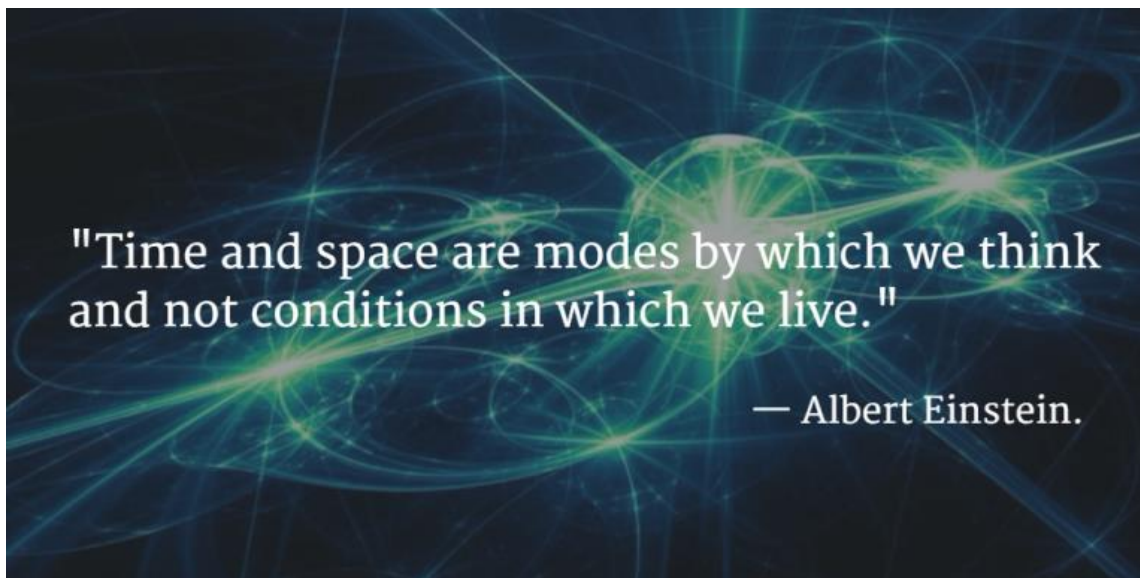


Квантова физика

Проф. П. Райчев

Кл. Тютюлков



Времето и пространството са неща, за които си мислим, а не условия, при които живеем

А. Айнщайн

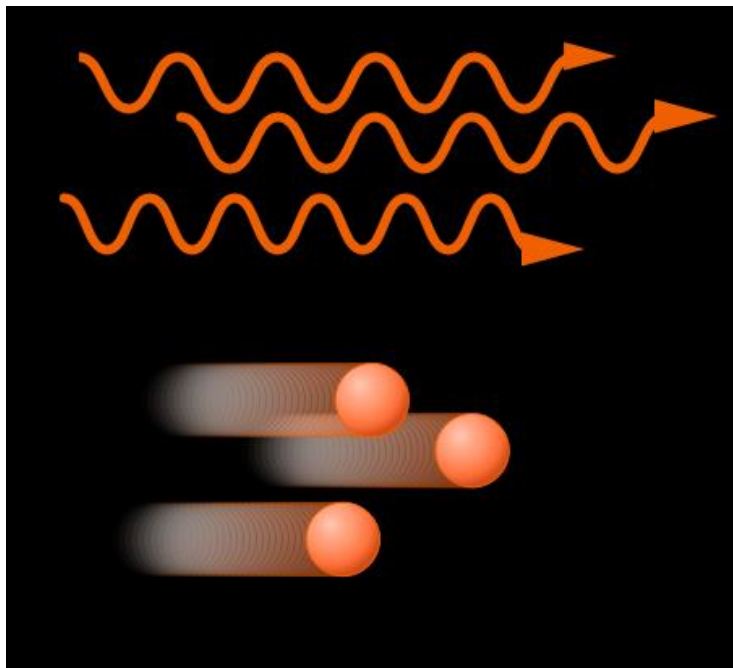
Квантовата физика изучава законите, на които се подчиняват микрообектите или с други думи обектите, които принадлежат на т.нар. *микросвят*. Това са молекулите, атомите, атомните ядра и съставлящите ги частици. Квантовите закони се отличават от законите, на които се подчиняват заобикалящите ни тела, които виждаме с очите си. Тези тела образуват т.нар. *макросвят*. Ние сме в непрекъснат контакт с *макросвета* и нашите представи за него се формират от нашите ежедневни, и в повечето случаи, непреднамерени наблюдения върху него.

