

Ал. Огойски

КРАТКИ ЛЕКЦИИ

ПО

ФИЗИКА

ТУ-Варна
2010

Конспект по Физика

УВОД: Що е Физика? Съвременна концепция за строежа на Вселената.

КЛАСИЧЕСКА МЕХАНИКА

1. Кинематика. Движение на материална точка в пространство-времето. Скорост и ускорение.
2. Динамика. Концепция на Нютон за пространство-времето. Закони на Нютон. Гравитация. Принцип на относителността на Галилей.
3. Работа и мощност на сила. Силов поле. Кинетична и потенциална енергия. Действие. Вариационен принцип на Ферма.
4. Импулс. Момент на сила. Момент на импулса. Лоренцов момент. Закони за запазване в класическата механика.

РЕЛАТИВИСТКА МЕХАНИКА

5. Скоростта на светлината – ключов въпрос във Физиката. Измервания.
6. Специална Теория на Относителността (СТО). Концепция на Айнщайн за пространство-временния континуум. Трансформации на Лоренц. Следствия.
7. Детекция на мюони – първо експериментално потвърждение на СТО. Релятивистки закон за събиране на скорости.
8. Пространство на Минковски. Интервал. Релятивистка маса, импулс и енергия.

КЛАСИЧЕСКА ЕЛЕКТРОДИНАМИКА

9. Електрично поле. Източници. Закон на Кулон. Интензитет и потенциал на електричното поле.
10. Магнитно поле. Източници. Закон на Био-Савар. Закон на Ампер. Сила на Лоренц.
11. Електромагнитна индукция. Закон на Фарадей.
12. Енергия на електромагнитното поле. Уравнения на Максвел.

ТЕРМОДИНАМИКА И СТАТИСТИЧЕСКА ФИЗИКА

13. Термодинамична система. Уравнение за състоянието на идеален газ. Първи принцип на Термодинамиката.
14. Изопроцеси. Топлинен капацитет. Работа на идеален газ при различните изопроцеси.
15. Ентропия. Втори принцип на Термодинамиката. Трети принцип на Термодинамиката.
16. Вечни двигатели от първи и втори род. Цикъл на Карно.

КЛАСИЧЕСКА И КВАНТОВА ОПТИКА

17. Светлината като електромагнитна вълна. Електромагнитен спектър.
18. Интерференция. Дифракция. Принцип на Хюйгенс – Френел.
19. Квантови свойства на светлината. Фотони. Фотоефект.

АТОМНА И ЯДРЕНА ФИЗИКА

20. Идеи на Квантовата Механика. Хипотеза на Де Бройл. Релации на Хайзенберг.
21. Уравнение на Шрьодингер. Физичен смисъл на вълновата функция.
22. Квантова теория на атома. Квантови числа. Принцип на Паули.
23. Стандартен модел на Вселената. Капков и кварк-глюонен модел на атомното ядро.
24. Ядрен разпад. Алфа, бета и гама разпад според капковия и кварк-глюонния модел.
25. Ядрен синтез. Критерий на Лоусън. Магнитен и инерциален ядрен синтез.

доц. д-р Александър Огойски

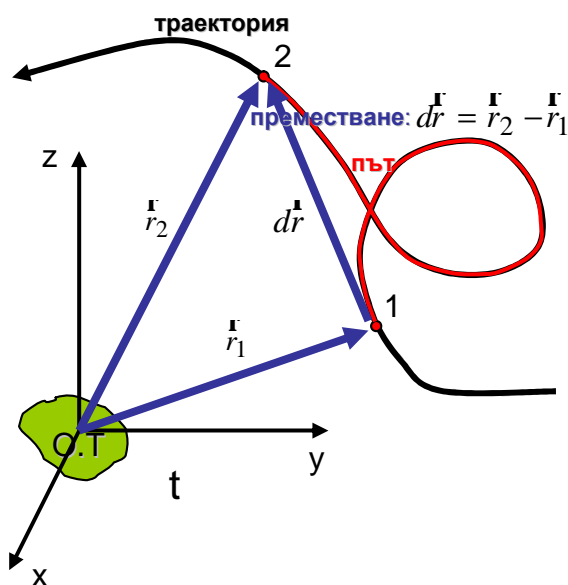
Литература:

1. И.В.Савельев, *Курс общей физики*, Москва, 1989г.
2. А.А.Детлаф, Б.М.Яворский, *Курс физики*, Москва, 1989г.
3. П.Георгиев, И.Йорданова, К.Маринов, С.Прокопиева, *Физика*, ТУ-Варна, 2003г.

Лекция 1: Кинематика. Движение на материална точка в пространство-времето. Скорост и ускорение

Кинематика (от гръцки: *KINEMA* – движение)

Кинематиката описва механичното движение на материята в пространство-времето без да се интересува от причините, които го пораждат. Тяло, чиито размери могат да се пренебрегнат в условията на дадено разглеждане се нарича *материална точка* (мт.).



Фигура 1-1

Следователно пътят е скалар, а преместването вектор, като $S \geq |dr|$. Ако знаем как се изменя радиус-вектора в пространство-времето, т.е.

$$\dot{\mathbf{r}} = f(x, y, z, t), \quad 1-1$$

то движението на мт. е еднозначно определено. Явният вид на функция 1-1 се нарича *закон за движението*.

Механичното движение е пространствено-временно, така че колкото и да е сложно то, в пространството може да се представи като сума от две основни движения – праволинейно и движение по окръжност, а във времето – равномерно и равнопроменливо (Фигура 1-2).

$$\begin{aligned} \forall \text{ двж.} &= \text{праволинейно} + \text{двж. по окръжност} && (x, y, z) \\ &= \text{равномерно} + \text{равнопроменливо} && (t) \end{aligned}$$

Фигура 1-2

Следователно основните видове движение на мт. са: равномерно праволинейно, равномерно по окръжност, равнопроменливо праволинейно и равнопроменливо по окръжност.

Промяната на радиус-вектора във времето се нарича *скорост*. Математически тази промяна се изразява с първата производна на $\dot{\mathbf{r}}$ по t :

$$\mathbf{v} = \frac{d\dot{\mathbf{r}}}{dt} \quad 1-2$$

Промяната на скоростта във времето се нарича *ускорение*. Математически ускорението се изразява с първата производна на $\dot{\mathbf{v}}$ по t или втората производна на $\dot{\mathbf{r}}$ по t :

$$\mathbf{a} = \frac{d\dot{\mathbf{v}}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad 1-3$$

Явният вид на закона за движението на мт. за всеки конкретен случай може да се намери, като се използват определенията 1-2 и 1-3. Ще илюстрираме това с два примера.

