

Основи квантне физике

Милош Адамовић

Момир Арсенијевић

- Електрицитет и магнетизам као природне појаве, одувек су привлачили пажњу људи, а посебно научника. Интересовање за ове природне појаве кулминирало је у 19. веку формулисањем Максвелове теорије електромагнетизма, формално исказаним кроз Максвелове једначине.
- Улога Максвелових једначина је да опишу електромагнетно поље и његову интеракцију са супстанцијом. Почетком 20. века, појавио се проблем у вези са објашњењем зрачења апсолутно црног тела (АЦТ) као проблема класичне физике: и то са аспекта класичне електродинамике као и класичне термодинамике равнотежних процеса.
- Физички систем од интереса у проблему АЦТ је електромагнетно поље у термодинамичкој равнотежи са зидовима шупљине. Из класичне електродинамике је познато да вектори електричног поља и магнетне индукције задовољавају одговарајуће **таласне једначине**. Другим речима, промене електричног и магнетног поља су такве да се могу описати тригонометријским функцијама (синусним или косинусним), тј. у питању су осцилаторне промене. То нас, по аналогiji, води на линеарни хармонијски осцилатор као основни физички систем чије је кретање описано поменутиим функцијама. Хоће се рећи да се може остварити **енергијска еквиваленција** између скупа осцилатора (чије фреквенције

могу бити од нуле до бесконачности) и термодинамички равнотежног електромагнетног поља у шупљини. Последица те еквиваленције је познати Рејли-Џинсов закон који говори о енергијском садржају ЕМ поља у интервалу фреквенција $(\omega, \omega + d\omega)$ на температури T , у јединици запремине шупљине што је тзв. спектрална густина, $u(\omega, T)$. Математички, резултат је дат изразом:

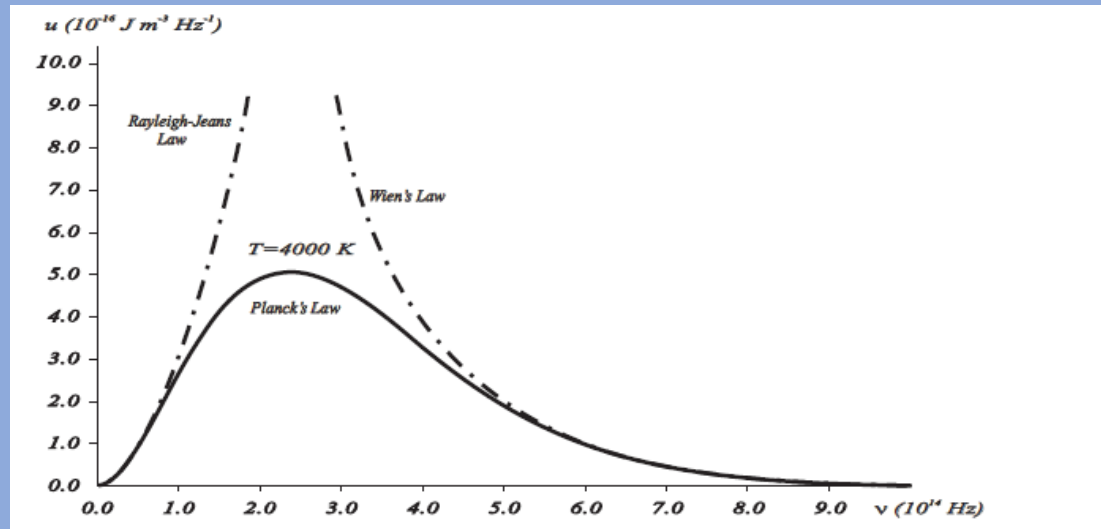
$$u(\omega, T)d\omega = kT \left(\frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \right) d\omega,$$

где је k Болцманова константа, c брзина светлости а $d\omega$ представља инфинитезимални интервал фреквенција. Испоставило се да је оваква законитост коректна за мале фреквенције. Са друге стране, Вин је, експериментално, за велике фреквенције нашао следећу законитост:

$$u(\omega, T)d\omega = \omega^3 e^{-\hbar\omega/kT} d\omega,$$

где је \hbar експериментално нађена константа са вредношћу $\frac{h}{2\pi} = 1.054 \times 10^{-34} Js$ док је константа h позната под називом Планкова константа са бројном вредношћу $h = 6.626 \times 10^{-34} Js$.