Ежедневният опит и формираните от него нагледни представи не са пригодени за разбирането на свойствата на микросвета. Поради това, в този случай, трябва да се доверяваме повече на експериментите и логичното мислене, отколкото на нагледните представи.

Квантовите закономерности намират приложение не само при изучаването на най-малките частици на материята. Те се използват и за да се разберат структурата и свойствата на обекти, съставени от огромно количество *микрообекти* каквито са например твърдите тела, течностите и т.н. Без тяхното използване би било невъзможно създаването например на полупроводниците, микрочиповете, лазерите и множество уреди, без които не можем да си представим нашия съвременен свят. (Съгласно оценката на специалистите една четвърт от брутния национален продукт на САЩ се създава от приложението на квантовата механика. А квантовата механика бе изградена от една малка група от 20 - 30 физици в годините след Първата световна война!).

Общи понятия и хипотеза за квантите

Думите *вълна* и *частица* се употребяват както в разговорния език, така и във физиката. Поради това е необходимо да уточним смисъла, който ще вложим в тях при физичните разглеждания.

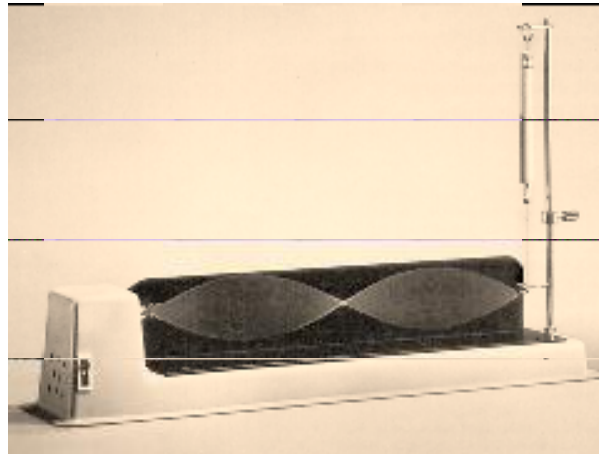


Частици и вълни. Когато говорим за *частица*, ние подразбираме *малко късче от веществото, което във всеки момент заема точно определено положение в пространството и притежава точно определена скорост*. Частицата се движи по определени линии, наречени *траектории*. Когато две частици се срещнат, те се удрят и се разлитат в различни посоки. За случая на макрочастиците тези свойства са очевидни и даже не се формулират специално. Така например, ние не можем нагледно да си представим късче от веществото, което се намира едновременно на няколко места в пространството, или което в един и същ момент притежава няколко различни скорости!

Изглежда очевидно, че когато започнем да разделяме на части едно късче от вещество, например едно камъче, ще получаваме все по-малки частици, които имат описаните по-горе свойства. При този процес на делене обаче, скоро ще достигнем до обекти, които са съставени от няколко атома или молекули или дори от отделни атоми. Поради това може да ни си стори, че атомите и даже техните съставни части могат да се разглеждат като *малки топчета*, и че те притежават всички свойства на обикновените частици. Както обаче ще видим по-късно това съвсем не е така.

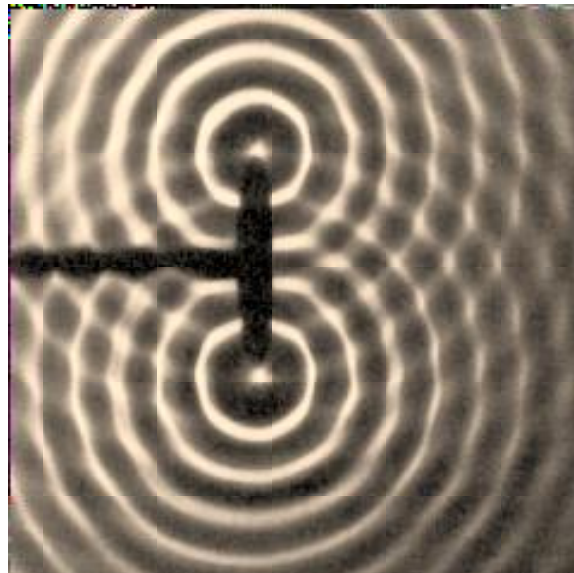
Другата често употребявана дума е *вълна*. Вълната е *процес на разпространение на трептене, процес който се простира в цялото пространство (или в достатъчно голяма област от него)*. В зависимост от това каква е физичната величина, която се изменя при разпространението на трептенията, наблюдаваме вълни с различна физична природа. Така например, ако се изменя нивото на водната повърхност, говорим за водна вълна, ако се изменя интензитетът на електричното и индукцията на магнитното поле — говорим за електромагнитна вълна.

