**1. ВВЕДЕНИЕ**

Квантовая механика является одним из главных достижений научной мысли XX века. Наряду с теорией относительности она составляет фундамент современной физики.

**1. KIRISH**

Kvant mexanikasi XX asr ilmiy tafakkurining asosiy yutuqlaridan biridir. Nisbiylik nazariyasi bilan bir qatorda u zamonaviy fizikani tashkil etuvchi asosdir.

До начала XX столетия для описания вещества и электромагнитного поля использовались различные законы. Движение макроскопических тел описывалось в рамках механики Галилея-Ньютона, а поле излучения - на основе теории электромагнетизма Максвелла, которая позволила понять большую совокупность явлений, рассматриваемых до этого независимо друг от друга: электричество, магнетизм, оптика. Процессы взаимодействия излучения с веществом объяснялись на основе электронной теории Лоренца. Все эти теоретические достижения, имеющие хорошее экспериментальное подтверждение, позволяли считать состояние физики вполне удовлетворительным. Ньютоновская механика, электромагнитная теория Максвелла и термодинамика представляли собой, образно говоря, «три кита», на которых покоилось здание физики конца XIX столетия.

XX asr boshlariga qadar modda va elektromagnit maydonni tavsiflash uchun turli qonunlar qo‘llanilgan. Makroskopik jismlarning harakati Galiley-Nyuton mexanikasi doirasida tasvirlangan, nurlanish maydoni esa Makswellning elektromagnetizm nazariyasi asosida tushuntirilgan. Ushbu nazariya ilgari bir-biridan mustaqil tarzda qaralgan ko‘plab hodisalarni — elektr, magnit va optikani — yagona tizimda tushunishga imkon bergan. Nurlanishning modda bilan o‘zaro ta’sir jarayonlari esa Lorentsning elektron nazariyasi asosida izohlangan. Ushbu nazariy yutuqlarning barchasi tajriba bilan yaxshi tasdiqlanganligi sababli, fizikada holat qoniqarli deb hisoblangan. Nyuton mexanikasi, Makswellning elektromagnit nazariyasi va termodinamika, obrazli aytganda, XIX asr oxiri fizikasi binosining “uchta baliq”i (asosiy tayanchlari) bo‘lgan.

Ситуацию, сложившуюся к началу XX века, хорошо охарактеризовал Уильям Томсон (лорд Кельвин). В своей речи 27 апреля 1900 г. на заседании Лондонского королевского общества он отметил, что физика практически решила все стоящие перед ней задачи, построила красивую и ясную теорию теплоты и света, и только два облачка омрачают ясный научный небосклон. Первое облачко -это ультрафиолетовая катастрофа в проблеме излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ), а второе облачко - это результаты опыта Майкельсона. Причём второе облако напоминает большую тучу. Из первого «облака» выросла квантовая теория Макса Планка в 1900 г., а из второго «облака» родилась релятивистская механика, т.е. специальная теория относительности (СТО), построенная Альбертом Эйнштейном в 1905 г.

XX asr boshlariga kelib shakllangan vaziyatni Uilyam Tomson (lord Kelvin) juda aniq tavsiflab bergan. 1900-yil 27-aprel kuni London Qirollik jamiyatining yig‘ilishida u o‘z nutqida fizika deyarli o‘z oldiga qo‘yilgan barcha masalalarni hal qilganini, issiqlik va yorug‘lik nazariyasini chiroyli va tushunarli shaklda qurib bo‘lganini aytgan. Biroq u ilmiy osmonni faqat ikkita “bulut” xiralashtirayotganini ta’kidlagan. Birinchi bulut — bu mutlaq qora jism (MQJ) nurlanishi muammosidagi ultrabinafsha falokati, ikkinchi bulut esa — Maykelson tajribasining natijalari bo‘lgan. Unga ko‘ra, ikkinchi “bulut” katta qora bulutni eslatardi. Birinchi “bulut”dan 1900-yilda Maks Plankning kvant nazariyasi paydo bo‘lgan, ikkinchi “bulut”dan esa nisbiylik mexanikasi — ya’ni, 1905-yilda Albert Eynshteyn tomonidan yaratilgan maxsus nisbiylik nazariyasi (MNN) dunyoga kelgan.

Глубокие потрясения, которые испытала физика в начале XX века, могут быть охарактеризованы как две «революции»: релятивистская и квантовая. Возникнув практически одновременно, они поставили под сомнение справедливость классической физики с двух сторон: было установлено, что классические законы «не работают» при движении материальных частиц со скоростями, близкими к скорости света (т.е. в релятивистской области), а также в процессах атомного масштаба (т.е. в квантовой области). Это означало, что классическая механика и классическая электродинамика дошли до границ своей применимости: попытки применить классические представления к объяснению атомных явлений приводили к результатам, противоречащим опыту.

XX asr boshlarida fizika boshdan kechirgan chuqur silkinishlar ikki xil “inqilob” sifatida tavsiflanadi: nisbiylik inqilobi va kvant inqilobi. Deyarli bir vaqtda yuzaga kelgan ushbu ikki nazariya klassik fizika to‘g‘riligini ikki tomondan shubha ostiga oldi: aniqlanishicha, klassik qonunlar moddiy zarralarning yorug‘lik tezligiga yaqin tezliklarda harakatlanishini (ya’ni, nisbiylik sohasini), shuningdek, atom miqyosidagi jarayonlarni (ya’ni, kvant sohasini) tushuntira olmaydi. Bu esa klassik mexanika va klassik elektrodinamikaning qo‘llanilish chegarasiga yetganini anglatardi: klassik qarashlarni atom hodisalariga tatbiq etish tajribaga zid bo‘lgan natijalarga olib kelgan.

Глубокое противоречие теории с экспериментом потребовало построения новой теории, применимой к атомным масштабам. Такой теорией явилась квантовая механика - фундаментальная физическая теория, описывающая явления микромира. Место, занимаемое квантовой механикой на карте физической науки, можно наглядно проиллюстрировать с помощью «квадрата физики частиц» со стороной, равной единице (рис. 1):

Nazariyaning tajriba bilan chuqur zid kelishi atom miqyosidagi hodisalarga tatbiq etilishi mumkin bo‘lgan yangi nazariyani yaratishni taqozo etdi. Aynan shunday nazariya — kvant mexanikasi bo‘ldi. U mikroolam hodisalarini tasvirlovchi fundamental fizik nazariyadir. Kvant mexanikasining fizik fanlar xaritasidagi o‘rnini esa “zarralar fizikasi kvadrati” (1-rasm) yordamida yaqqol tasvirlash mumkin; bu kvadratning har bir tomoni birlikka teng.



Рис. 1. Место нерелятивистской квантовой механики среди других «механик»

Здесь - характерные скорости частиц, с - скорость света, S - классическая функция действия. По осям отложены безразмерные величины, не превышающие 1. Это обусловлено тем, что согласно СТО , а максимальное значение по оси абсцисс вытекает из неравенства Гейзенберга для координаты и импульса , левая часть которого имеет размерность действия (энергия время, или координата импульс). Таким образом, , откуда следует, что .

Bu yerda v — zarrachalarning xos (tipik) tezligi, c — yorug‘lik tezligi, S — klassik harakat funksiyasi. O‘qlar bo‘ylab o‘lchamsiz, ya’ni birliksiz kattaliklar keltirilgan, ular 1 dan oshmaydi. Bu holat maxsus nisbiylik nazariyasiga (MNN) muvofiq:,

Abssissa o‘qi bo‘yicha maksimal qiymat Geyzenbergning koordinata va impuls uchun noaniqlik tengsizligidan kelib chiqadi: ,bu yerda tenglamaning chap tomoni harakat (ya’ni energiya × vaqt yoki koordinata × impuls) o‘lchamiga ega. Shunday qilib, , bundan esa quyidagi nisbat kelib chiqadi: .

Для явлений микромира характерная величина действия сравнима с квантом действия . Процессы, для которых , называются квазиклассическими. Если величиной можно пренебречь ( ), тогда справедлива классическая механика.

Mikrodunyo hodisalari uchun xarakterli harakat miqdori harakat kvanti h bilan taqqoslanadi . Agar jarayonlar uchun bo‘lsa, ular kvaziklassik jarayonlar deb ataladi. Agar h qiymatini e’tiborsiz qoldirish mumkin bo‘lsa (), u holda klassik mexanika amal qiladi.