Пример 1: Равномерно праволинейно движение. Това е най-простият вид движение на мт., при което траекторията е права линия, а скоростта е постоянна $\dot{\mathbf{v}} = \text{const}$. Интегрирайки 1-2 получаваме:

$$\int_r d\dot{\mathbf{r}} = \int_t \dot{\mathbf{v}} dt = \dot{\mathbf{v}} \int_t dt ; \quad \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{v}} t + \dot{\mathbf{r}}_0 \quad 1-4$$

Скоростта $\dot{\mathbf{v}}$ излиза пред интеграла, защото не зависи от времето. Интеграционната константа $\dot{\mathbf{r}}_0$ има физически смисъл на радиус-вектор, дефиниращ началното положение на мт. Винаги можем да изберем такава ОКС, в която $\dot{\mathbf{r}}_0 = 0$. Уравнение 1-4 изразява закона за равномерното праволинейно движение. В този случай, пътът съвпада с големината на преместването $S = |\dot{\mathbf{r}}|$ и можем да запишем 1-4 в скаларен вид:

$$S = vt \quad 1-5$$

В ежедневната ни практика често използваме 1-5 за да пресметнем средната скорост, когато сме на дълъг път.

Пример 2: Равнопроменливо праволинейно движение. При този вид движение на мт. траекторията е права линия, скоростта се променя с времето, а ускорението е постоянно $\dot{\mathbf{a}} = \text{const}$. Ако $\dot{\mathbf{a}} > 0$, то движението е равноускорително, ако $\dot{\mathbf{a}} < 0$ – равнозакъснително. Следователно първо ще намерим явния вид на $\dot{\mathbf{v}} = f(t)$, като интегрираме 1-3.

$$\int_v d\dot{\mathbf{v}} = \int_t \dot{\mathbf{a}} dt = \dot{\mathbf{a}} \int_t dt ; \quad \dot{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{a}} t + \dot{\mathbf{v}}_0 \quad 1-6$$

Ускорението $\dot{\mathbf{a}}$ излиза пред интеграла, защото не зависи от времето. Интеграционната константа $\dot{\mathbf{v}}_0$ има физически смисъл на начална скорост на мт. Уравнение 1-6 изразява закона за скоростта при равнопроменливо праволинейно движение. Интегрираме 1-2, като използваме 1-6:

$$\int_r d\dot{\mathbf{r}} = \int_t \dot{\mathbf{v}} dt = \int_t (\dot{\mathbf{a}} t + \dot{\mathbf{v}}_0) dt ; \quad \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{a}} \int_t t dt + \dot{\mathbf{v}}_0 \int_t dt + \dot{\mathbf{r}}_0 ; \quad \dot{\mathbf{r}} = \frac{\dot{\mathbf{a}} t^2}{2} + \dot{\mathbf{v}}_0 t + \dot{\mathbf{r}}_0 \quad 1-7$$

Ускорението $\dot{\mathbf{a}}$ и скоростта $\dot{\mathbf{v}}_0$ излизат пред интеграла, защото не зависят от времето. Уравнение 1-7 изразява закона за равнопроменливо праволинейно движение.

Единицата за скорост в SI е *метър за секунда* (m/s), а ускорението се измерва в *метър за секунда на квадрат* (m/s²).

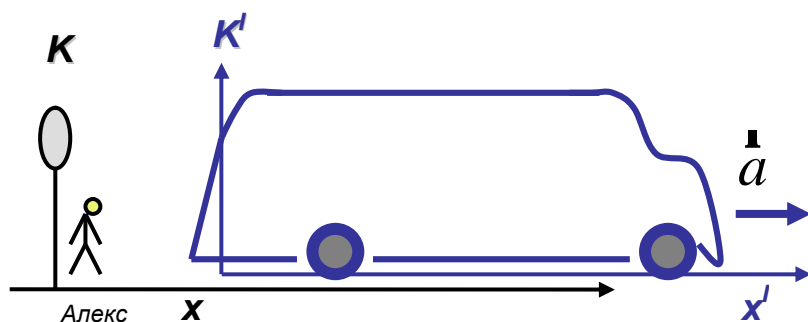
Лекция 2: Динамика. Концепция на Нютон за пространство-времето. Закони на Нютон. Принцип на относителността на Галилей

Динамика (от гръцки: *DYNAMIS* – сила)

Класическата динамика изучава гравитационното взаимодействие, като основна причина за движението на материята в пространство-времето. Тя се базира на три закона, формулирани от Нютон през 1687 в съчинението му: „Математически основи на натуралната философия”. През VII и VIII в. електромагнитното, силното и слабото ядрени взаимодействия не били известни, а Нютоновата механика е била напълно завършена и всевластваща.

Всяко движение се извършва в пространство-времето. Според концепцията на Нютон, *пространството и времето са абсолютни и не зависят от движението на Материята*. Това означава, че ако премахнем всички материални тела от Вселената, ще остане само „абсолютно празно пространство”, а ходът на времето ще е постоянен и винаги от минало към бъдеще, независимо от съществуването или отсъствието на Материя. Тази концепция напълно съответства на здравия разум и е продиктувана от ежедневието ни опит. Два века по-късно Айнщайн ще докаже, че Нютоновата концепция е вярна само за скорости на движение много по-малки от скоростта на светлината ($\dot{v} \ll c$).

Първи закон на Нютон: С него се дефинира свойството *инертност*, като общо свойство на телата да се противопоставят на външно въздействие. Той гласи: *всяко тяло запазва механичното си състояние на покой (или равномерно праволинейно движение) при отсъствие на външни сили*. Масата m е количествена мярка за инертност.



Фигура 2-1

се движи с ускорение \dot{a} . За Алекс, който чака на спирката, Първият закон на Нютон е изпълнен в K (в която той е в покой), и не е изпълнен в K' (в която той се движи с ускорение $-\dot{a}$, при отсъствие на външни сили). ОКС, в които е изпълнен Първият закон на Нютон се наричат *инерциални координатни системи* (ИКС), а тези в които не е изпълнен – *неинерциални координатни системи*. Следователно две ОКС, които се движат равномерно праволинейно една спрямо друга (или са в покой) са ИКС.

Да си представим сега, че Алекс е в автобуса, който се движи равномерно праволинейно ($\dot{v} = \text{const}$). Ако автобусът е без прозорци, то с никакъв физичен опит Алекс няма да може да установи неговото движение или покой. В това се изразява смисълът на Принципа на относителността на Галилей, който гласи: *механичните явления протичат по един и същи начин в различните ИКС*.

В общия случай, инертността на телата нараства с увеличаване на скоростта на движението им. Самата скорост също е относителна (зависи от ИКС, в която я измерваме). Важна характеристика на движението на тяло е неговият *импулс*:

$$\dot{p} = m\dot{v}$$

2-1

Втори закон на Нютон: С него се дефинира категорията *сила*, като количествена мярка за взаимодействие. Той гласи: *скоростта на изменение на импулса на тяло е равна на силата, която му действа*:

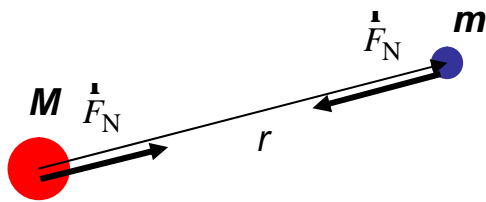
$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad 2-2$$

При ниски скорости на движение $\dot{\mathbf{v}} \ll c$, масата е постоянна величина и можем да запишем уравнение 2-2 във вида:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\dot{\mathbf{v}})}{dt} = m \frac{d\dot{\mathbf{v}}}{dt} = m\mathbf{a} \quad 2-3$$

т.е. тялото се ускорява под действието на сила \mathbf{F} .