Независимо от конкретната им природа (водна вълна, вълна и т.н.), всички вълни имат общи свойства. Вълните се характеризират с величини като дължина на вълната λ , честота ν , кръгова честота ω и др.



Трептяща струна

Техните най-характерни свойства са, че могат да заобикалят срещнатите по пътя си прегради (да *дифрактират*) и да се наслагат (да *интерферира*т), като дават вълна с нова „форма“. Вълната е разпростряна в определена достатъчно голяма област на пространството.



Интерференция на водни вълни

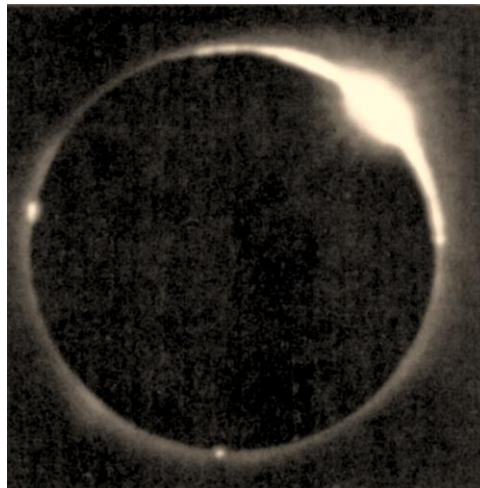
Да се говори за вълна в една единствена точка на пространството е логически също толкова безсмислено, колкото и да се говори за „частица“, която е едновременно навсякъде в пространството.

От казаното е ясно, че обектите „вълна“ и „частица“ са коренно различни и ако разглеждаме например светлината като вълна, тя не може да бъде разглеждана като поток от частици. Понятията вълна и частица като че ли се изключват взаимно. И наистина, докато частицата е късче вещество, вълната е *процес*. Частицата има определено място в

пространството, а вълната е разлята навсякъде. Частиците се движат по траектории и могат да бъдат спирани от срещнатите по пътя им прегради, докато при вълните понятието траектория няма смисъл, тъй като те са способни да дифрактират. Когато две частици се срещнат те се удрят и се разлитат по нови траектории, докато „срещата“ на две вълни предизвиква тяхното „припокриване“, т.е. интерференция. Обаче опитите са показали, че това „противопоставяне“ на понятията вълна и частица, макар да изглежда очевидно, не е точно – градивните частици на *микросвета* в известни случаи притежават някои свойства на вълни, а в други случаи се проявяват като частици. Тъй като изглежда очевидно, че в *макросвета* едно и също нещо не може да бъде и вълна и частица едновременно, трябва да приемем, че микрочастиците са *качествено нов обект, за който ние нямаме нагледна представа. Тези обекти се подчиняват на нови закономерности, непознати в света на големите тела.*

Излъчване на абсолютно черното тяло

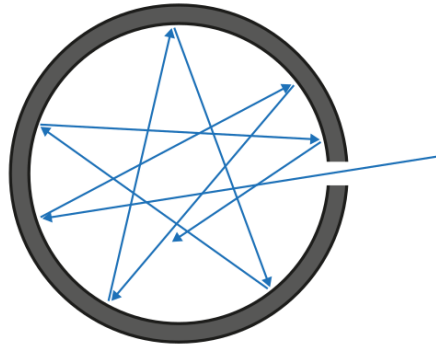
Революционните изменения във физиката, които настъпиха в началото на 20 в. водят началото си от изучаването на едно явление, което изглежда твърде елементарно и даже доста скучно. Това е излъчването на т.нар. *абсолютно черно тяло*. (*Абсолютно черно се нарича тялото, което поглъща цялото паднало върху него електромагнитно лъчение*). Не бива да се мисли, че абсолютно черното тяло (АЧТ) изглежда наистина „черно“. Абсолютно черно тяло е например Слънцето -- всяко попаднало върху него лъчение се поглъща напълно, без дори една нищожна част да се отрази от неговата повърхност. Слънцето обаче свети, при това извънредно ярко. Няма ли тук някакво противоречие? Противоречие няма. Работата е в това, че *абсолютно черното тяло*, не само поглъща лъчението, но е способно и да излъчва, като излъчената от него енергия зависи от неговата температура.