Квант действия, введенный в 1900 г. Максом Планком, положил начало новому, неклассическому, способу описания явлений природы. В развитии квантовой теории в первой трети XX столетия можно выделить следующие основные этапы. Первый этап: от работ М. Планка 1900 г. до работ Н. Бора 1913 г. Второй этап - «старая квантовая теория», или квантовая теория, основанная на принципе соответствия: с 1913 г. по 1922 г.

Harakat kvanti 1900-yilda Maks Plank tomonidan kiritilgan bo‘lib, tabiat hodisalarini tasvirlashning yangi, klassik bo‘lmagan usuliga asos soldi. XX asrning birinchi uchdan bir qismida kvant nazariyasining rivojlanishida quyidagi asosiy bosqichlarni ajratish mumkin: Birinchi bosqich: M. Plankning 1900-yildagi ishlari boshlab, N. Borning 1913-yildagi ishlarigacha bo‘lgan davr. Ikkinchi bosqich — “eski kvant nazariyasi” yoki moslik printsipiga asoslangan kvant nazariyasi: 1913-yildan 1922-yilgacha bo‘lgan davr.

Затем наступил период, называемый «кризисом старой квантовой теории». Последовавшая за этим эпоха получила название «золотой век теоретической физики» (1924-1927 гг.), завершившийся окончательной формулировкой нерелятивистской квантовой механики.

So‘ngra “eski kvant nazariyasi inqirozi” deb ataladigan davr boshlandi. Undan keyin esa “nazariy fizikaning oltin asri” (1924–1927-yillar) deb nomlangan davr keldi. Bu davr norelativistik kvant mexanikasining yakuniy formulasi bilan nihoyasiga yetdi.

В 1925 г. появилась матричная квантовая механика В. Гейзенберга-М. Борна-П. Йордана. Несколько позже, в 1926 г., была создана волновая механика Э. Шрёдингера, в которой используется гамильтонов формализм. Волновая механика и матричная механика - это разные формулировки одной и той же квантовой теории. В 1926-27 гг. П. Дирак разработал векторную формулировку квантовой механики.

1925-yilda V. Geyzenberg, M. Born va P. Yordan tomonidan matritsali kvant mexanikasi yaratildi. Biroz keyinroq, 1926-yilda E. Shredinger tomonidan Gamilton formalizmiga asoslangan to‘lqinli mexanika ishlab chiqildi. To‘lqinli mexanika va matritsali mexanika — bu bir xil kvant nazariyasining turlicha formulirovkalari hisoblanadi. 1926–27-yillarda esa P. Dirak kvant mexanikasining vektorli formulirovkasini ishlab chiqdi.

Формулировка квантовой теории, предложенная в 1942 г. американским физиком-теоретиком Ричардом Фейнманом [31], опирается на представление о бесконечномерном интегрировании по траекториям. В математической литературе такие интегралы называют «континуальными интегралами». Физики же,

в основном, используют термин «интегралы по траекториям». Вместо гамильтонова формализма Фейнман использует метод Лагранжа.

1942-yilda amerikalik nazariyotchi fizik Richard Feynmanning taklif qilgan kvant nazariyasi formulirovkasi trayektoriyalar bo‘yicha cheksiz o‘lchamli integrallash tushunchasiga asoslanadi. Matematik adabiyotda bunday integral «kontinuum integrallari» deb ataladi. Fiziklar esa asosan «trayektoriyalar bo‘yicha integral» atamasidan foydalanadilar. Feynmanning yondashuvida Gamilton formalizmi o‘rniga Lagranj usul qo‘llaniladi.

Нерелятивистское волновое уравнение Шрёдингера применимо для описания движения частиц, скорость которых значительно меньше скорости света. Оно не инвариантно относительно преобразований специальной теории относительности - преобразований Лоренца, поскольку координаты и время входят в это уравнение неравноправно: уравнение содержит первую производную по времени и вторые производные по координатам, в то время как согласно требованиям СТО пространственные и временные координаты должны входить в уравнения на одинаковых основаниях.

Norelyativistik Shredinger to‘lqin tenglamasi zarrachalar harakatini tasvirlashda qo‘llaniladi, ularning tezligi yorug‘lik tezligidan ancha kichik bo‘ladi. Bu tenglama maxsus nisbiylik nazariyasining — Lorens aylantirishlarining — o‘zgarishlariga nisbatan invariant emas, chunki koordinatalar va vaqt ushbu tenglamaga teng huquqli tarzda kiritilmagan: tenglama vaqt bo‘yicha birinchi tartibli, koordinatalar bo‘yicha esa ikkinchi tartibli hosilalarni o‘z ichiga oladi. Holbuki, maxsus nisbiylik nazariyasi talablariga ko‘ra, fazoviy va vaqt koordinatalari teng asosda tenglamalarga kiritilishi lozim.

Релятивистски-инвариантное обобщение уравнения Шрёдингера было установлено в 1926 г. О. Клейном, В.А. Фоком и В. Гордоном. Соответствующее волновое уравнение для частиц с нулевым спином носит название уравнения Клейна-Гордона-Фока.

Shredinger tenglamasining relyativistik invariant umumlashtirilgan ko‘rinishi 1926-yilda O. Kleyn, V.A. Fok va V. Gordon tomonidan yaratilgan. Nol spinli zarrachalar uchun mos keluvchi ushbu to‘lqin tenglamasi Kleyn–Gordon–Fok tenglamasi deb ataladi.

В 1928 г. П. Дирак сформулировал релятивистское волновое уравнение для частиц со спином , послужившее основой для создания релятивистской квантовой механики. После уравнений классической электродинамики Максвел-ла-Лоренца следующий важнейший этап развития учения об электроне был связан именно с уравнением Дирака. Полуклассическая теория Бора и нерелятивистская квантовая механика явились промежуточными теориями. Изложение основ релятивистской квантовой механики выходит за рамки этой книги.

1928-yilda P. Dirak spin ga ega zarrachalar uchun relyativistik to‘lqin tenglamasini formulaladi, bu esa relyativistik kvant mexanikasining yaratilishiga asos bo‘ldi. Maksvell–Lorens klassik elektromagnit nazariyasidan keyingi elektron haqidagi taʼlimot rivojining eng muhim bosqichi aynan Dirak tenglamasi bilan bog‘liq bo‘ldi. Borning yarimklassik nazariyasi va neryalativistik kvant mexanikasi esa oraliq nazariyalar bo‘lgan. Relyativistik kvant mexanikasining asoslarini bayon qilish ushbu kitob doirasidan tashqarida.

Фундаментальное описание природы является квантово-механическим. Изучение квантовой механики необходимо для понимания свойств микромира, химических, биологических, астрофизических и других явлений, от объектов неживой природы до самого феномена жизни.

Tabiatning fundamental tavsifi kvant-mexanik hisoblanadi. Kvant mexanikasini o‘rganish mikrojahon xususiyatlarini, kimyoviy, biologik, astrofizik va boshqa hodisalarni — jonsiz tabiat obyektlaridan tortib, hayot fenomenigacha — tushunish uchun zarurdir.

К особенностям поведения микрообъектов, установленных квантовой механикой, относятся:

1. дискретность атомных состояний,
2. корпускулярно-волновой дуализм,
3. вероятностный характер законов микромира.

Kvant mexanikasi tomonidan aniqlangan mikroobyektlar xatti-harakatining xususiyatlariga quyidagilar kiradi:

* 1. atom holatlarining diskretligi,
  2. zarracha-to‘lqin dualligi,
  3. mikroolam qonunlarining ehtimollik xarakteri.

Квантовая механика оказалась пригодной для описания систем с неизменным числом частиц, в ней не рассматриваются процессы рождения, уничтожения и взаимопревращаемости частиц. Дальнейшее обобщение квантовой механики привело к созданию квантовой теории поля (КТП), в которой взаимная превращаемость рассматривается как фундаментальное свойство элементарных частиц, являющихся квантами соответствующих полей. Основной метод, используемый в КТП - метод вторичного квантования, в котором роль независимых переменных играют числа частиц в данном квантовом состоянии, а переходы между различными состояниями описываются с помощью операторов рождения и уничтожения частиц. Изложение основ этого метода содержится, например, в [1; 7; 11; 17].

