی پایان ماجرای متغیر مخفی شد.

با این وجود مطلب دیگری در نظریه مکانیک کوانتومی جلب توجه می کند این موضوع به عنوان نا آشنایی کوانتومی معروف است. خاصیتهای نا آشنای دستگاههای کوانتومی از آنچه به عنوان بهم پیچیده گی خوانده می شود به وجود می آید. به طور خلاصه یک دستگاه کوانتومی مثلاً اتم می تواند در هر یک از حالتهای ایستای خود سنجیده شود. اما در ترکیب حالتها ایستا نیز می تواند حضور داشته باشد. اگر شخصی یک کمیت مشاهده پذیر این دستگاه را بسنجد " نظیر انرژی " نتیجه یک مقدار از حالت ایستا خواهد بود گاهی تراز i -م و گاهی تراز j -م تا اینجا چیزی نا آشنا نیست. ولی امکان دارد که دستگاهی شامل دو اتم باشد که بهم پیچیده شده اند به عبارت دیگر خواص این دو اتم به صورت شراکتی مطرح می شوند اگر اتمها از یکدیگر جدا شوند اطلاعات در باره یکی در دیگری نیز شرکت داده می شود. این رفتار غیر قابل توضیح با زبان مکانیک کوانتومی است. آثار این وابستگی گی چنان قابل توجه هستند که مورد بررسی اجتماع کوچک ولی فعال از فیزیکدانان تجربی و نظری است. مسایل تنها به سوالات اصولی محدود نمی شود اصل پیچیده گی ممکن است مفید هم باشد. حالات بهم پیچیده شده در دستگاههای کوانتومی ارتباطی بکار گرفته شده اند و بهم پیچیده گی پایه و اساس پیشنهادات در محاسبات کوانتومی است.

انقلاب دوم

همزمان با سالهای پر تحول میانه دهه ۱۹۲۰ که مکانیک کوانتومی اختراع شد انقلاب دیگری نیز در راه بود. اساس کار برای ظهور شاخه دوم مکانیک کوانتومی یا نظریه میدان کوانتومی نیز مساعد شد. بر خلاف مکانیک کوانتومی که به صورت

فعالیت‌های کوتاه مدت و به صورت کامل بروز کرد نظریه میدان کوانتومی همراه با تاریخ شکنجه آمیزش است که تا کنون نیز ادامه دارد. بر خلاف مشکلات فراوانش این نظریه دقیق‌ترین نظریه ای است که بشر تا کنون در زمینه فیزیک اختراع کرده است. مساله ای که باعث بررسی نظریه میدان شد سوال چگونگی تابش نور به عنوان جهش یک حالت برانگیخته به حالت دیگری بود. در سال ۱۹۰۶ اینشتین این تابش را به عنوان فرایند تابش خود به خود خواند ولی آهنگ انتقال آنرا نتوانست بدست آورد. برای حل کامل این مساله نیاز به توسعه نظریه میدان نسبیتی الکترومغناطیس است که با نام نظریه کوانتومی نور شناخته می شود. مکانیک کوانتومی نظریه کوانتومی ماده است. نظریه میدان کوانتومی همانطور که از نامش مشهود است نظریه میدان است و تنها مربوط به نظریه میدانی الکترومغناطیس نیست همانطوری که میدانهای دیگری نیز شناخته شدند.

در سال ۱۹۲۵ بورن هایزنبرگ و جردن ایده‌های ابتدایی نظریه نور را مطرح کردند ولی قدمهای اصلی توسط جوانی که همواره در تنهایی کار می کرد "دیراک" بر داشته شد. او در سال ۱۹۲۶ نظریه میدان را ارائه کرد. این نظریه همراه با

پیچیده گیهای محاسباتی سختی بود پیش بینی وجود بینهایت در آن دیده شد و به وضوح اصل تناظر در آن نقض می شد. در سال ۱۹۴۰ روش جدیدی برای محاسبات نظریه میدان توسط فاینمن شوینگر و تومانگا به نام الکترودینامیک کوانتومی (qed) (