Интересът към излъчването на АЧТ възниква още в средата на 19 в. и той се дължи на обстоятелството, че всяко произволно тяло поглъща (макар и само частично) попадналото върху него лъчение. Същевременно това тяло е способно и да излъчва електромагнитна енергия. Оказва се че отношението на излъчвателната към поглъщателната способност на произволно тяло е равна на излъчвателната способност на АЧТ (Закон на Кирхоф). Именно това прави изучаването на излъчването на абсолютно черното тяло твърде важно за редица клонове на светотехниката.

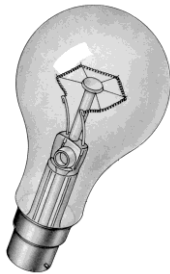
Опитно излъчването на АЧТ може да се изучи сравнително лесно, тъй като сравнително лесно може да се изработи „модел“ на такова тяло. Да си представим една

кухина, в която е направен малък отвор, както това е показано на фигурата и да предположим че стените на кухнята се поддържат при постоянна температура. От фигурата се вижда, че всеки електромагнитен лъч попаднал върху отвора на кухнята ще претърпи многократно отражение от нейните стени и в края на краищата ще се погълне от тях.



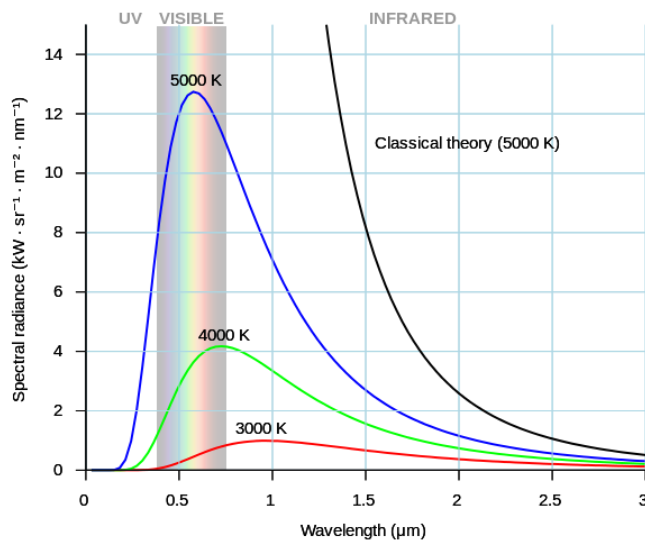
Модел на АЧТ

В такъв смисъл отворът представлява едно абсолютно черно тяло. От друга страна стените на кухнята, подобно на всички нагreti тела излъчват електромагнитна енергия и една част от нея ще излиза през отвора. Излизащото от там лъчение може да се разглежда като излъчване на абсолютно черно тяло.



Пример: Ако свържем електрическа крушка през реостат, с увеличаване на тока през нея се изменя не само яркостта, но и цветът, с който тя свети. При по-малък ток крушката свети червено, при по-силен – жълто. Температурата на нажежаемата нишка, в крушката зависи от големината на тока и следователно при по-висока температура интензитетът на електромагнитните вълни с по-малка дължина на вълната се увеличава.

С подобни модели свойствата на лъчението на АЧТ са били изучени експериментално твърде отдавна. Излъчената за единица време енергия зависи от дължината на вълната на лъчението. На фигурата по-долу е показана тази зависимост на при няколко различни температури на тялото.



Колкото по-висока е температурата на тялото, толкова по-голяма е общата енергия, която то излъчва. Стойността на енергията е пропорционална на площта под съответната крива

Опит за теоретично обяснение на спектъра на излъчване на абсолютно черно тяло прави лорд Рейли. Той прилага електромагнитната теория за светлината. Получените резултати, обаче показват, че според тази теория, с намаляване на дължината на вълната интензитетът на излъчване трябва много силно да нараства. Последното е в противоречие с опитните данни и е получило името „ултравиолетова“ катастрофа.

Спектър на абсолютно черното тяло при различни температури

Вижда се че енергията излъчена за единица време зависи от дължината на вълната, като достига максимум при някаква определена дължина на вълната. С увеличаване на температурата този максимум се премества към областта на по-късите вълни. През последната четвърт на 19в. век учените започват да се интересуват може ли енергията на светлината да се преобразува в друг вид енергия. Това дава тласък на изследванията в тази област. През 1879 Йозеф Стефан, австрийски учен формулира следния експериментално установен закон за излъчването на абсолютно черно тяло. Мощността на топлинното излъчване на абсолютно черно тяло е пропорционална на излъчващата повърхност на тялото и на четвъртата степен на абсолютната температура: $P = \varepsilon \sigma T^4$, където σ е константата на Стефан и има стойност $\approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$, а ε – т.нар. *излъчвателна способност*. В зависимост от вида на излъчващата повърхност ε може да заема стойности от 0 до 1.