Трети закон на Нютон: С него се дефинира противодействието като израз на факта, че всяко действие има характер на взаимодействие. Той гласи: *силите на взаимодействие са равни по големина и противоположни по посока*.



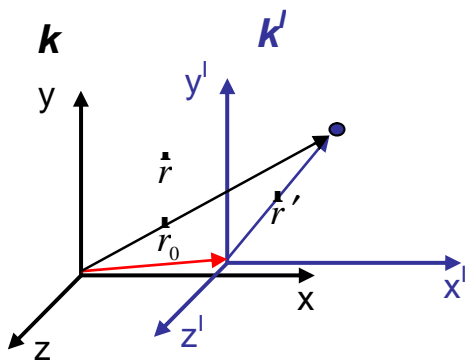
Фигура 2-2

Като илюстрация на Третия закон на Нютон ще разгледаме неговия закон за гравитацията. Две тела с маси M и m (Фигура 2-2) ще се привличат със сила F_N :

$$\mathbf{F}_N = -G \frac{Mm}{r^2} \mathbf{e}_r \quad 2-4$$

където $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ е гравитационната константа, а $\mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}$ е единичния радиус-вектор. Знакът "–" означава привличане. Независимо че двете тела са с различни маси ($M \gg m$), силите на привличане, които действат на всяко едно от тях, са с еднаква големина и противоположни посоки.

Да разгледаме две ИКС: K – неподвижна и K' – движеща се със скорост $\dot{\mathbf{v}}_0$ спрямо K .



Фигура 2-3

Радиус-векторът $\mathbf{r}_0 = \dot{\mathbf{v}}_0 t$ свързва K с K' . Движението на произволно тяло се описва в K с $\mathbf{r}(t)$ и t , а в K' с $\mathbf{r}'(t')$ и t' . От векторния триъгълник на Фигура 2-3 и абсолютното Нютоново време следва системата уравнения 2-5, която изразява *трансформациите на Галилей*.

$$\left| \begin{array}{l} \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}' \\ t = t' \end{array} \right. \quad 2-5$$

Ако диференцираме по t първото равенство от 2-5 и вземем предвид второто, получаваме:

$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d(\dot{\mathbf{v}}_0 t)}{dt} + \frac{d\mathbf{r}'}{dt'}$. Но от дефиниция 1-2 следва: $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ и $\mathbf{v}' = \frac{d\mathbf{r}'}{dt'}$. Така получаваме равенство 2-6, което представлява *Закона на Галилей за събиране на скорости*:

$$\dot{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{v}}_0 + \dot{\mathbf{v}}' \quad 2-6$$

Единицата за сила в SI е *нютон* (N), а за маса – *килограм* (kg). Скоростта се измерва в *метър за секунда* (m/s), ускорението – в *метър за секунда на квадрат* (m/s²), а импулсът – в *килограм по метър за секунда* (kg.m/s).

Лекция 3: Работа и мощност на сила. Силовое поле. Кинетична и потенциална енергия. Действие. Вариационен принцип на Ферма

Ако дадено тяло извършва диференциално малко преместване $d\mathbf{r}$ под действието на постоянна сила \mathbf{F} (Фигура 3-1), то *елементарната работа* dW на тази сила е:

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \quad 3-1$$



Фигура 3-1

Означението dW показва, че елементарната работа е непълен диференциал^(*) (Пфаф форма). В общия случай, работа на променлива сила намираме чрез интегриране на 3-1.

$$W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \quad 3-2$$

Елементарната работа можем да пресметнем ако знаем големините на векторите \mathbf{F} и $d\mathbf{r}$, и ъгъла α , който те сключват по между си, или ако знаем двата вектора по компоненти:

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = |\mathbf{F}| |d\mathbf{r}| \cos \alpha \quad \text{или} \quad dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F_x dx + F_y dy + F_z dz \quad 3-3$$

Сила, чиято работа не зависи от траекторията на движение, а само от началното и крайно положение, се нарича *консервативна*.

Скоростта, с която се извършва работа от дадена сила се нарича *мощност* P на тази сила. Като вземем предвид равенствата 1-2 и 3-1, за P следва:

$$P = \frac{dW}{dt} = \mathbf{F} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad 3-4$$

За описание на взаимодействието на тела, намиращи се на разстояния много по-големи от характерните размери на телата, е удобно въвеждането на категорията *силово поле* (СП), като *област от пространство-времето, във всяка точка от която действа сила*. Всяко СП може да се опише с функция $j(\mathbf{r}, t)$ наречена *потенциал*. Ако за даденото СП е изпълнено условието $\mathbf{F} = -\nabla j$ (**), то СП се нарича *потенциално*.

Ако частица с маса m се движи със скорост \mathbf{v} в дадена отпращава координатна система (ОКС), то величината характеризираща нейното движение:

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad 3-5$$

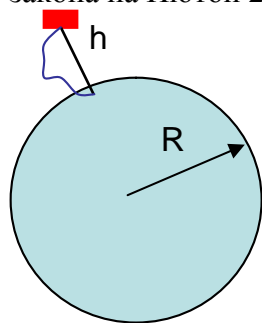
се нарича *кинетична енергия* на частицата. От 3-5 се вижда, че кинетичната енергия (също както и скоростта) е относителна величина и зависи от избора на ОКС. Ако умножим двете страни на 2-2 с $d\mathbf{r}$ и вземем предвид 1-2, получаваме:

$$\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \cdot d\mathbf{r} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} \cdot \mathbf{v} dt = d\left(\frac{mv^2}{2}\right), \Rightarrow dW = dK \quad 3-6$$

От 3-6 следва, че кинетичната енергия на частица може да се увеличи ако върху нея се извърши работа.

Ако частица с маса m се намира в СП, нейното състояние придобива допълнителна характеристика – *потенциална енергия*. Като пример ще разгледаме системата тяло – Земя (като най-важна за нас от практически съображения). В тази система (Фигура 3-2) обектите са два: Земята (с маса M и радиус R) и малко тяло (с маса $m \ll M$), което се намира на

височина h над земната повърхност. Взаимодействието между тях е гравитационно според закона на Нютон 2-4. Тъй като $R \gg h$, можем да запишем 2-4 във вида:



$$\vec{F}_N = -G \frac{Mm}{(R+h)^2} \vec{e}_r = m \left(-G \frac{M}{R^2} \vec{e}_r \right) = m \vec{g} \quad 3-7$$

Векторът \vec{g} описва интензитета на гравитационното поле. За стойности на $h \ll R$ (т.е. близо до земната повърхност), $\vec{g} = \text{const}$ и се нарича *земно ускорение*. Работата за издигане на тялото на височина h ще отиде за увеличаване на неговата потенциална енергия от 0 на повърхността до mgh на височина h :

$$dW = \vec{F}_N \cdot h \vec{e}_r = mgh = dU \Rightarrow U = mgh \quad 3-8$$

Фигура 3-2

Следователно потенциалната енергия U е абсолютна характеристика на състоянието на тяло в потенциално поле и не зависи от избора на ОКС.