Kvant mexanikasi o‘zgaruvchi sonli zarrachalarga ega bo‘lmagan tizimlarni tasvirlash uchun mos bo‘lib chiqdi; unda zarrachalarning paydo bo‘lishi, yo‘q bo‘lishi va o‘zaro aylanish jarayonlari ko‘rib chiqilmaydi. Kvant mexanikasining keyingi umumlashtirilishi kvant maydon nazariyasining (KMN) yaratilishiga olib keldi. Unda zarrachalarning o‘zaro aylanishi elementar zarrachalarning muhim xossasi sifatida qaraladi — bu zarrachalar tegishli maydonlarning kvantlari hisoblanadi. KMNda qo‘llaniladigan asosiy usul — bu ikkilamchi kvantlash usuli bo‘lib, unda mustaqil o‘zgaruvchilar sifatida ma’lum kvant holatidagi zarrachalar soni olinadi, turli holatlar orasidagi o‘tishlar esa zarrachalarning yaratilishi va yo‘q bo‘lishi operatorlari yordamida tasvirlanadi. Ushbu usul asoslari, masalan, [1; 7; 11; 17] manbalarda keltirilgan.

Наглядное представление о генезисе квантовой механики, её формах и перспективных направлениях использования квантовых ресурсов дает Приложение VI.

Kvant mexanikasining kelib chiqishi, uning shakllari va kvant resurslaridan foydalanishning istiqbolli yo‘nalishlari haqida tasavvur hosil qilish uchun VI-ilova yordam beradi.

Макромир мне непонятен, Стыну у его дверей, -

Он почти невероятен

В необъятности своей.

В микромир бы мне пробраться,

В мир незримых величин,

В край, где корни коренятся

Всех последствий и причин;

В царство малых измерений

Вникнуть, где на миллион

Действенных микромгновений

Миг обычный расщеплен;

В государство дробных чисел

И неведомых чудес.

От которых мы зависим

Более, чем от небес...

В.C. Шефнер

Makrodunyo menga tushunarsiz,

Uning eshigida muzlayman,

U o‘z cheksizligida

Deyarli ishonib bo‘lmas darajada.

Mikrodunyoga kirishni istar edim,

Ko‘rinmas kattaliklar olamiga,

Barcha oqibatlar va sabablarning

Ildizi yotgan manzil sari;

Kichik o‘lchovlar saltanatiga

Sho‘ng‘ishni istar edim, u yerda oddiy bir lahza

Million faol mikrolahzaga

Ajralgan bo‘ladi;

Bo‘linuvchi sonlar davlatiga

Va noma’lum mo‘jizalar sari.

Biz ularga

Osmondan ham ko‘ra ko‘proq bog’langanmiz…

V.S. Shefner

«Самая большая и самая глубокая революция, которую натуральная философия претерпела со времён Ньютона».  
А. Пуанкаре

«Nyutondan beri tabiiy falsafa boshidan kechirgan eng katta va eng chuqur inqilob.»

A. Puan­ka­re

**2. ТЕМА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**

**2. MAVZU 1. KVANT MEXANIKASINING EKSPERIMENTAL ASOSLARI**

**3. Лекция 1. Истоки квантовой теории. Формула Планка**

**3. Ma’ruza 1. Kvant nazariyasining ildizlari. Plank formulasi**

**4. 1. Проблема распределения энергии в спектре равновесного излучения**

**4.1. Muvozanat nurlanish spektridagi energiya taqsimoti muammosi**

Квантовая теория возникла в результате исследований теплового излучения (излучения нагретых тел). Начало этим исследованиям положил Густав Кирхгоф, который в 1859 г. установил закон, согласно которому отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела и является универсальной функцией температуры и частоты:

Тело, у которого поглощательная способность равна единице, называется абсолютно чёрным телом (АЧТ), оно поглощает всю падающую на него энергию. Моделью АЧТ может служить достаточно большая полость с небольшим отверстием. Излучение, попавшее в полость через отверстие, многократно отражаясь от стенок, практически полностью поглотится. Т.е. малое отверстие будет вести себя как АЧТ, выходящее из него излучение будет равновесным тепловым излучением (сколько энергии электромагнитного поля поглощается стенками, столько же возвращается обратно в полость в единицу времени).

Kvаnt nаzаriyasi issiqlik nurlanishi (qizdirilgan jismlarning nurlanishi) bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar natijasida yuzaga kelgan. Bu tadqiqotlarga 1859-yilda Gustav Kirxgof tomonidan boshlangan. U o‘z tadqiqotlarida quyidagi qonunni aniqlagan: jismlarning nurlantirish qobiliyati bilan ularning yutish qobiliyati orasidagi nisbat jism tabiatiga bog‘liq emas va faqat harorat hamda chastotaga bog‘liq bo‘lgan universal funksiya hisoblanadi:

Yutuvchanlik qobiliyati birga teng bo‘lgan jism mutlaq qora jism (MQJ) deb ataladi, u unga tushayotgan barcha energiyani yutadi. MQJ modeli sifatida kichik teshikka ega bo‘lgan yetarlicha katta bo‘shliq xizmat qilishi mumkin. Teshik orqali bo‘shliqqa tushgan nurlanish devorlardan ko‘p marotaba aks etib, deyarli to‘liq yutiladi. Ya’ni, kichik teshik MQJ kabi harakat qiladi, undan chiqayotgan nurlanish esa muvozanatdagi issiqlik nurlanishi bo‘ladi (ya’ni elektromagnit maydonining qancha energiyasi devorlar tomonidan yutilsa, shuncha miqdori bir vaqt birligida yana bo‘shliqqa qaytadi).

Из соотношения (1.1) при следует, что излучательная способность АЧТ

Поэтому отношение излучательной способности любого тела к его поглощательной способности равно излучательной способности абсолютно чёрного тела

которая связана со спектральной плотностью электромагнитного излучения соотношением

Из (1.3) и (1.4) следует, что если известна теоретическая формула для спектральной плотности , и если экспериментальная проверка в случае абсолютно чёрного тела подтверждает эту формулу, то можно вычислить распределение энергии в спектре для любого тела, зная его поглощательную способность. Поэтому теоретическое определение функции представляло собой важнейшую задачу.

(1.1) tenglamadan, agar bo‘lsa, mutlaq qora jismning nurlanish qobiliyati

ekanligi kelib chiqadi.

Shuning uchun har qanday jismning nurlanish qobiliyatining uning yutish qobiliyatiga nisbati mutlaq qora jismning nurlanish qobiliyati ga teng bo’ladi:

bu esa elektromagnit nurlanishning spektral zichligi bilan quyidagi tenglama orqali bog’langan:

(1.3) va (1.4) tenglamalardan kelib chiqadiki, agar spektral zichlik uchun nazariy formula ma’lum bo‘lsa va mutlaq qora jism holatida eksperimental tekshiruv bu formulani tasdiqlasa, unda har qanday jismning yutish qobiliyatini bilgan holda uning spektrdagi energiya taqsimotini hisoblash mumkin. Shuning uchun funksiyasini nazariy aniqlash eng muhim vazifa edi.

К концу XIX века экспериментально была установлена кривая распределения энергии в спектре АЧТ, имеющая максимум (пик с округлой вершиной, рис. 2). Она показывает, какая энергия приходится на данную частоту в единице объёма.

XIX asr oxiriga kelib, mutlaq qora jism spektridagi energiya taqsimoti egri chizig‘i eksperimental ravishda aniqlandi, bu egri chizik maksimumga (yumaloq cho‘qqiga ega, 2-rasm) ega. U ma’lum chastota ga birlik hajmda qancha energiya to‘g‘ri kelishini ko‘rsatadi.



Рис. 2. Распределение энергии в спектре абсолютно чёрного тела

2-rasm. Mutlaq qora jism spektridagi energiya taqsimoti

Однако теоретического обоснования этой кривой не было. Были получены формулы, которые удовлетворительно описывали спектр либо в области малых частот, либо для достаточно больших частот, а единой формулы не существовало.

Biroq, ushbu egri chiziqning nazariy asoslanishi mavjud emas edi. Faqat kichik chastotalar sohasida yoki yetarlicha katta chastotalar uchun spektrni qoniqarli tasvirlaydigan formulalar olingan edi, lekin yagona formula mavjud emas edi.

**2. Классическая теория излучения абсолютно чёрного тела. Формулы Рэлея-**

**Джинса и Михельсона-Вина**

**2. Mutlaq qora jism nurlanishining klassik nazariyasi. Reley-Jins va Mixelson-Vin formulalari**

Дж. Рэлей (1900 г.) и Дж. Джинс (1905 г.) установили формулу, которая хорошо описывала область малых частот

где с - скорость света, к - постоянная Больцмана.