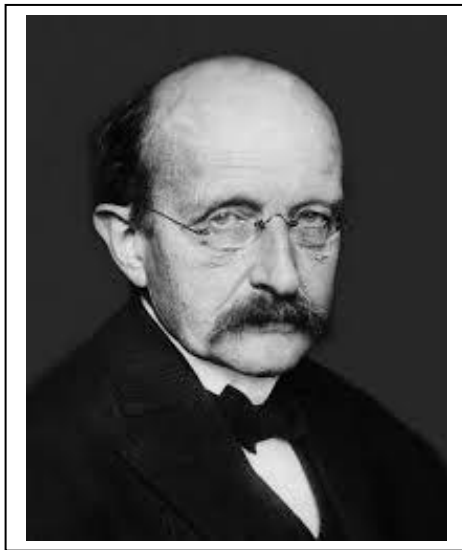
Установено е, че абсолютно черното тяло поглъща светлината от цялата видима област, инфрачервените и ултравиолетовите лъчи. При нагряване обаче до определена температура, излъчва само в определена спектрална област. Първоначално изпуска лъчение само в инфрачервената област. По-нататък се нагрява до червено, при още по-високи температури цветът му става синкаво бял. С други думи, при по-висока температура, започват да се излъчват вълни с по-малка дължина на вълната. През 1893г., германският учен В. Вин установява, че произведението от абсолютната температура и дължината на вълната, на която се пада максимално излъчване при тази температура е константа: $\lambda_{\text{max}} T^4 = \text{const.}$

На теоретиците била поставена задачата да обяснят тези особености на излъчването на абсолютно черното тяло. Тогава станало ясно, че последователното прилагане на

електромагнитната представа за светлината и на теорията за топлината (термодинамиката) не са в състояние да обяснят резултатите от опитите. Нещо повече – резултатите, получени по теоретичен път били в рязко противоречие с наблюденията. Така например, от теоретичните изследвания следвало, че телата трябва непрекъснато да излъчват (и заедно с това да изстиват), докато цялата им вътрешна енергия се излъчи във вид на електромагнитно лъчение, а самите тела изстинат до абсолютната нула. Това станало повод да се говори за т.нар. „Топлинна смърт“ на Вселената, при която тя трябва да изстине до абсолютната нула, а цялата налична енергия във Вселената да се превърне в електромагнитно лъчение.

Тогава станало ясно, че този парадокс може да се избегне, ако се приеме, че електромагнитното излъчване се подчинява на други закони, наречени *квантови закони*.

Хипотеза за квантите



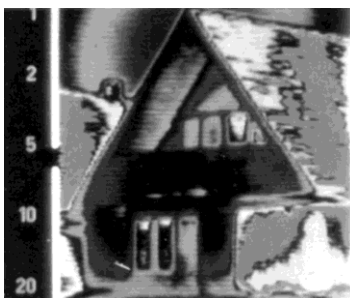
За пръв път науката се сблъсква с квантовите закономерности през 1900 година. Тогава немският учен Макс Планк, изучавайки законите за топлинното излъчване на телата, подобно на други физици преди него, стига до извода, че тези закони не могат да бъдат обяснени, ако се използват представите на т.нар. класическа физика, която обяснява свойствата на макросвета. За да обясни топлинното излъчване на телата, Планк изказва хипотезата, че *електромагнитното лъчение*, което притежава всички свойства на вълните, може да се излъчва само на *определени порции*, които той нарича *кванти*. Енергията ε , която притежава квантът на електромагнитното лъчение с честота ν (по-удобно е да се използва величината *кръгова честота* – ω , като $\omega = 2\pi \nu$) е:

$$\varepsilon = h \cdot \nu,$$

където h е константа, наречена константа на Планк. Нейната числена стойност, определена от опитите по топлинното излъчване на телата е $h = 6.62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$

Хипотезата на Планк изглежда вътрешно противоречива. Ако електромагнитното лъчение представлява вълна, простряна върху голяма пространствена област, то как е възможно тази вълна да се погълне мигновено от точката, където става поглъщането? Ако пък разглеждаме електромагнитното лъчение като поток от някакви особени частици, то как да обясним неговата способност да дифрактира и интерферира?