Централна роля във Физиката играе величината *действие*. За частица, движеща се в потенциално СП, действието от момент t_1 до момент t_2 е равно на:

$$= \int_{t_1}^{t_2} (K - U) dt \quad 3-9$$

Основен закон във Физиката е *принципът на най-малкото действие* (или *вариационен принцип на Ферма*), според който Природата действа по най-лекия и достъпен път. Или казано по-строго: *движението в пространство-времето се извършва с минимално действие*. Всички закони за запазване във Физиката (лекция 4) следват непосредствено от приложението на принципа на Ферма.

Единицата за работа и енергия в SI е *джаул* (J), като $1J = 1N \cdot 1m$. В Атомната и Ядрената Физика се използва единицата *електрон-волт* (eV), $1eV = 1,6 \times 10^{-19} J$. Единицата за мощност в SI е *ват* (W), като $1W = 1J/s$. В практиката често се използва единицата *конска сила* (hp), $1hp = 746W$. Единицата за действие в SI е *джаул по секунда* (J.s).

(*) Непълнен диференциал (Пфаф форма): Ако обозначим елементарната работа като пълен диференциал с dW , от математическа гледна точка трябва да запишем 3-1 така:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} + \vec{r} \cdot d\vec{F} \quad 3-10$$

Вторият член в 3-10 е винаги нулев от физични съображения (той изразява промяна на силата по големина и посока но така, че тялото остава неподвижно в пространството в точка, дефинирана с радиус-вектора \vec{r}). Друга Пфаф форма във Физиката е елементарното количество топлина dQ .

(**) Оператор ∇ : (виж приложението към Лекция 21) Ако искаме да опишем промяната на дадена функция в пространството, прилагаме към нея *векторния пространствен диференциален оператор* ∇ с компоненти:

$$\nabla \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad 3-11$$

Резултатът от прилагането на ∇ към функция е вектора *градиент* (*grad*), който показва посоката на най-бързото нарастване в пространството на тази функция.

$$\nabla j(\vec{r}, t) = \text{grad} j(\vec{r}, t), \text{ с компоненти: } \left(\frac{\partial j}{\partial x}, \frac{\partial j}{\partial y}, \frac{\partial j}{\partial z} \right) \quad 3-12$$

Лекция 4: Импулс. Момент на сила. Момент на импулса. Лоренцов момент. Закони за запазване в класическата механика

Съвкупност от частици, на които не действат външни сили, образуват *затворена механична система*.

Важна характеристика на движението на частица е нейният *импулс*:

$$\dot{\mathbf{p}} = m\dot{\mathbf{v}} \quad 4-1$$

Импулсът е адитивна величина и за система от N на брой частици, той е векторна сума от импулсите на отделните частици на системата.

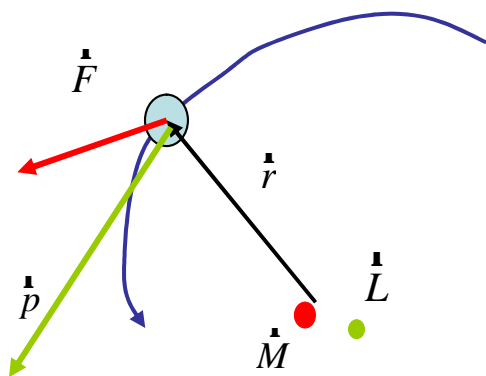
$$\dot{\mathbf{P}} = \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{p}}_i \quad 4-2$$

От втория закон на Нютон в механиката (равенство 2-2) за затворена механична система следва:

$$\frac{d\dot{\mathbf{P}}}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{\mathbf{P}} = \text{const} \quad 4-3$$

Следователно *импулсът на затворена механична система се запазва*.

Когато тяло се движи по криволинейна траектория под действието на сила $\dot{\mathbf{F}}$, то движението му се характеризира с *момента на силата* $\dot{\mathbf{M}}$ спрямо центъра на кривината на неговата траектория (виж Фигура 4-1):



$$\dot{\mathbf{M}} = \dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{F}} \quad (*), \quad 4-4$$

където $\dot{\mathbf{r}}$ е радиуса на кривината.

Ако в момент t тялото притежава импулс $\dot{\mathbf{p}}$, то *моментът на импулса* $\dot{\mathbf{L}}$ спрямо центъра на кривината е характеристиката на неговото движение в този момент t :

$$\dot{\mathbf{L}} = \dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{p}} \quad 4-5$$

Фигура 4-1

Тогава вторият закон на Нютон (равенство 2-2), в случай на движение по криволинейна траектория, свързва промяната на момента на импулса $\dot{\mathbf{L}}$ във времето с момента на силата $\dot{\mathbf{M}}$:

$$\dot{\mathbf{M}} = \frac{d\dot{\mathbf{L}}}{dt} \quad 4-6$$

Равенство 4-6 се нарича още *основно уравнение на въртеливото движение*. За затворена механична система $\dot{\mathbf{M}} = 0$ и от 4-6 получаваме:

$$\frac{d\dot{\mathbf{L}}}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{\mathbf{L}} = \text{const} \quad 4-7$$

Следователно *моментът на импулса на затворена механична система се запазва*.

Според концепцията на Нютон (Лекция 2), пространството и времето са абсолютни и не зависят от движението на Материята. Според Специалната Теория на Относителността обаче (Лекция 6), пространството и времето са относителни характеристики на материята

(т.е. свойствата им зависят от движението на материята). За описание на частица в пространство-времето се използва така наречения *Лоренцов момент*:

$$\mathbf{N} = c\mathbf{t}\mathbf{p} - \frac{E}{c}\mathbf{r} \quad 4-8$$

Първата компонента на лоренцовия момент изразява неговата зависимост от времето, а втората – от пространството.

Единицата за момент на сила $\dot{\mathbf{M}}$ в SI е нютон по метър (N.m), а единицата за момент на импулса $\dot{\mathbf{L}}$ и лоренцов момент $\dot{\mathbf{N}}$ е килограм по метър на квадрат за секунда (kg.m²/s).