Експериментална мерења су показала да се спектрална густина понаша по кривој датој пуном линијом ($\omega = 2\pi\nu$), на Слици 1.



Слика 1

Класична физика предвиђа криву по Рејли-Џинсу, тј. не репродукује експерименталне налазе. Макс Планк је нашао излаз из ове ситуације постављајући **хипотезу** да су енергије осцилатора дате изразом

$$E_n = n\hbar\omega,$$

где је n цео број који се назива квантни број. Другим речима, енергије осцилатора могу узимати само дискретне вредности. Константа \hbar је иста она у изразу за спектралну густину коју је Вин експериментално добио. Последица Планкове хипотезе је да је сада спектрална густина дата изразом

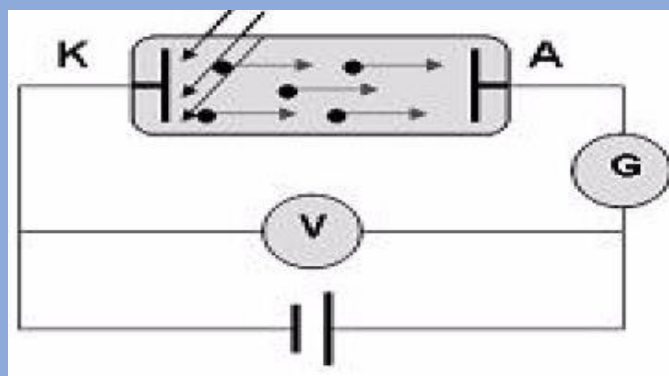
$$u(\omega, T)d\omega = \frac{\frac{\hbar\omega^2}{\pi^2 c^3}}{e^{\hbar\omega/kT} - 1} d\omega;$$

оно што је важно рећи је да овај израз репродукује горњу криву а за ниске фреквенције даје Рејли-Џинсову формулу, док за високе фреквенције следи Винова формула. И тиме је проблем АЦТ решен.

- Како се може оправдати Планкова хипотеза? Када су задаци физике у питању може се рећи да је један од најосновнијих наћи једначину кретања за физички систем од интереса. У класичној механици то је други Њутнов закон: $\vec{F} = m\vec{a}$. И то је један од постулата класичне механике. У квантној механици то је Шредингерова једначина (овде се нећемо давати њен експлицитни израз) која је такође постулат и говори о томе како се таласна функција система понаша. Таласна функција $\Psi(\vec{r}, t)$ је основни објекат од интереса у квантној механици и њеним познавањем може се закључивати о понашању квантног система. Испоставља се да се Планков

израз (хипотеза) добија решавањем Шредингерове једначине за линеарни хармонијски осцилатор. У општем случају $\Psi(\vec{r}, t)$ је комплексна функција чији је физички смисао у квадрату њене амплитуде $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ што води статистичком тумачењу (Макс Борн): квантна механика је инхерентно статистичка теорија по својој природи. $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ говори о вероватноћи да се квантна честица нађе негде у простору, у тачки са вектором положаја \vec{r} .

- Решење проблема АЦТ, који је био један од проблема где је класична физика била немоћна да пружи одговор, било је инспирација за решење проблема фотоефекта. Фотоефекат је појава индуковане емисије електрона из метала који је озрачен ултраљубичастом светлошћу. Типична експериментална поставка дата је на Слици 2.



Слика 2

Експерименталне чињенице везане за појаву фотоефекта:

- Број електрона зависи од интензитета зрачења,
- Енергија електрона не зависи од интензитета зрачења,
- Енергија електрона линеарно зависи од учестаности зрачења и
- Постоји нека минимална учестаност ν_0 (која зависи од физичких својстава катоде) испод које се електрони не појављују.

Ајнштајн је 1905. дао објашњење фотоефекта: монохроматска светлост (ЕМ поље) може се сматрати да је састављена од локализованих порција енергије $\hbar\omega$ а носиоци те енергије названи су фотони што је указивало на корпускуларну природу светлости. Дакле, једном фотону енергијски одговара један осцилатор фреквенције ω .