Огромен брой опити, извършени с микрообектите показали, че хипотезата на Планк е вярна. Нещо повече, по-късно е установено, че енергията на *всички микрообекти* се изменя с определени „порции“ (т.е на „скокове“), както и това, че микрообектите в *някои случаи приличат на вълни, а в други – на частици*. Законите, на които се подчиняват микрообектите се наричат *квантови закони*, а този дял на физиката, който се занимава с тяхното изучаване е известен като *квантова физика*.



Всяко тяло, например една сграда, през зимата губи енергия поради няколко причини: топлопроводност, конвекция и излъчване. За намаляване на топлинните разходи по възможност всички загуби трябва да се намалят. Топлопроводността се намалява с подходящи изолационни материали, което, от своя страна, води до намаляване и на загубите поради конвекция. За намаляване на загубите от излъчване може да се използват покрития с голяма отражателна способност.

Въпроси и задачи:

1. Какво наричаме частица в класическата механика ?
Отг. Частицата има точно определено положение в пространството (координата) и строго определена скорост.
 2. Дали атомите имат всички свойства на веществените частици?
Отг. Това не е очевидно! Атомите и атомните частици имат по-особени свойства, които не можем да си представим нагледно.
 3. Какво представлява вълната в класическата физика?
Отг. Вълната винаги се простира в сравнително широка пространствена област.
 4. Може ли един обект да бъде едновременно и вълна и частица?
Отг. Ако обекта принадлежи към макрокосмоса това не е възможно. Молекулите, атомите и съставлящите ги частици се наричат микрочастици. Микрочастиците се отличават от макрочастиците! Те проявяват свойства присъщи и на макрочастиците и на макровълните. Свойствата на микрочастиците се описват от особени закони, наречени квантови закони.
- - - - -
5. Защо се казва, че хипотезата на Планк прави революция във физичната наука?
 6. Съществуват материали – например тънко фолио, едната страна на които има висока поглъщателна способност, а другата висока отражателна способност. По какъв начин трябва да се покрие къща с такъв материал, в зависимост от това дали се намира в гореща или в студена област?
 7. Малките водни капчици имат способността да отразяват инфрачервеното лъчение. Защо, когато през нощта е облачно, при еднакви други условия, на следващата сутрин е по-топло, отколкото след ясна нощ?
 8. За съхраняване на продукти, при малки изменения на температурата им, се използват съдове с двойни стени, от които е изтеглен въздухът – термоси. Каква роля играе тънкият метален слой, с който те са покрити?

9. Слънцето излъчва най-интензивно светлина с дължина на вълната 500nm. Каква температура за повърхността му ще получим, ако го приемем за абсолютно черно тяло?
10. Температурата на човешкото тяло е около 37°C. Пресметнете λ_{max} , която то излъчва, при допускането, че то представлява абсолютно черно тяло.
(Забележка: Ако искаме да установим, колко енергия ще погълне или ще излъчи едно тяло с температура T за единица време (1s), когато се намира в среда с температура T_0 , използваме зависимостта: $P - P_0 = \varepsilon \sigma S(T^4 - T_0^4)$, S е площта на тялото.)
11. Колко енергия за секунда ще губи човек (или все едно -- с каква мощност ще излъчва) при температури -10°C, -5°C, 0°C, ..., 25°C? Пресметнете, нанесете данните в таблица и върху координатна система. Излъчвателната способност на човешкото тяло е приблизително единица, а повърхността на кожата на възрастен човек е 1,5 m².
Забележка: Дрехите силно намаляват излъчвателната способност, така че загубите на енергия са значително по-малки.
12. Горната задача представлява пример за извършване на по-голям брой еднотипни пресмятания. В такива случаи е удачно използването на компютърни програми. Може да се използват готови *електронни таблици* или самостоятелно написани програми за решаването на конкретната задача. Ако сте достатъчно напреднали в програмирането, напишете програма за решаване на задачата.
13. На фигурата е показан спектърът на излъчване на абсолютно черно тяло, с температура на повърхността колкото тази на Слънцето. Освен това са показани и отчетените стойности за интензитета на лъчението, на морското равнище, съответно при ясно и при облачно време. (Различните вещества поглъщат различни дължини на вълната. Някои от тях са посочени на фигурата.) Коментирайте кривите.