Както момента на импулса $\dot{\mathbf{L}}$, така и *лоренцовият момент* $\dot{\mathbf{N}}$ на *затворена механична система се запазва в пространство-времето*. На езика на математиката този факт се изразява с:

$$\frac{d\dot{\mathbf{N}}}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{\mathbf{N}} = \text{const} \quad \text{във времето, и} \quad 4-9$$

$$\nabla \dot{\mathbf{N}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{\mathbf{N}} = \text{const} \quad \text{в пространството (виж 3-11).} \quad 4-10$$

Освен импулса $\dot{\mathbf{P}}$, момента на импулса $\dot{\mathbf{L}}$ и лоренцовият момент $\dot{\mathbf{N}}$, в *затворена механична система се запазва и пълната механична енергия*.

$$E = K + U = \text{const} \quad 4-11$$

Пълната механична енергия на дадена система е сума от нейната кинетична енергия K и потенциална енергия U (Лекция 3). В затворена механична система енергията може да се преобразува, като кинетичната енергия преминава в потенциална и обратно, но пълната механична енергия се запазва.

Приложението на Принципа на най-малкото действие (Вариационен Принцип на Ферма) в Класическата Механика води до запазване на $\dot{\mathbf{P}}, \dot{\mathbf{L}}, \dot{\mathbf{N}}, E$ за затворена механична система.

(*) Векторно произведение на два вектора: Освен някои скаларни величини във Физиката (виж 3-3, 3-4), които се получават при скаларно умножение на вектори, много векторни величини са векторно произведение на два вектора (4-4, 4-5). Големината на резултантния вектор $\dot{\mathbf{c}}$ можем да пресметнем, ако знаем големините на векторите $\dot{\mathbf{a}}$ и $\dot{\mathbf{b}}$, и ъгъла α , който те сключват по между си:

$$\dot{\mathbf{c}} = \dot{\mathbf{a}} \times \dot{\mathbf{b}} = |\dot{\mathbf{a}}||\dot{\mathbf{b}}| \sin \alpha \quad 4-12$$

Векторът $\dot{\mathbf{c}}$ е перпендикулярен на равнината образувана от векторите $\dot{\mathbf{a}}$ и $\dot{\mathbf{b}}$, като $\dot{\mathbf{c}}, \dot{\mathbf{a}}$ и $\dot{\mathbf{b}}$ образуват дясна тройка. Компонентите на вектор $\dot{\mathbf{c}}(c_x, c_y, c_z)$ можем да получим, ако знаем двата вектора $\dot{\mathbf{a}}$ и $\dot{\mathbf{b}}$ по компоненти:

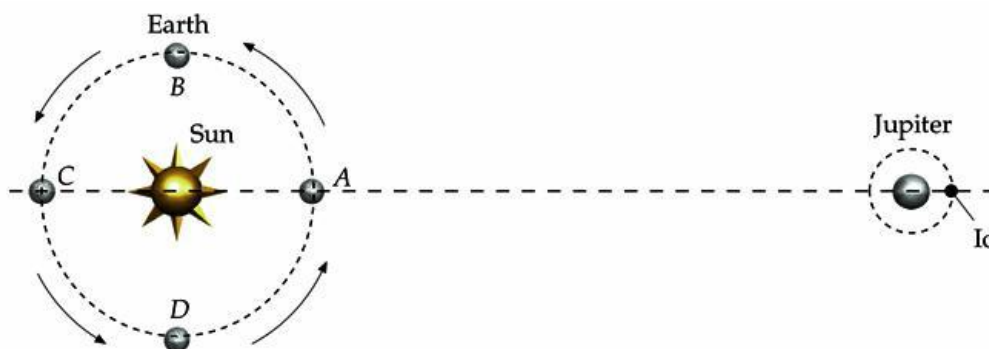
$$\dot{\mathbf{c}} = \begin{pmatrix} x & y & z \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} c_x &= a_y b_z - a_z b_y \\ c_y &= -a_x b_z + a_z b_x \\ c_z &= a_x b_y - a_y b_x \end{aligned} \quad 4-13$$

Лекция 5: Скоростта на светлината – ключов въпрос във Физиката.

Измервания

Нютоновата теория предполага безкрайно висока скорост на разпространение на гравитационното взаимодействие. Това означава, че Класическата Механика (КМ) допуска принципната възможност за мигновено предаване на сигналите (т.е. безкрайна скорост на светлината $c = \infty$). Ето защо, за експериментална проверка на КМ и Нютоновата концепция за абсолютно пространство и време е особено важно да се отговори на въпроса: *крайна или безкрайна е скоростта на светлината c ?*

Първото доказателство за крайната скорост на светлината е направено през 1675 година от датския астроном Рьомер. Той установил, че времето между две последователни еклиптики на Йо (спътник на Юпитер) нараства с около 15s, когато Земята се отдалечава от Юпитер, движейки се по траектория ABC , и обратно – намалява с 15s, когато се приближава към Юпитер по траектория CDA (Фигура 5-1). Това означава, че скоростта на светлината е крайна, т.е. $c \neq \infty$. За половин година (когато Земята се намира в точка C) натрупаното



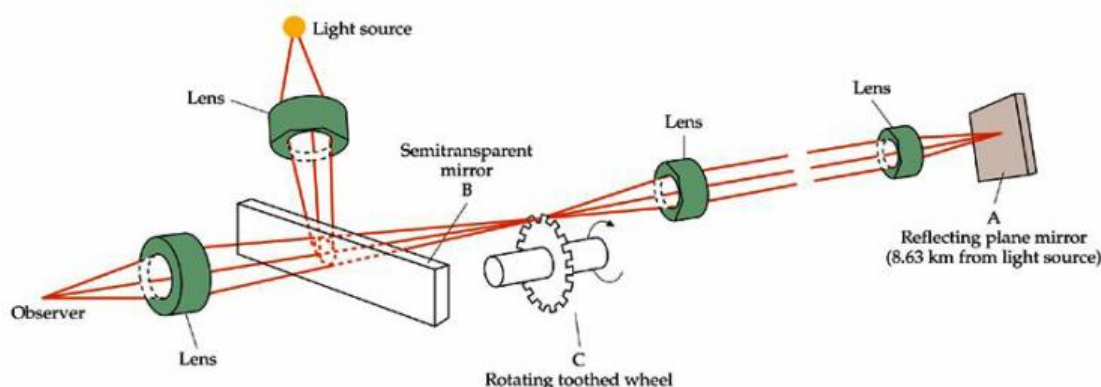
Фигура 5-1

закъснение (спрямо положението ѝ в точка A), което Рьомер получил е $\Delta t = 22 \text{ min}$. Това е времето, за което светлината изминава разстоянието AC – диаметъра на земната орбита, който тогава е бил известен $3 \times 10^{11} \text{ m}$. Така за c Рьомер пресметнал:

$$c = \frac{AC}{\Delta t} = \frac{3 \times 10^{11} \text{ m}}{22 \cdot 60 \text{ s}} = 2,273 \times 10^8 \text{ m/s} \quad 5-1$$

Грешката на Рьомер идва от неточността при определянето на Δt , по съвременни данни $\Delta t = 16,6 \text{ min}$.