До тада је светлост била посматрана као таласни феномен: из класичне електродинимике било је познато да третирајући светлост као талас може се очекивати време у минутима (па и сатима) потребно да електрон буде побуђен и избачен из метала. Међутим, из експеримента је познато да је фотоефекат тренутан. То је указивало да је таласна слика светлости у оваквој физичкој ситуацији неадекватна. Са становишта метрологије није наодмет напоменути да се из фотоефекта може одредити вредност Планкове константе.

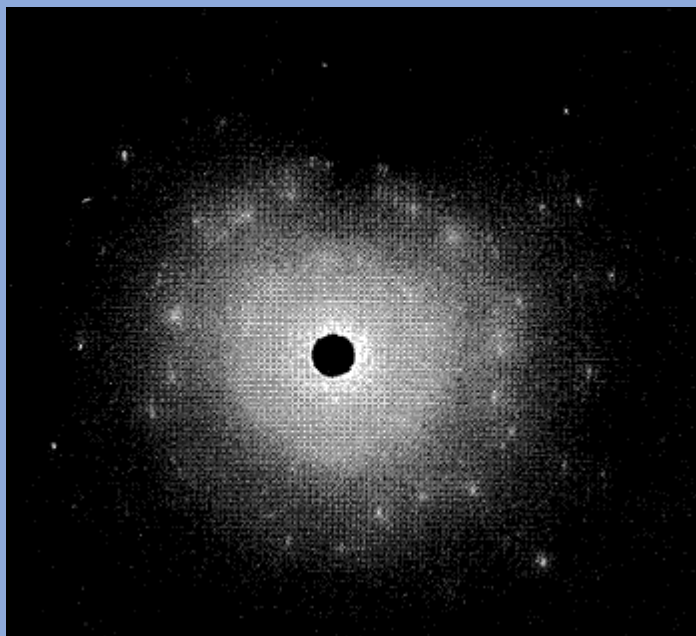
- Још један ефекат који је показао да закони класичне физике нису довољни да објасне појаве у микросвету био је тзв. Комптонов ефекат. То је појава да се светлост малих таласних дужина расејава на слободном електрону масе m_e и то тако да је таласна дужина фотона већа након расејања што је дато једнакошћу:

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{m_e c} \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = 2\lambda_c \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где је λ_c тзв. Комптонова таласна дужина, а θ је угао који расејани фотон заклапа са првобитним правцем кретања. Овај резултат је добијен под условом важења закона одржања енергије и импулса, што указује да је реч о изолованом систему. И то је карактеристика Шредингеровске квантне механике. Друга карактеристика је да је квантна механика нерелативистичка теорија. Релативистичка квантна физика тиче се физике елементарних честица, пре свега, и овде неће бити разматрана.

- Горњи закључци о томе да се о светлости, по класичној физици типично таласном феномену, може говорити као о честичној појави инспирисали су француског физичара Луја де Броја да постави питање: да ли објекти које класична физика категорично сматра као честице могу имати таласни аспект? Односно, да ли се и у таквим ситуацијама може говорити о таласно-

честичном дуализму? И опет, експеримент је потврдио овакву могућност. Дејвисон и Џермер су пропуштали сноп електрона кроз кристал (који је са својом периодичном структуром играо улогу дифракционе решетке) а на застору се је показала интерфернциона слика коју очекујемо, по резону класичне физике, за таласне феномене. Доња слика показује исход Дејвисон-Џермеровог експеримента.