J. Reley (1900 y.) va J. Jins (1905 y.) past chastotalar sohasini yaxshi ifodalaydigan formulani keltirib chiqardilar:

bu yerda c - yorug'lik tezligi, k - Bolsman doimiysi.

Формула Рэлея-Джинса была получена в рамках классических представлений. Стенки полости, нагретые до определённой температуры Т, можно рассматривать как совокупность линейных гармонических осцилляторов, играющих роль элементарных излучающих центров. В частности, каждый электрон, совершающий колебания под действием квазиупругой силы, подобен линейному гармоническому осциллятору, который согласно теории Максвелла излучает электромагнитные волны. Через некоторое время в замкнутой полости устанавливается статистическое равновесие, при котором стенки полости будут излучать и поглощать в единицу времени одну и ту же электромагнитную энергию. В полости будет существовать неизменная во времени система стоячих электромагнитных волн (рис. 3).

Reley-Jins formulasi klassik tasavvurlar doirasida olingan edi. Muayyan temperatura gacha qizdirilgan bo‘shliq devorlari chiziqli garmonik osillyatorlar to‘plami sifatida qaralishi mumkin, ular elementar nurlanuvchi markazlar rolini o‘ynaydi. Xususan, kvazielastik kuch ta’sirida tebranuvchi har bir elektron chiziqli garmonik osillyatorga o‘xshaydi va Maksvell nazariyasiga ko‘ra elektromagnit to‘lqinlar chiqaradi. Muayyan vaqtdan so‘ng yopiq bo‘shliqda statistik muvozanat o‘rnatiladi, bunda bo‘shliq devorlari birlik vaqtda bir xil elektromagnit energiyani nurlantiradi va yutadi. Bo‘shliqda vaqt o‘tishi bilan o‘zgarmas turg‘un elektromagnit to‘lqinlar tizimi mavjud bo‘ladi (3-rasm).

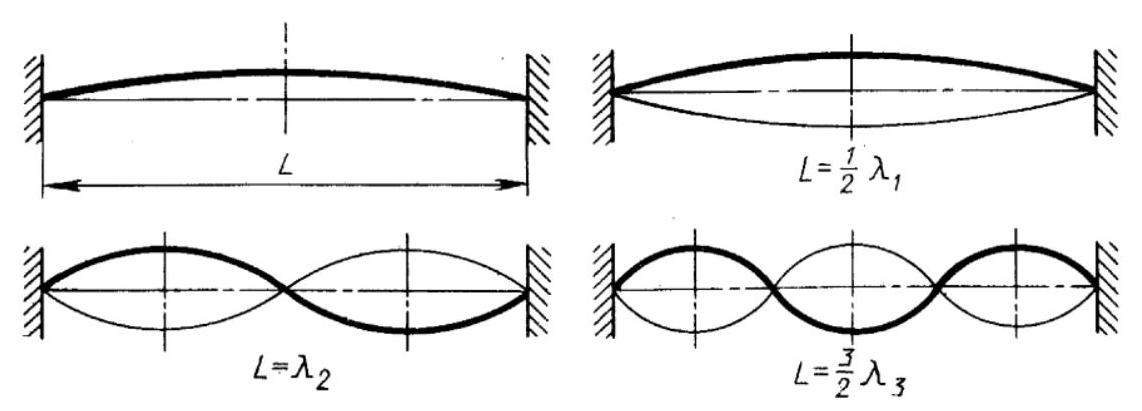


Рис. 3. Картина стоячих волн для одномерной модели

3-rasm. Bir o‘lchovli model uchun turg‘un to‘lqinlar tasviri

В одномерном случае для возникновения стоячей волны необходимо, чтобы на длине отрезка укладывалось целое число полуволн: , т.е

Перейдём к частотам колебаний:

Из (1.7) следует, что разность соседних частот

Поэтому в кубической полости с ребром L на одно колебание приходится в пространстве частот объём

Подсчитаем число колебаний с данной частотой . Построим сферу радиусом , дадим небольшое приращение радиусу на величину , получим новую сферу радиусом , и определим число колебаний, заключённых между двумя этими сферами. Для этого нужно объём заштрихованного сферического слоя разделить на объём одного колебания:

Biroq oddiy holatda turg‘un to‘lqinlar sonini hisoblash uchun

Bo‘shliqning uzunligi bo‘lib, u turg‘un to‘lqinlarning yarmi uzunligiga teng bo‘lishi kerak: , ya’ni

Chastotaga o’tish:

(1.7) dan foydalanib, qo‘shni chastotalar orasidagi farq:

Shuning uchun kubi uzunligi bo‘lgan bo‘shliqda bir tebranish chastotasi orqali bo‘shliq chastotasi chegarasiga yetguncha umumiy tebranishlar soni:

Keyin chastota dan kichik bo‘lgan barcha tebranishlar sonini hisoblaymiz. Chastota chegarasi radiusda orqali kengaytirilgan dan -gacha bo‘lgan yangi sferik qatlam orqali hisoblanadi. Buning uchun bo‘shliqning umumiy hajmini uch o‘lchovli sferik qatlamdagi tebranishlar soniga bo‘lish kerak:

Множитель 2 в этой формуле учитывает две поляризации электромагнитной волны. Далее мы должны взять только 1/8 сферы (один октант, рис. 4), чтобы учесть только положительные значения частот.

Ushbu formuladagi 2 koeffitsienti elektromagnit to‘lqinining ikkita polarizatsiyasini hisobga oladi. Keyinchalik, faqat chastotalarning musbat qiymatlarini hisobga olish uchun sferaning faqat 1/8 qismini (bir oktant, 4-rasm) olishimiz kerak.

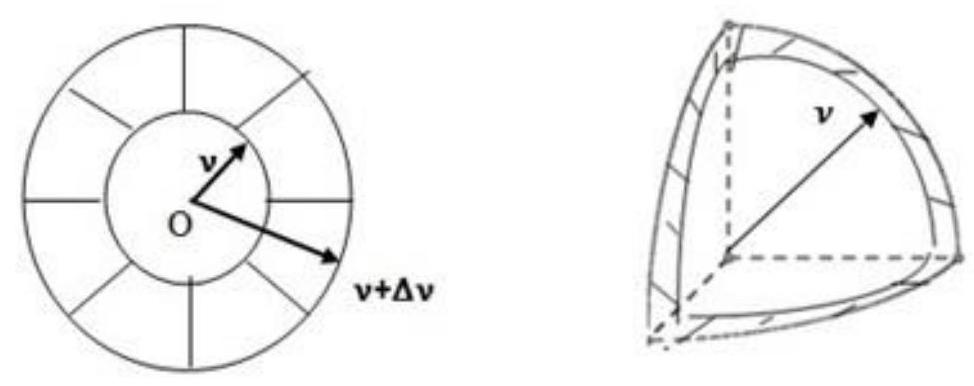


Рис. 4. К расчёту числа колебаний

4-rasm. Tebranishlar sonini hisoblash uchun

Из (1.10) следует, что число колебаний с данной частотой в единице объёма ( ) замкнутой полости определяется выражением

Таким образом, первый множитель в формуле Рэлея-Джинса (1.5) представляет собой чисто геометрический фактор.

(1.10) dan kelib chiqadiki, yopiq bo‘shliqda birlik hajmda () berilgan chastotaga ega tebranishlar soni quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

Shunday qilib, Reley-Jins formulasidagi (1.5) birinchi koeffitsient sof geometrik omilni ifodalaydi.

Покажем, что второй множитель в формуле (1.5) есть средняя энергия линейного гармонического осциллятора, вычисленная по теореме классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Согласно этой теореме на каждую степень свободы в среднем приходится кинетическая энергия кТ. Для линейного гармонического осциллятора средняя кинетическая энергия равна средней потенциальной энергии, поэтому его средняя энергия равна кТ. В условиях термодинамического равновесия между электромагнитным излучением и веществом стенок средняя энергия, приходящаяся на одно колебание поля в полости, также будет равна кт. Она складывается из средних энергий электрического и магнитного полей .