Първото наземно измерване на скорост на светлината е направено през 1849 година от френския физик Физо. На хълм близо до Париж (виж Фигура 5-2), Физо поставил светлинен източник. През въртящо се зъбно колело и колиматор, светлинният лъч се изпраща до огле-

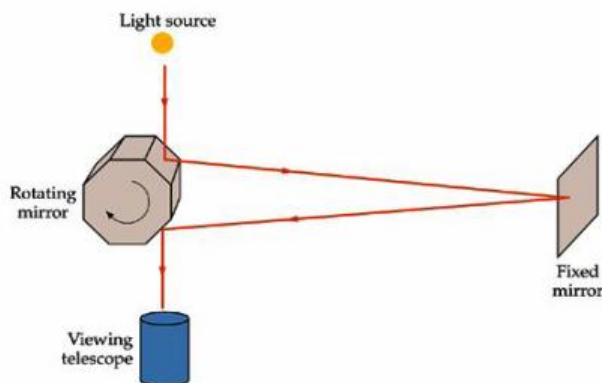


Фигура 5-2

дало, поставено на съседния хълм на разстояние 8.63 km. Отразеният лъч се възпрепятства от съседния зъб на въртящото се колело и в окуляра се вижда светлина. При честота на въртене $n = 25,21\text{ Hz}$, отразеният лъч преминава през съседния отвор и се наблюдава в окуляра. Времето Δt , за което светлината изминава разстоянието до огледалото и обратно, може да се пресметне (броят на зъбците на колелото е 720), и за c се получава:

$$\Delta t = \frac{1}{25,21 \cdot 720} = 5,509 \times 10^{-5} \text{ s}, \quad c = \frac{2l}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 8630}{5,509 \times 10^{-5}} = 3,133 \times 10^8 \text{ m/s} \quad 5-2$$

Методът на Физо бил подобрен през 1862 година от друг френски физик – Фуко. Вместо зъбно колело той използвал осмоъгълна въртяща се огледална призма (Фигура 5-3).



Фигура 5-3

За времето, за което призмата се завърта на $1/8$ оборот, светлината достига до огледалото и се връща, като попада в окуляра при повторното си отразяване от призмата. Резултатът на Фуко бил значително точен:

$$c = 298\,000 \pm 500 \text{ km/s} \quad 5-3$$

По същия начин Фуко измерил и скоростта на светлината във водата и показал, че тя е по-ниска отколкото във въздуха. Станало ясно, че светлината взаимодейства с веществото при своето разпространение.

Американският физик Майкелсън подобрил значително точността на метода на Фуко и през 1926 година получил най-точния до тогава резултат, който влязъл в международните таблици на физичните величини:

$$c = 299\,796 \pm 4 \text{ km/s} \quad 5-4$$

През 1960г., американският физик Майман конструира първия рубинов лазер. Използването му в експеримента на Майкелсън подобрява многократно точността на измерването и през 1973г. е получен следния резултат:

$$c = 299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ m/s} \quad 5-5$$

Развитието на експерименталната техника и технологии позволява по-нататъшно прецизиране на метода и намаляване на грешката при измерването. Резултатът получен през 1983г. е именно този, с който борави съвременната наука:

$$c = 299\,792\,458 \pm 0,4 \text{ m/s} \quad 5-6$$

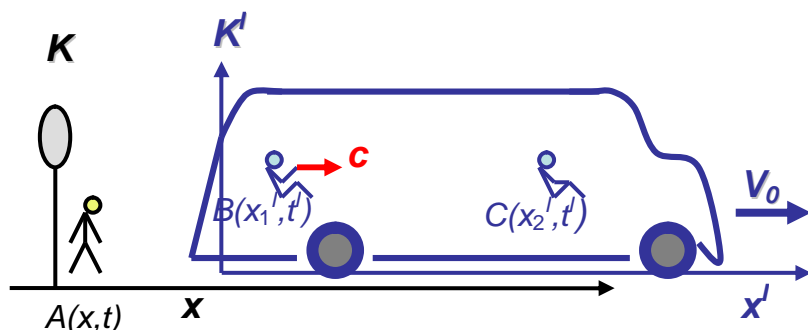
Лекция 6: Специална Теория на Относителността. Концепция на Айнщайн за пространство-временния континуум. Трансформации на Лоренц. Следствия

Галилей първи изказва твърдението, че *механичните явления не зависят от избора на ИКС* (Лекция 2). Обобщавайки тази концепция за всички физични явления и отчитайки безспорния експериментален факт за *крайната скорост на светлината* (Лекция 5), Айнщайн формулира два постулата, на базата на които изгражда Специалната Теория на Относителността (СТО).

Постулат 1: *Природните закони са еднакви във всички ИКС.*

Постулат 2: *Скоростта на светлината във вакуум е постоянна във всички ИКС.*

За илюстрация на основните идеи на СТО ще разглеждаме събития, протичащи в две ИКС: K – свързана с автобусната спирка и K' – свързана в движещия се с постоянна скорост V_0 автобус (Фигура 6-1). На спирката стои Алекс с координати (x, t) , а в автобуса



Фигура 6-1

се возят Виктор и Сашо с координати съответно (x'_1, t') и (x'_2, t') в K' . Ако Виктор светне с фенерче по посока на Сашо, то светлинният импулс в K' ще се движи със скорост c . Според закона на Галилей за събиране на скорости (2-6), скоростта на светлинния импулс за Алекс (измерена в K) ще бъде по-голяма от c (6-1), което противоречи на *Постулат 2* на СТО.

$$v_A = v_0 + c > c$$

6-1

Следователно законът на Галилей за събиране на скорости не е верен, защото допуска безкрайна скорост на разпространение на светлината. Това означава, че концепцията на Нютон за *абсолютното пространство и време* (виж Лекция 2), от която следва законът на Галилей за събиране на скорости, също трябва да бъде ревизирана. СТО се базира на *концепцията на Айнщайн за пространство-временния континуум*, според която:

пространството и времето са характеристики на материята и зависят от нейното движение. Вселената представлява пространствено-временен континуум.

Математически израз на тази концепция, както и на двата постулата на СТО, са *трансформациите на Лоренц*:

$$\begin{cases} x = g(x' + v_0 t') \\ t = g\left(t' + \frac{v_0}{c^2} x'\right) \end{cases}, \quad g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

6-2

Лоренцовата променлива g расте от 1 (при $v_0 \ll c$) до безкрайност (при $v_0 \rightarrow c$).

Следователно при ниски скорости на движение $g=1$, а членът $\frac{v_0}{c^2}x'$ може да се пренебрегне. Така Лоренцовите трансформации (6-2) преминават в Галилееви (2-5), т.е. Нютоновата механика се явява частен случай на СТО, валидна при ниски скорости на движение $v_0 \ll c$.

Ще разгледаме три важни следствия от трансформациите на Лоренц.