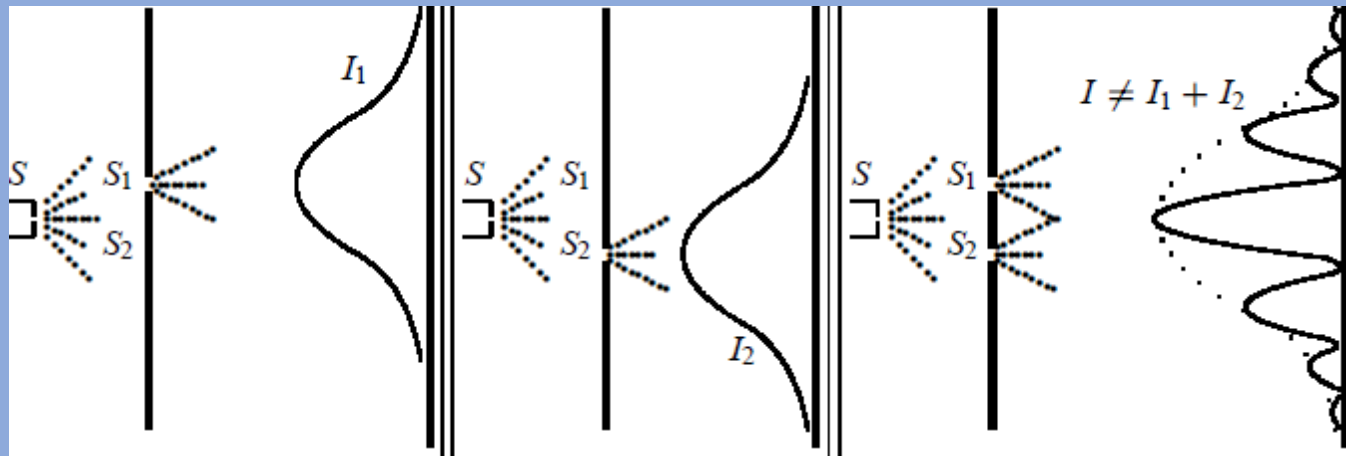
Слика 3

Де Број је предложио следећу релацију која повезује таласне и честичне аспекте квантног система:

$$\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$$

са тим да релација важи универзално за сву материју.

- У класичној механици, вектор положаја и импулса физичког система основни су концепти. Познавање ових варијабли значи и да је позната динамика система. Другим речима, ако су познати почетни вектор положаја и импулса и силе које делују на систем, једначина кретања (Други Њутнов закон) омогућава да динамика система једнозначно буде одређена у будућности. Да ли овакав детерминистички поглед на свет важи и у квантној физици?



Слика 4

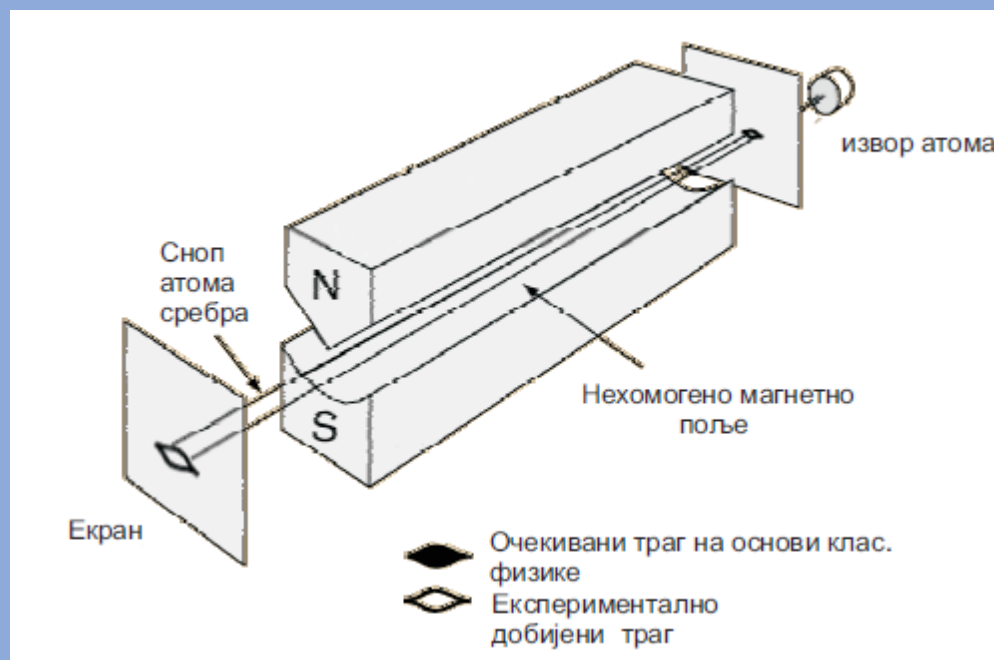
Слика 4 показује експеримент са два прореза а пропушта се снап електрона. Прво је отворен један прорез и детектује се интензитет I_1 на застору, а онда се отвори други прорез и детектује интензитет I_2 . Међутим, када су оба прореза отворена, на застору се детектује интерференциона слика која се не може свести на прост збир претходно поменутих интензитета I_1 и I_2 и отуда говори о таласном понашању електрона. Овакав експеримент је рађен и у верзији где се пропушта један по један електрон, а отворена су оба прореза. Опет је добијена интерференциона слика. Оно што долази као изненађење је то да ако се покуша праћење (рецимо уз помоћ извора светлости) електрона да би се