Endi ko‘rsatamizki, (1.5) formuladagi ikkinchi omil klassik statistika teoremasi bo‘yicha erkinlik darajalariga energiyaning teng taqsimlanishi asosida hisoblangan chiziqli garmonik osillyatorning o‘rtacha energiyasidir. Ushbu teoremaga ko‘ra, har bir erkinlik darajasiga o‘rtacha кТ kinetik energiya to‘g‘ri keladi. Chiziqli garmonik osillyator uchun o‘rtacha kinetik energiya o‘rtacha potensial energiyaga teng, shuning uchun uning o‘rtacha energiyasi ga teng bo‘ladi. Termodinamik muvozanat sharoitida elektromagnit nurlanish va bo‘shliq devorlari moddasi o‘rtasida bo‘shliqdagi har bir maydon tebranishiga to‘g‘ri keladigan o‘rtacha energiya ham ga teng bo‘ladi. Bu energiya elektr va magnit maydonlarning o‘rtacha energiyalaridan iborat .

В классической физике энергия меняется непрерывно, поэтому среднее значение энергии можно вычислить следующим образом:

где элементарная вероятность, соответствующая интервалу энергии dE , определяется по формуле Больцмана

Учитывая условие нормировки

находим нормировочную константу

Подставляя (1.15) в (1.12) с учётом (1.13), получаем

Вводя новую переменную , получим следующее выражение:

Klassik fizikada energiya uzluksiz oʻzgaradi, shuning uchun energiyaning oʻrtacha qiymatini quyidagicha hisoblash mumkin:

bu yerda E energiya oraligʻiga dE mos keladigan elementar ehtimollik Boltsman formulasi bilan aniqlanadi:

Normirlash sharti

hisobga olinsa, normirlash konstantasini topamiz:

(1.15) ni (1.12) ga (1.13) ni hisobga olib qoʻysak,

Yangi oʻzgaruvchini kiritib, quyidagi ifodani hosil qilamiz:

Интеграл, стоящий в знаменателе, как нетрудно видеть, равен единице. Интеграл в числителе вычисляется по частям, что даёт тоже 1. В результате средняя энергия осциллятора получается равной кТ, что соответствует классической теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы:

Таким образом, структура формулы Рэлея-Джинса (1.5) следующая:

где - число собственных колебаний поля, заключенного в замкнутой полости, а - средняя энергия осциллятора, зависящая только от температуры.

Maxrajdagi integral, koʻrinib turibdiki, birga teng. Numeratordagi integral qismlar boʻyicha hisoblanadi va natijada yana birga teng boʻladi. Natijada, tebranishchaning oʻrtacha energiyasi кТ ga teng boʻlib, bu energiyaning erkinlik darajalari boʻyicha bir xil taqsimlanishi haqidagi klassik teoremaga mos keladi:

Shunday qilib, Reley-Jins formulasining (1.5) tuzilishi quyidagicha:

bu yerda – yopiq boʻshliqda joylashgan maydonning **sobiq tebranishlar soni**, esa faqat haroratga bogʻliq boʻlgan tebranishchaning oʻrtacha energiyasidir

Согласно формуле Рэлея-Джинса спектральная плотность энергии излучения должна монотонно возрастать с увеличением частоты. Однако эксперимент показывал, что с увеличением частоты спектральная плотность сначала растёт, достигает максимума, а затем падает, стремясь к нулю в области больших частот. Кроме того, интегральная плотность энергии излучения

П. Эренфест назвал это «ультрафиолетовой катастрофой». Из (1.20) следует, что практически вся энергия должна перейти к электромагнитному полю, при этом температура стенок полости должна упасть до абсолютного нуля. «Ультрафиолетовая катастрофа» оказалась камнем преткновения для классической физики, которая обнаружила свою несостоятельность при попытке построения теории равновесного теплового излучения.

Rayl–Jins formulasi bo‘yicha, nurlanish energiyasining spektral zichligi chastota oshgan sayin monoton tarzda ortib borishi kerak edi. Biroq, tajribalar shuni ko‘rsatdiki, chastota oshganida spektral zichlik avval ortadi, maksimumga yetadi, so‘ng esa kamayib, yuqori chastotalar sohasida nolga intiladi.Bundan tashqari, nurlanish energiyasining integral zichligi:

P. Erenfest buni “ultrabinafsha falokati” deb atagan. (1.20) tenglamadan kelib chiqadiki, deyarli butun energiya elektromagnit maydonga o‘tishi kerak bo‘ladi va bu vaqtda kovak devorlarining harorati mutlaq nol darajagacha tushib ketadi. “Ultrabinafsha falokati” klassik fizika uchun jiddiy to‘siq bo‘ldi, chunki u muvozanatdagi issiqlik nurlanishining nazariyasini yaratishga uringanda o‘z ojizligini ko‘rsatdi.

Ранее, в 1887 г., московский физик В.А. Михельсон применил методы статистической физики к совокупности элементарных излучателей, образующих нагретое тело. Предположив, что скорости атомов подчиняются распределению Максвелла, Михельсон получил формулу, которая качественно воспроизводила экспериментальную кривую, но не совпадала с ней. Этот статистический подход к проблеме теплового излучения был развит немецким физиком Вильгельмом Вином, который в 1896 г. на основе статистики Максвелла-Больцмана получил следующую формулу:

где a и b-постоянные. В отличие от формулы Рэлея-Джинса, формула Вина давала максимум для кривой распределения энергии в спектре АЧТ.

Avvalroq, 1887-yilda, moskvalik fizik V.A. Mixelson qizdirilgan jismni tashkil qiluvchi elementar nurlanuvchilarning majmuasiga statistik fizika metodlarini qo‘llagan. U atomlarning tezliklari Maksvell taqsimotiga bo‘ysunadi deb faraz qilib, tajriba yo‘li bilan olingan egri chiziqni sifat jihatdan aks ettiruvchi, ammo u bilan to‘liq mos kelmaydigan formulani olgan. Bu statistik yondashuv issiqlik nurlanishi muammosiga Germaniyalik fizik Vilgelm Vin tomonidan rivojlantirildi. U 1896-yilda Maksvell–Boltzmann statistikasi asosida quyidagi formulani oldi:

Bu yerda a va b – doimiy miqdorlar. Rayl–Jins formulasidan farqli o‘laroq, Vin formulasi AChT spektrida energiya taqsimoti egri chizig‘i uchun maksimum qiymatni berardi.

В 1900 г. две группы учёных, работавших в то время Берлинском Физикотехническом институте, Отто Люммер и Эрнст Прингсгейм, и независимо Генрих Рубенс и Фердинанд Курльбаум, подвергли тщательной экспериментальной проверке формулу Вина и обнаружили, что она применима только в коротковолновой части спектра (т.е. при больших частотах). По данным Рубенса, величина оказалась пропорциональной температуре Т в области малых частот, о чём он сообщил Максу Планку, который уже на протяжении ряда лет занимался теоретическими исследованиями вопроса о равновесии между излучением и веществом. Этот экспериментальный факт сыграл важную роль в установлении Планком единой формулы, которая позволила описать весь спектр АЧТ.

1900-yilda Berlindagi Fizika-texnika institutida ishlayotgan ikki olimlar guruhi — Otto Lyummer va Ernst Pringsgeymlarning, shuningdek, mustaqil ravishda Genrix Rubens va Ferdinand Kurlbaumning jamoalari Vin formulasini sinchkovlik bilan eksperimental tekshirib chiqdilar va u faqat spektrning qisqa to‘lqinli (ya’ni yuqori chastotali) qismida qo‘llanilishi mumkinligini aniqladilar. Rubensning ma’lumotlariga ko‘ra, past chastotalar sohasida qiymati temperatura T ga proporsional ekanligi aniqlandi. Bu haqda u bir necha yillar davomida nurlanish va modda o‘rtasidagi muvozanat masalasi bilan nazariy shug‘ullanib kelayotgan Maks Plankka xabar berdi. Ushbu eksperimental fakt Plank tomonidan AChT spektrining butun sohasini tasvirlab bera oladigan yagona formulani aniqlashda muhim rol o‘ynadi.

**6. 3. Гипотеза о квантовании энергии микроскопических систем. Формула Планка**

**6.3. Mikroskopik tizimlar energiyasining kvantlanishi haqidagi gipoteza. Plank formulasi**

В 1900 г. Планку удалось установить формулу, благодаря которой ему было суждено стать основателем квантовой теории:

Эта формула была гениально угадана Планком, он получил её методом «подгонки». Здесь h - новая универсальная константа, введённая Планком и носящая его имя, эрг с. В системе СИ она соответственно равна 6,62. Дж • с.