Следствие 1: *Относителност на едновременността.* Нека в K' Виктор и Сашо едновременно изстрелят сигнални ракети в момент t' (Фигура 6-2). В K Алекс ще види ракетата на Виктор в момент t_1 , а ракетата на Сашо – в момент t_2 :

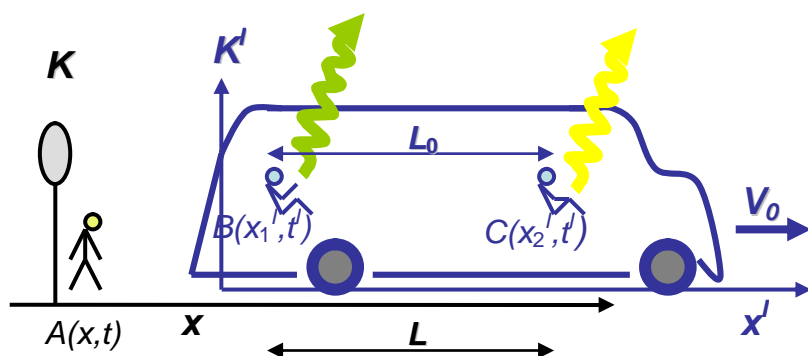
$$t_1 = g\left(t' + \frac{v_0}{c^2}x'_1\right); \quad t_2 = g\left(t' + \frac{v_0}{c^2}x'_2\right); \quad \Rightarrow \quad t_1 < t_2 \quad 6-3$$

Следователно за Алекс изстрелването на ракетите не е едновременно. Той вижда първо ракетата на Виктор, а после ракетата на Сашо.

Следствие 2: *Свиване на пространството.* Нека в K' (Фигура 6-2) разстоянието между Виктор и Сашо е $L_0 = x'_2 - x'_1$ (т.н. собствена дължина). В K за Алекс това разстояние ще бъде L :

$$x'_1 = g(x_1 - v_0 t); \quad x'_2 = g(x_2 - v_0 t); \quad L_0 = x'_2 - x'_1 = g(x_2 - x_1) = gL \quad 6-4$$

Следователно за Алекс $L < L_0$, т.е. пространството по посока на движението се свива.



Фигура 6-2

Следствие 3: *Забавяне хода на времето.* Нека в K' за Виктор дадено събитие има продължителност $\Delta t_0 = t'_2 - t'_1$ (т.н. собствено време). В K за Алекс продължителността на това събитие ще бъде Δt :

$$t_1 = g\left(t'_1 + \frac{v_0}{c^2}x'_1\right); \quad t_2 = g\left(t'_2 + \frac{v_0}{c^2}x'_1\right); \quad \Delta t = t_2 - t_1 = g(t'_2 - t'_1) = g\Delta t_0 \quad 6-5$$

Следователно $\Delta t > \Delta t_0$, т.е. за Алекс е изминало повече време отколкото за Виктор. Това означава, че в движещата се K' времето тече по-бавно.

Трудно е да си представим как пространството се свива по посока на движението, как времето забавя своя ход в движещата се ИКС или как едновременността се губи при преход от една ИКС към друга. Това е така, защото „здравият разум“ се базира върху ежедневиия ни опит, т.е. при скорости на движение много по-ниски от скоростта на светлината, където правилността на Нютоновата механика е безспорна.

Лекция 7: Детекция на мюони – първо експериментално потвърждение на СТО. Релативистки закон за събиране на скорости

Мюоните (m^μ) са лептони с маса 105,7 MeV (т.е. 207 пъти по-тежки от електрона). Открити са през 1936г. в космическите лъчи от американските физици Андерсън и Недермайер. През 1947 японският физик Юкава обяснява механизма на раждане и разпадане на мюона:

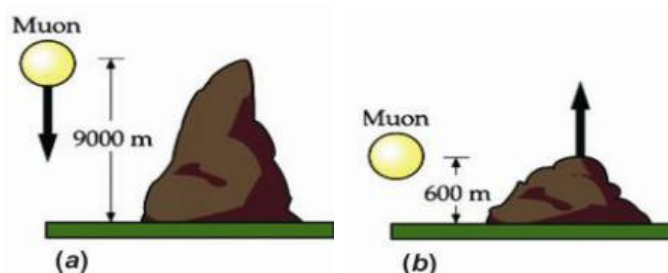
$$p^\pm \rightarrow m^\pm + n_\mu(\tilde{n}_\mu) ; \quad m^\pm \rightarrow e^\pm + n_e(\tilde{n}_e) + \tilde{n}_\mu(n_\mu) \quad 7-1$$

Мюон се ражда при разпад на p – мезон (двукваркова частица) и се разпада на електрон, електронно и мюонно неутрино (7-1). Измерено е собственото време на живот на мюона $t_0 = 2,2\mu s$. Мюоните се раждат в йоносферата на височина 9 км и се движат със скорост $v = 0,9978c$ (Фигура 7-1a). Ако релативисткият ефект на забавяне хода на времето не съществува (т.е. $t = t_0$), то мюонът ще измине едва 658м. (7-2) до своя разпад и няма да достигне земната повърхност.

$$L_0 = v \cdot t = 0,9978 \cdot 299792458 \cdot 2,2 \times 10^{-6} = 658 \text{ м} \quad 7-2$$

В действителност, уредите на земната повърхност регистрират мюонни потоци, което може да се обясни с удължаването на времето на живот на мюона (т.е. $t = gt_0$) в K , ИКС свързана със Земята (виж 6-5). Следователно в K мюонът ще измине 9870м. до разпада си (7-3).

$$g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 15; \quad L_0 = v \cdot gt_0 = 0,9978 \cdot 299792458 \cdot 15 \cdot 2,2 \times 10^{-6} = 9870 \text{ м} \quad 7-3$$



Фигура 7-1

Достигането на мюоните до земната повърхност може да се обясни и с релативисткия ефект на свиване на пространството (виж 6-5). Нека K' е ИКС, свързана неподвижно с мюона. В K' собственото време на живот на мюона е $t_0 = 2,2\mu s$, но земната повърхност се движи към него със скорост $v = 0,9978c$. Тогава за мюона разстоянието до Земята ще се скъси g пъти (Фигура 7-1b) и ще бъде само 600м. (7-4). Следователно двата релативистки ефекта,

$$L = \frac{1}{g} L_0 = 600 \text{ м} \quad 7-4$$

забавяне хода на времето и свиване на пространството, са тясно свързани. За наблюдател от Земята мюонът живее 15 пъти по-дълго. От гледна точка на мюона, разстоянието до земната повърхност е 15 пъти по-късо.

Нека си представим, че сме астронавти и пътуваме към Сириус със скоростта на мюона. За нашите приятели на Земята разстоянието до Сириус (9 светлинни години) няма да се промени, но ние ще остаряваме 15 пъти по-бавно и ще живеем по-дълго от тях. Ние на космическия кораб няма да усетим, че за нас времето тече по-бавно, но пристигайки на Сириус ще установим, че сме изминали 15 пъти по-късо разстояние. Следователно проявата на релативистките ефекти при движение със субсветлинна скорост ще позволят на човека да достигне в близко бъдеще до отдалечени обекти в дълбокия Космос.