утврдило којом путањом се креће (тј. који је положај електрона), испоставља се да интерференциона слика нестаје. Ово је по класичној физици у потпуности неинтуитивно. Свет квантних физичких система је недетерминистички. Ово је била инспирација за Вернера Хајзенберга да постави питање да ли су неодређености координате положаја и импулса квантне честице независни као што је то случај у класичној физици. Анализа је показала да је супротно: што је боље познавање положаја честице у експерименту, лошије је познавање импулса и обратно. Производ неодређености поменутих величина, испоставило се, ограничен је одоздо вредношћу Планкове константе. Формални запис претходно реченог за замишљену једнодимензионалну квантну честицу гласи:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Овакав исход природно намеће питање какав је заправо статус варијабле у квантној механици. Испоставило се да је разлика на нивоу алгебре таква да у квантној механици важи $x p_x - p_x x \neq 0$ док је у класичној механици увек $x p_x - p_x x = 0$, када су у питању варијабле положаја и импулса класичне честице.

- Горе поменути експерименти нису једини који су указивали да зграда класичне физике није потпуна, али може се рећи да су најубедљивије показивали да су физици потребни нови концепти. Али, у историји квантне физике издваја се још један експеримент који је дао један потпуно неочекивани резултат. Тај експеримент је познат под именом Штерн-Герлахов експеримент.



Слика 5

Првобитна намера експеримента је била да докаже квантовање момента импулса електрона (тј. постојање дискретних вредности физичке величине од интереса), смештеног у последњој љусци атома сребра. Сноп атома сребра је пропуштан кроз јако нехомогено магнетно поље и атоми сребра су након проласка кроз поље падали на застор (видети Слику 5). Квантна механика је сугерисала да треба очекивати три тачке на застору на којима се атоми нагомилавају, док што се класичне физике тиче, очекује се просто нагомилавање атома сребра. Експеримент је показао да постоје само две тачке. Годсмит и Уленбек су дали интерпретацију експеримента: квантни системи поседују њима својствени степен слободе (тзв. унутрашњи степен слободе) који су назвали спин. Дакле, у питању је извесни **унутрашњи момент импулса** квантне честице.

- Нерелативистичка квантна механика је, историјски гледано, прво нашла примену у проблемима физике атома, физике молекула, физике кристала, на пример, где је показала да не греша и даје одличне бројне вредности. Међутим, стандардна квантна механика не обухвата ситуације где квантни систем трпи дисипацију, односно трење. Или, другим речима, ситуације где не важе закони одржања. Овакве ситуације не могу се описати горе поменутом Шредингеровом једначином као законом

кретања за квантни систем. Поменути системи називају се **отворени квантни системи** и за њих није познат општи закон кретања. Уочавање постојања отвореног система значи да постоји и окружење, те тако имамо два физичка система који интерагују. Показало се да интеракција води ка формирању квантних корелација које се не могу свести на класичне корелације које су последица важења закона одржања за целину систем + окружење. Штавише, испоставља се да су поменуте квантне корелације ресурси за квантне технологије и квантно рачунарство. Ове теме спадају у **савремене истраживачке теме** нерелативистичке квантне физике.

- Неки корисни материјали
 - ✚ The Quantum Mechanics Visualization Project, <https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/index.html>
 - ✚ Phet Simulations, Quantum Phenomena, <https://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics/quantum-phenomena>
 - ✚ Online предавања, Khan Academy, Quantum Physics, <https://www.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics>.
 - ✚ <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quacon.html#quacon>
 - ✚ <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qmech/lectures/>
 - ✚ Nenad Simonović, Darko Kapor, Kvantna mehanika 1, prvo poglavlje - Uvod, <http://mail.ipb.ac.rs/~simonovic/km1-g1.pdf>
 - ✚ David McMahon, Quantum Mechanics Demysti_ed, [http://index-of.co.uk/Misc/McGraw-Hill%20%20Quantum%20Mechanics%20Demystified%20\(2006\).pdf](http://index-of.co.uk/Misc/McGraw-Hill%20%20Quantum%20Mechanics%20Demystified%20(2006).pdf)