1900-yilda Plank butun kvant nazariyasiga asos bo‘lgan formulani aniqlashga muvaffaq bo‘ldi:

Ushbu formula Plank tomonidan dahonavor tarzda “topib” olingan bo‘lib, u uni “moslashtirish” usuli orqali olgan. Bu yerda h — Plank tomonidan kiritilgan yangi universal doimiy bo‘lib, uning nomi bilan ataladi:

SI tizimida esa u quyidagicha ifodalanadi: 6,62. J • s.

Формула Планка (1.22) удовлетворяет принципу соответствия: в области малых частот она совпадает с формулой Рэлея-Джинса, а в области больших частот она переходит в формулу Михельсона-Вина.

1. Рассмотрим случай малых частот, когда . В этом случае можно применить формулу приближённого вычисления: при малых . Тогда из (1.22) получим

что совпадает с формулой Рэлея-Джинса.  
2) В области больших частот, когда , в знаменателе (1.22) можно пренебречь единицей по сравнению с экспонентой, в этом случае

что совпадает с формулой Михельсона-Вина. При этом становится понятной микроструктура постоянной , входящей в формулу Вина (1.21). Она связана с фундаментальными константами: .

Plank formulasi (1.22) muvofiqlik prinsipiga javob beradi: past chastotalar sohasida u Reyli-Jins formulasiga mos keladi, yuqori chastotalar sohasida esa u Mihelson-Vin formulasiga o’tadi.

1) Keling, past chastotalar holatini ko‘rib chiqamiz, ya’ni . Bunday holatda yaqinlashgan hisoblash formulasi qo‘llaniladi: , agar kichik bo‘lsa. Unda (1.22) formuladan quyidagini olamiz:

bu esa Reyli-Jins formulasiga mos keladi.

2) Yuqori chastotalar sohasida, ya’ni bo‘lsa, (1.22) formuladagi maxrajda birlikni eksponenta bilan solishtirganda hisobga olmaslik mumkin, bu holda:

bu esa Mihelson-Vin formulasiga mos keladi. Shu bilan birga, Vin formulasidagi doimiyning mikrotuzilishi tushunarli bo‘ladi: u fundamental doimiylar bilan bog’liq:

Найденную им формулу Планк впервые представил в докладе «Об одном улучшении закона Вина» на заседании Немецкого физического общества в Берлине 19 октября 1900 г. (Речь шла именно об «улучшении» закона Вина, и пока ничто не предвещало коренной ломки установившихся физических представлений). Последующие два месяца он интенсивно размышлял над тем, чтобы придать ей физический смысл. 14 декабря 1900 г. он вновь произнёс доклад на заседании Немецкого физического общества, который назывался «К теории распределения энергии излучения нормального спектра». В нём было представлено обоснование найденной им формулы. Этот день считается днём рождения квантовой теории. Таким образом, Планк сначала нашёл математическую модель закона излучения АЧТ, а затем постарался придать ему физический смысл.

Topilgan formulasini Plank birinchi bor 1900-yil 19-oktabrda Berlin shahrida bo‘lib o‘tgan Germaniya fizika jamiyati yig‘ilishida «Vin qonunining bir takomillashtirilishi haqida» nomli ma’ruzada taqdim etdi. (Gap aynan Vin qonunining «takomillashtirilishi» haqida borayotgan edi va hozircha bu fizik qarashlarning tubdan o‘zgarishini anglatmas edi). Keyingi ikki oy davomida u ushbu formulaga fizik ma’no berish ustida jiddiy bosh qotirdi. 1900-yil 14-dekabrda u yana Germaniya fizika jamiyati yig‘ilishida «Normal spektr nurlanish energiyasining taqsimlanishi nazariyasiga doir» nomli ma’ruza bilan chiqdi. Unda u topgan formulasining asoslanishi taqdim etildi. Ushbu sana kvant nazariyasining tug‘ilgan kuni deb hisoblanadi. Shu tariqa, Plank avval AChT (absolyut qora tana) nurlanish qonunining matematik modelini topdi, so‘ngra unga fizik ma’no berishga harakat qildi.

Какие физические допущения должен был сделать Макс Планк, чтобы обосновать выведенную им формулу? Так же, как и при выводе формулы РэлеяДжинса, стенки замкнутой полости рассматривались как совокупность заряженных линейных гармонических осцилляторов, обменивающихся энергией с электромагнитным полем. Однако, в отличие от классической теории, Планк выдвинул гипотезу о том, что энергия осциллятора меняется не непрерывно, а дискретно. Энергия осциллятора должна быть кратна некоторой минимальной энергии , пропорциональной частоте колебаний :

n=0, 1, 2, 3... Величина

представляет собой квант энергии, т.е. элементарную порцию энергии (рис. 5). Постоянную , имеющую размерность произведения (энергия время), Планк назвал квантом действия. «Таинственный посол из реального мира», - так охарактеризовал эту константу Планк.

Maks Plank o‘zi chiqarib olgan formulani asoslash uchun bir qator fizik farazlarga tayanishi kerak edi. Tıpkı Rëleý-Djins formulasini chiqarishda bo‘lgani kabi, yopiq bo‘shliq devorlari zaryadlangan chiziqli garmonik osillatorlar majmuasi sifatida ko‘rib chiqildi. Bu osillatorlar elektromagnit maydon bilan energiya almashadi. Biroq, klassik nazariyadan farqli ravishda, Plank shunday gipoteza ilgari surdiki: osillatör energiyasi uzluksiz emas, balki diskret miqdorlarda o‘zgaradi. Ya’ni, osillatör energiyasi ba’zi minimal energiya ga ko‘paytmasi bo‘lishi kerak, u esa tebranish chastotasiga proporsionaldir:

n = 0, 1, 2, 3, …

Bu kattalik — energiya kvanti, ya’ni energiyaning elementar porsiyasi (5-rasm). O‘lchov birligi (energiya × vaqt) bo‘lgan h doimiy kattalikni Plank «harakat kvanti» deb atadi. U bu konstantani «haqiqiy dunyodan kelgan sirli elchi» deb ta’riflagan.

В классической физике действие - это непрерывно изменяющаяся физическая величина. Напомним, что она связана с функцией Лагранжа (которая есть разность кинетической и потенциальной энергии, и поэтому меняется в классической механике непрерывным образом):

А здесь, благодаря гипотезе Планка, появилась минимальная порция квантового действия.

Klassik fizikada harakat (ya’ni «action») — bu uzluksiz o‘zgaradigan fizik kattalikdir. Eslatib o‘tamiz, u Lagranj funksiyasi bilan bog‘liq (Lagrang funksiyasi — bu kinetik va potensial energiyalar farqidir, shuning uchun klassik mexanikada u uzluksiz tarzda o‘zgaradi):

Ammo bu yerda, Plank gipotezasi tufayli, kvant harakatining minimal porsiyasi — kvantlangan harakat paydo bo‘ldi.

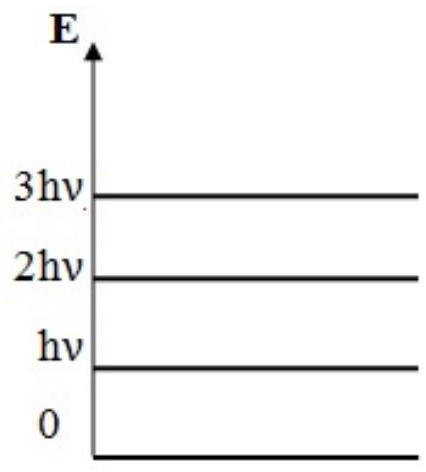


Рис. 5. Квантование энергии осциллятора

5-rasm. Osillyator energiyasining kvantlanishi

Гипотеза Планка противоречила законам классической физики.

1. В классической механике Ньютона и электродинамике Максвелла все величины меняются непрерывно и могут принимать сколь угодно малые значения.
2. Формула Планка не удовлетворяла классической теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы.

Для вычисления средней энергии осциллятора с учётом гипотезы Планка вместо (1.12) и (1.13) мы должны записать

и в выражении (1.16) непрерывное интегрирование следует заменить дискретной суммой:

Введём обозначение . Тогда получим для средней энергии

Plankning gipotezasi klassik fizikaning qonunlariga qarshi edi.