اختراع شد. آنان بی نهایتها را با استفاده از روش باز بهنجارش ثانی کنار گذاشتند به طوری که بی نهایتها از دست رفته نتایج محدودی بجای می گذاشتند و از آنجا که جواب دقیقی برای این نظریه وجود نداشت به صورت تقریبی و اختلالی آنها را حساب کردند. در این تقریب نتایج به صورت یک سری در می آمدند که رفته رفته در محاسبه کردن اعضا آنها اشکالات بیشتر می شد. معهدا عبارتهای این سری کوچک و کوچکتر می شدند و بعضی مواقع نیز شروع به بزرگ شدن می کردند در آن صورت تقریب کاربردی نداشت. با کنار گذاشتن این ناکامیها این نظریه در تاریخ فیزیک بهترین دقیق ترین و موفق ترین نظریه بشری است. در این نظریه پیش بینی قدرت برهم کنش بین الکترون و میدان مغناطیسی که به صورت تجربی آزمایش شده است از دقتی برابر دو در مقابل ده به توان دوازده حکایت می کند.

با وجود این موفقیتها کوانتوم الکترودینامیک ابهام نیز دارد چگونگی مشاهده فضای خالی "خلا" در این نظریه ابتدا چیزهایی بود که به نظر می رسد نامعقول است را ارائه می کرد. بدین ترتیب که فضای خالی هم در واقع خالی نیست. یعنی این که در این خلا میدانهای مغناطیسی کوچکی که افت و خیز دارند وجود دارند. این افت و خیزها ی خلا برای توصیف تابش خود به خود اساسی هستند. در واقع آنها یک انتقال در انرژی قابل سنجش را پیش بینی کردند و بعضی از خواص عجیب ذرات نظیر الکترون را که توسط آزمایشهای بسیار دقیق به صورت تجربی محقق شده با این نظریه تطبیق می شود.

در انرژیهای پایین یعنی دنیای اطراف ما مکانیک کوانتومی در توصیف آن به اندازه کافی دقیق است. اما در انرژیهای بالاتر اثرات نسبیت وارد صحنه می شوند و روش کلی تری مورد نیاز است. نظریه میدان کوانتومی آفریده شد تا بین مکانیک کوانتومی و نسبیت خاص قرابت ایجاد کند. نقش حیاتی نظریه میدان کوانتومی در این است که پاسخی برای مسایل متعددی که در طبیعت ماده است را توضیح می دهد. نظریه میدان کوانتومی توضیح می دهد که چرا دو نوع ذره فرمیون و بوزون وجود دارند و خواص آنها چگونه به اسپین آنها مربوط می شود. آن توضیح می دهد که نه تنها فوتونها بلکه ذرات و پاد ذرات چگونه به وجود می آیند و چگونه نابود می شوند. آن طبیعت یکسانی را در مکانیک کوانتومی توضیح می دهد. آن توضیح می دهد که ذرات یکسان واقعا یکسان هستند چون از یک نوع میدان به وجود می آیند. نظریه الکترودینامیک کوانتومی الکترون و

دسته ای از ذرات که سبک نامیده می شوند نظیر میون تاو مزون و پاد ذرات آنها را توصیف می کند. از آنجا که این در توصیف ذرات سبک موفق است نمی تواند ذرات سنگین تری با نام هدرونها را توصیف کند. این ذرات عبارتند از پروتون نوترون و دنیایی از مزونها یک نظریه جدید بر اساس نظریه میدان کوانتومی با نام میدان کوانتومی رنگی "کرومودینامیک" (qcd) ابداع شده است. مشابهت بین این دو میدان وجود دارد الکترونها اتمها را می سازند و کوارکها نیز هدرونها را خواهند ساخت. واسطه بین ذرات بار دار فوتونها هستند و واسطه بین کوارکها را گلوئون نامیده اند. با توجه به مشابهتها تفاوتهایی نیز بین این دو وجود دارد. بر خلاف لپتونها و فوتونها کوارکها و گلوئونها به درون هدرونها وابسته اند و بیرون نمی آیند. تا کنون نتوانستند آنها را به صورت مجزا مورد بررسی قرار دهند.