1. Klassik Nyufton mexanikasi va Maksvellning elektromagnit nazariyasida barcha kattaliklar uzluksiz o‘zgaradi va xohlagancha kichik qiymatlarni qabul qilishi mumkin.
2. Plank formulasi klassik teorema — energiyaning erkinlik darajalari bo‘yicha teng taqsimlanishi — ga mos kelmadi.

Plank gipotezasini hisobga olgan holda osillatörning o‘rtacha energiyasini hisoblash uchun (1.12) va (1.13) o‘rniga quyidagilarni yozishimiz kerak:

Va (1.16) ifodasida uzluksiz integralni diskret summaga almashtirish kerak:

Shu bilan birga, yangi belgini kiritaylik: . Shunday qilib, o‘rtacha energiya uchun quyidagicha ifoda olamiz:

В знаменателе формулы (1.27) стоит сумма бесконечно убывающей геометрической прогрессии

а выражение в скобке, содержащееся в числителе, есть производная от этой суммы

Поэтому средняя энергия осциллятора имеет вид

После подстановки в это выражение величины кванта энергии (1.26) получается формула Планка для средней энергии осциллятора

Formulaning (1.27) maxrajida cheksiz kamayuvchi geometrik progressiyaning yig’indisi joylashgan:

Yuqoridagi suratda joylashgan qavs ichidagi ifoda esa shu yig‘indining hosilasidir:

Shu sababli, osillatörning o‘rtacha energiyasi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

Bu ifodaga kvant energiyasining (1.26) dagi qiymatini qo‘yganimizda, osillatörning o‘rtacha energiyasi uchun Plank formulasi hosil bo‘ladi:

В отличие от классического выражения , средняя энергия осциллятора в квантовой теории зависит не только от температуры, но и от частоты. При этом число осцилляторов с данной частотой, так же как и в классическом случае, определяется формулой (1.11), т.е. структура формулы (1.19) осталась прежней, но изменилось выражение для средней энергии осциллятора: она оказывается неодинаковой для различных частот.

Теперь становится понятным, почему формула Рэлея-Джинса не согласовывалась с опытом в области высоких частот. При величина кванта энергии становится достаточно большой, и уже нельзя пренебрегать дискретностью порций энергии излучения.

Klassik ifodadan farqli o‘laroq, kvant nazariyasida osillatörning o‘rtacha energiyasi nafaqat haroratga, balki tebranish chastotasiga ham bog‘liq. Shu bilan birga, ma’lum chastotaga ega osillatörlar soni, xuddi klassik holatdagidek, (1.11)-formula bilan aniqlanadi. Ya’ni, (1.19)-formulaning tuzilishi o‘zgarishsiz qoldi, biroq osillatörning o‘rtacha energiyasi ifodasi o‘zgardi: u turli chastotalar uchun bir xil emasligi ma’lum bo‘ldi.

Endi esa, nima uchun Reley–Jins formulasi yuqori chastotalar sohasida tajriba natijalari bilan mos kelmaganini tushunish mumkin bo‘ladi. Agar bo‘lsa, kvant energiyasi yetarlicha katta bo‘ladi va nurlanish energiyasining porsiyalarining diskretligi e’tibordan chetda qoldirib bo‘lmaydi.

Из формулы Планка (1.22) вытекают законы теплового излучения.

1. Интегральная плотность излучения

Вводя новую переменную , получим

Учитывая, что

получаем следующее выражение:

откуда следует, что интегральная излучательная способность АЧТ

что совпадает с законом Стефана-Больцмана, установленным экспериментально Й. Стефаном в 1879 г. и теоретически выведенным Л. Больцманом в 1884 г. Таким образом, интегральная плотность энергии излучения (1.30), вычисленная на основе формулы Планка, оказывается конечной, т.е. «ультрафиолетовая катастрофа» устраняется. Кроме того, формула (1.31) позволяет вскрыть микроструктуру постоянной Стефана-Больцмана, содержащей мировые константы: постоянная Больцмана, скорость света и постоянная Планка.

Plank formulasi (1.22) dan issiqlik nurlanishining qonunlari kelib chiqadi.

1. Integral nurlanish zichligi:

Yangi o‘zgaruvchi kiritilsa quyidagiga ega bo‘lamiz:

Quyidagilarni hisobga olgan holda:

quyidagi ifoda hosil bo‘ladi:

Shundan kelib chiqadiki, absolut qora jismning integral nurlanish qobiliyati:

Bu ifoda 1879-yilda Y. Stefan tomonidan tajriba asosida, 1884-yilda esa L. Boltsman tomonidan nazariy jihatdan keltirib chiqarilgan Stefan–Boltsman qonuni bilan mos keladi. Demak, Plank formulasi asosida hisoblangan nurlanish energiyasining integral zichligi (1.30) chekli qiymatga ega bo‘ladi, ya’ni “ultrabinafsha halokat” (ultraviolet catastrophe) bartaraf etiladi. Bundan tashqari, (1.31)-formula Stefan–Boltsman doimisining mikrostrukturasi, ya’ni u tarkibiga kiruvchi umumiy fizik doimiylarni – Boltsman doimisi, yorug‘lik tezligi va Plank doimisini – ochib beradi.  
2) Формула Планка позволяет получить закон смещения Вина (1893 г.): при возрастании температуры максимум плотности энергии излучения сдвигается в область коротких длин волн

где b - постоянная Вина, - длина волны, соответствующая максимуму в распределении энергии по длинам волн.

Для получения этого закона следует формулу Планка записать для длин волн, учитывая соотношение

связь между длиной волны и частотой электромагнитных волн а также формулу

Тогда распределение энергии по длинам волн будет иметь вид

Используя условие экстремума

и вводя переменную , можно получить трансцендентное уравнение

Его решением является

Поэтому , откуда следует формула, совпадающая с законом смещения Вина,

2) Plank formulasi Vin siljish qonunini (1893-yil) hosil qilishga imkon beradi: harorat ortishi bilan nurlanish energiyasi zichligining maksimumi qisqa to‘lqin uzunliklari sohasiga siljiydi:

bu yerda b — Vina doimiysi, — energiyaning to‘lqin uzunliklari bo‘yicha taqsimotidagi maksimumga mos keluvchi to‘lqin uzunligi. Ushbu qonunni olish uchun Plank formulasini to‘lqin uzunliklari uchun qayta yozish zarur, bunda quyidagi munosabatlar hisobga olinadi:

elektromagnit to‘lqinlarning to‘lqin uzunligi bilan chastotasi o‘rtasidagi bog‘lanish,

shuningdek:

Shunda energiyaning to‘lqin uzunliklari bo‘yicha taqsimoti quyidagicha bo‘ladi:

Ekstremum shartidan foydalanib:

va yangi o‘zgaruvchi kiritib:

quyidagi transsendental tenglamani olish mumkin:

Uning yechimi:

Shuning uchun:

bundan Vin siljish qonuniga mos keluvchi formula hosil bo‘ladi:

Формула Планка не только позволила полностью описать экспериментально наблюдаемое распределение энергии в спектре АЧТ, её появление означало рождение новой, квантовой, эпохи. «В тот самый день величественное и грандиозное здание классической физики было потрясено до самого основания, хотя никто тогда ещё не отдавал себе ясного отчёта в этом. В истории науки не было

подземных толчков, сравнимых по силе с этим», - писал де Бройль в книге «Революция в физике».

Plank formulasi nafaqat tajriba yo‘li bilan kuzatilgan AChT (absolyut qora jism) spektrida energiyaning taqsimotini to‘liq tasvirlashga imkon berdi, balki uning paydo bo‘lishi yangi — kvant davrining tug‘ilganini anglatar edi. “Aynan o‘sha kuni klassik fizikaning ulug‘vor va muhtasham binosi tubidan larzaga keldi, garchi o‘sha paytda hech kim bu holatni aniq anglab yetmagan bo‘lsa-da. Fan tarixida bu voqea bilan kuch jihatdan teng bo‘lgan yer osti silkinishlariga tenglashadigan boshqa hech narsa bo‘lmagan”, — deb yozgan edi de Broyl “Fizikadagi inqilob” nomli kitobida.

На церемонии вручения Планку Нобелевской премии член Шведской королевской академии наук А.Г. Экстранд отметил, что «теория излучения Планка самая яркая из путеводных звёзд современного физического исследования, и пройдёт, насколько можно судить, ещё немало времени, прежде чем иссякнут сокровища, которые были добыты его гением».

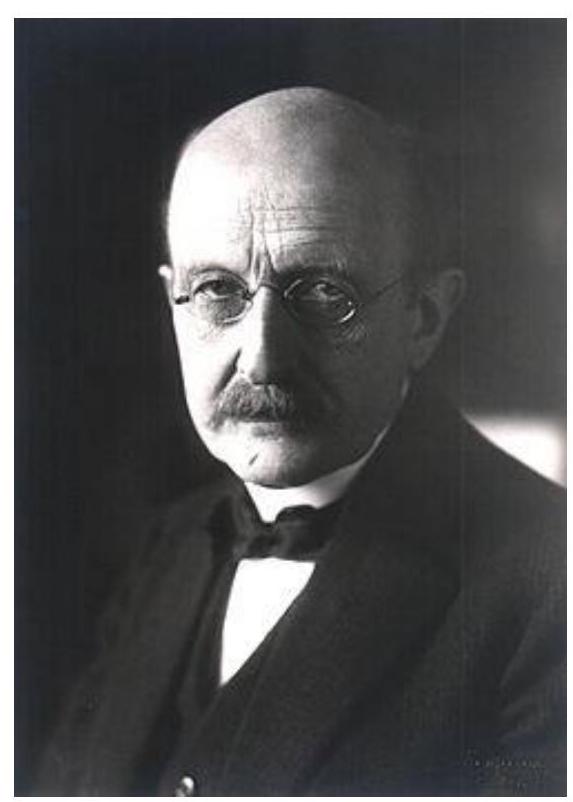
Plankka Nobel mukofoti topshirish marosimida Shvetsiya Qirollik Fanlar akademiyasi a’zosi A.G. Ekstrand shunday ta’kidlagan edi: “Plankning nurlanish nazariyasi zamonaviy fizik tadqiqotlarining eng yorqin yo‘lko‘rsatuvchi yulduzlaridan biridir va uning dahosi orqali topilgan boyliklar tugab bitguncha, hozircha ko‘p vaqt o‘tadi, deb hisoblash mumkin.”

При построении теории равновесного теплового излучения Планк предполагал, что квантовый характер взаимодействия излучения с веществом обусловлен свойством процесса излучения, но природа самого электромагнитного излучения остаётся непрерывной. Можно провести такую параллель: водичку мы пьём отдельными глотками (квантами), но имеющаяся в стакане (или в бутылке) вода может быть представлена любым количеством жидкости. Тем самым Планк пытался примирить квантовую теорию с волновой теорией излучения. Однако дальнейшее развитие физики показало, что и само электромагнитное поле имеет дискретную природу.

Muvozanatdagi issiqlik nurlanishi nazariyasini yaratishda Plank nurlanishning modda bilan o‘zaro ta’sirining kvant xarakteri — bu nurlanish jarayonining xossasi deb faraz qilgan, biroq elektromagnit nurlanishning o‘zi esa uzluksiz tabiatga ega deb hisoblagan. Buni quyidagi o‘xshatish bilan ifodalash mumkin: biz suvni alohida yutumlar (kvantlar) bilan ichamiz, biroq stakandagi (yoki butilkadagi) suv istalgan miqdorda suyuqlik sifatida mavjud bo‘lishi mumkin. Shunday qilib, Plank kvant nazariyasini nurlanishning to‘lqin nazariyasi bilan murosaga keltirishga harakat qilgan. Biroq fizikaning keyingi rivojlanishi shuni ko‘rsatdiki, elektromagnit maydonning o‘zi ham diskret (ya’ni uzluksiz emas) tabiatga ega.

Спустя 5 лет после формулировки своей квантовой гипотезы, Макс Планк писал, что предположение о существовании элементарного кванта электричества «прокладывает мост к существованию энергетического элементарного кванта , тем более, что того же порядка, что ( - элементарный квант электричества, с - скорость света)». Это было прямым указанием на фундаментальную роль новой константы.

Kvant gipotezasini ilgari surganidan 5 yil o‘tib, Maks Plank elektr energiyasining elementar kvanti mavjudligini taxmin qilish haqida shunday yozgan: bu taxmin “energiyaning elementar kvanti h mavjudligiga yo‘l ochadi, ayniqsa kattaligi tartibida bo‘lsa (bu yerda — elektr energiyasining elementar kvanti, c — yorug‘lik tezligi)”. Bu esa yangi doimiy kattalik — Plank doimiysining fundamental ahamiyatga ega ekanligiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ishora edi.



**7. Макс Планк**

(1858-1947)  
Выдающийся немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой теории.  
Научные труды посвящены термодинамике, теории теплового излучения, квантовой теории, теории относительности, оптике.  
Ввёл гипотезу о квантах энергии атомных осцилляторов и постоянную с размерностью действия.  
В 1918 г. удостоен Нобелевской премии за открытие квантов энергии.  
Член многих академий наук мира.  
С 1929 года Немецкое физическое общество вручает медаль имени Макса Планка за достижения в теоретической физике. Сам Планк стал первым её обладателем.  
В 1948 г. научными институтами Германии создано Общество Макса Планка.  
Великолепный пианист и увлечённый альпинист.  
«Коротко и сжато я могу все дело назвать актом отчаяния (Akt der Verzweiflung). Потому что по природе я миролюбив и не расположен к рискованным приключениям... Теоретическое объяснение должно быть найдено любой ценой и никакая цена не была бы слишком высока».  
«Я попытался каким-то способом ввести h в рамки классической теории. Однако, вопреки всем попыткам, эта величина оказалась весьма строптивой... В том или ином месте возникала зияющая трещина... Провал всех попыток перекинуть мост через эту пропасть вскоре не оставил более никаких сомнений в том, что квант действия играет фундаментальную роль в атомной физике, и с его появлением в физической науке наступила новая эпоха, ибо в нём заложено нечто, до того времени неслыханное, что призвано радикально преобразить наше физическое мышление, построенное на понятии непрерывности всех причинных связей с тех самых пор, как Ньютоном и Лейбницем было создано исчисление бесконечно малых».

**7. Maks Plank**

(1858–1947)

Yirik nemis nazariyotchi fizigi, kvant nazariyasining asoschisi. Ilmiy ishlari termodinamika, issiqlik nurlanishi nazariyasi, kvant nazariyasi, nisbiylik nazariyasi va optikaga bag‘ishlangan.

U atom osillátorlarining energiya kvantlari haqidagi gipotezani va o‘lchov birligi “harakat” bo‘lgan doimiy kattaligini (Plank doimiysi) kiritgan.

1918-yilda energiya kvantlarini kashf etgani uchun Nobel mukofoti bilan taqdirlangan.

Dunyo ilmiy akademiyalarining ko‘plab a’zosi bo‘lgan.

1929-yildan boshlab Germaniya fiziklar jamiyati Maks Plank nomidagi medalni nazariy fizika sohasidagi yutuqlar uchun topshira boshladi. Birinchi bo‘lib bu mukofotni Plankning o‘zi olgan.

1948-yilda Germaniyaning ilmiy institutlari tomonidan Maks Plank jamiyati tashkil etilgan.

U mohir pianinochi va alpinizmga ishtiyoqmand bo‘lgan.

«Qisqa va lo‘nda aytadigan bo‘lsam, men bu ishni umidsizlik harakati (Akt der Verzweiflung) deb atayman. Chunki tabiatimdan men tinchliksevarman va tavakkalchiliklarga moyil emasman… Teoretik tushuntirish har qanday narx evaziga topilishi kerak edi va hech qanday narx buning uchun juda yuqori bo‘lishi mumkin emas edi.»

«Men qanday bo‘lmasin, h kattaligini klassik nazariya doirasiga kiritishga harakat qildim. Biroq barcha urinishlarga qaramay, bu kattalik o‘zini juda qiyin tutdi… Har doim bir joyda yirik yoriq hosil bo‘lardi… Bu jarlik ustidan ko‘prik qurish bo‘yicha barcha urinishlar muvaffaqiyatsiz tugagach, harakat kvanti atom fizikasi uchun fundamental rol o‘ynashi shubhasiz ekanligi ayon bo‘ldi. Uning paydo bo‘lishi bilan fizikada yangi davr boshlandi, chunki bu kattalikda ilgari eshitilmagan, bizning fizik tafakkurimizni tubdan o‘zgartirishga qodir narsa mujassam edi. Bu tafakkur esa Nyuton va Leybnits tomonidan differensial hisob kiritilganidan beri uzluksizlikka asoslangan sabab-oqibat bog‘liqligiga tayangan edi.»