کوانتوم الکترودینامیک و کوانتوم کرومودینامیک پایه هایی برای نظریه جدیدی با نام الگوی متعارف هستند که از ترکیب این دو نظریه بدست آمده است. الگوی متعارف به طور موفقیت آمیزی تمام آزمایشهایی که در مورد ذرات انجام شده تا امروز را پاسخگو است. معهدا غالب فیزیکدانان عقیده دارند که این نظریه نیز کافی نیست. دلیلی که ارائه می شود این است که دادههای راجع به جرمها بارهای الکتریکی و سایر خواص ذرات را می بایست از طریق تجربه بدست آورد یک نظریه ایده آل تمام اینها را می بایست پیش بینی کند.

امروز اندیشه‌گشایی که ساختار نهایی ماده را مورد شناسایی قرار می‌دهد درست مشابه با روزهای نخست پیدایش مکانیک کوانتومی است نتایج این شناسایی ممکن است برتر از گذشته باشد. این اندیشه‌گشایی توصیف کاملی از کوانتومی و گرانش است. روش کوانتومی شدن نور کوانتوم الکترودینامیک کاملاً شناخته شده است ولی این روش در مورد گرانش با نیم قرن تلاش در دستیابی آن هنوز هم امکان پذیر نشده است. این مساله کاملاً حیاتی است زیرا اگر نسبیت عام و مکانیک کوانتومی هر دو درست باشند بنابر این تلفیق این دو نیز امکان پذیر است و توانایی توصیف کلی همه حوادث را نیز دارد. در شرایط حاضر در دنیای اطراف ما هیچ نوع تضادی موجود نیست زیرا اثر گرانش در این حالت‌های کوانتومی بسیار ضعیف است و کوانتومی به خوبی و بدون حضور گرانش می‌تواند دنیای ما را توضیح دهد. ولی برای دستگاه‌هایی نظیر سیاهچاله که در آن گرانش قوی است نمی‌توانیم به طور معقولی رفتار کوانتومی گرانش را به خوبی پیش بینی کنیم.

یک قرن پیش اطلاعات ما از دنیای اطرافمان کاملاً تجربی بود. مکانیک کوانتومی نظریه‌ای بود که توصیف کاملی از ماده را ارائه کرد و این دانش دنیای اطرافمان را به طور کلی تغییر داد. برای قرن آینده نیز مکانیک کوانتومی مفاهیم اساسی و وسایل توسعه کلیه علوم را ارائه خواهد کرد. این پیش بینی را با اطمینان تمام می‌توانیم مطرح کنیم زیرا در دنیای اطرافمان مکانیک کوانتومی جواب‌های درست و کامل را ارائه می‌کند. با این وجود فیزیک امروز نیز نظیر فیزیک قرن نوزدهم است در نهایت کاملاً تجربی است. ما نمی‌توانیم خواص و جزئیات ماده را به طور کامل پیش بینی کنیم. می‌بایست آنها را به صورت تجربی اندازه گیری کنیم.

شاید نظریه ریسمان که تعمیمی از مکانیک کوانتومی میدان است پاسخگو باشد زیرا این نظریه ذرات نقطه‌ای را به صورت گسترده در نظر گرفته و بی‌نهایت‌های موجود در نظریه میدان را حذف می‌کند و یا این که نظریه جدیدی این مشکل را بر طرف می‌کند. در هر صورت فهم کامل دنیای موجود پشتیبان قوی برای کسانی است که در این وادی قدم می‌گذارند شاید در قرن آتی این مسایل نیز روشن شوند.

این نوشته بر گرفته از مقاله آقایان رومن ژاکیف و دانیل کلینبر اساتید انستیتوی تکنولوژی ماسوچوست آمریکا است که در مجله دانش آن کشور در سال ۲۰۰۰ به چاپ رسیده است.