Както видяхме в Лекция 6, законът на Галилей за събиране на скорости не е верен, защото допуска безкрайна скорост на разпространение на светлината (6-1). За да получим релативисткия закон за събиране на скорости ще приложим Лоренцовите трансформации (6-2) за диференциално малко преместване dx , което се извършва за време dt .

$$\begin{cases} dx = g(dx' + v_0 dt') \\ dt = g\left(dt' + \frac{v_0}{c^2} dx'\right) \end{cases} \quad 7-5$$

Разделяйки почленно двете равенства и вземайки предвид (1-2), получаваме:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx' + v_0 dt'}{dt' + \frac{v_0}{c^2} dx'} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v_0}{1 + \frac{v_0}{c^2} \frac{dx'}{dt'}} \Rightarrow v = \frac{v' + v_0}{1 + \frac{v_0}{c^2} v'} \quad 7-6$$

Нека се върнем към ситуацията от Лекция 6, в която Виктор светва с фенерче по посока на Сашо (виж Фигура 6-1). Скоростта на светлинния импулс за Алекс, който е на спирката, ще бъде също c (7-7), вместо $v_0 + c$.

$$v = \frac{c + v_0}{1 + \frac{v_0}{c^2} c} = \frac{c\left(1 + \frac{v_0}{c}\right)}{1 + \frac{v_0}{c}} = c \quad 7-7$$

Дори автобусът да се движи със скоростта на светлината (т.е. $v_0 = c$), за Алекс скоростта на светлинния импулс ще бъде също c (7-8):

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c}{c^2} c} = \frac{2c}{2} = c \quad 7-8$$

Следователно релативисткият закон за събиране на скорости (7-6) забранява превишаване на скоростта на светлината c в нито една ИКС.

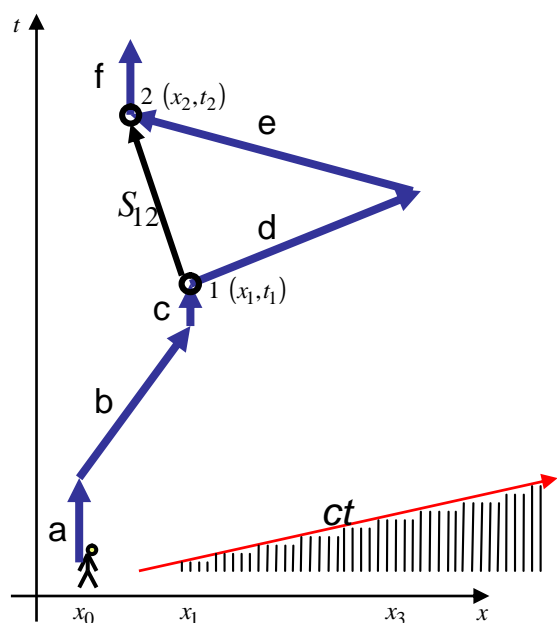
В случай на движение с ниски скорости (т.е. $v_0 \ll c$), вторият член в знаменателя на (7-6) клони към нула и от релативисткия закон за събиране на скорости се получава закона на Галилей (2-6), а от Лоренцовите трансформации (6-2) се получават Галилеевите трансформации (2-5). Следователно Класическата Механика на Нютон се явява частен случай на Релативистката Механика при ниски скорости на движение ($v_0 \ll c$).

Лекция 8: Пространство на Минковски. Интервал. Релативистка маса, импулс и енергия

Всяко движение се извършва в пространство-времето. В Лекция 2 обсъдихме Нютоновата концепция, според която: *пространството и времето са абсолютни и не зависят от движението на Материята*. Това означава, че ако премахнем всички материални тела от Вселената, ще остане само „абсолютно празно пространство”, а ходът на времето ще е постоянен и винаги от минало към бъдеще, независимо от съществуването или отсъствието на Материя, нито от нейното движение. Тази концепция напълно съответства на здравия разум и е продиктувана от ежедневиения ни опит. Два века по-късно Айнщайн доказа, че Нютоновата концепция е вярна само за скорости на движение много по-малки от скоростта на светлината ($v \ll c$).

В Класическата Механика движението на тяло се описва с изменението във времето на радиус-вектора в триизмерна декартова координатна система: $\vec{r}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$.

В Релативистката Механика всяко събитие зависи от четири величини $\{x, y, z, t\}$ и се изобразява с точка в четиримерно пространство-време, наречено *пространство на Минковски*. На всяка частица в това пространство (даже и на неподвижната) съответства линия, наречена *жизнена линия*. Когато движението на частицата е праволинейно, то се описва в двумерно пространство-време $\{x, t\}$. Да разгледаме движението на Алекс в такова



Фигура 8-1

пространство (Фигура 8-1). Неговата жизнена линия, когато той стои неподвижно в точка x_0 , се изобразява с отсечката **a** (т.е. той се движи само във времето). Отсечка **b** е жизнената му линия, когато се движи от x_0 към x_1 със скорост v_1 . В x_1 стои за малко неподвижен (отсечка **c**), след което тръгва към x_3 със скорост $v_2 > v_1$ (отсечка **d**), връща се обратно (отсечка **e**) и застава неподвижно в x_2 (отсечка **f**). Жизнената линия на светлинен импулс, разпространяващ се по x , се изобразява с отсечката **ct**. По-полегата отсечка от **ct** означава движение със свръхсветлинни скорости. Следователно заштрихованата област, лежаща под **ct** е забранена. В нея причинно-следствената връзка между последователни събития се нарушава.

Разстоянието между събитие 1 с координати $\{x_1, t_1\}$ и събитие 2 $\{x_2, t_2\}$ се нарича *интервал* S_{12} . В четиримерното пространство-време $\{x, y, z, t\}$, интервалът S_{12} има следния математичен вид:

$$S_{12} = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2} \quad 8-1$$

$l_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ е разстоянието между събитията в тримерното Нютоново пространство. Важно свойство на интервала S_{12} е, че той е инвариантен по отношение на преход от една ИКС към друга.

$$S_{12} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2} = \text{const} \quad \text{във всички ИКС} . \quad 8-2$$

Въпреки че и двата члена в (8-2) се менят при преход от една ИКС към друга (виж Лекция 6 (6-4) и (6-5)), то интервалът S_{12} остава инвариантен.

Ако $ct_{12} > l_{12}$, то S_{12} е реален и се нарича *времеподобен интервал*. За събития разделени с времеподобен интервал е в сила причинно-следствената връзка (събития 1 и 2 на Фигура 8-1). Ако $ct_{12} < l_{12}$, то S_{12} е имагинерен и се нарича *пространственоподобен интервал*. Събития разделени с пространственоподобен интервал не могат да си взаимодействат. Те се намират в заштрихованата област на Фигура 8-1 и за тях причинно-следствената връзка е нарушена.

В Класическата Механика *инертността* се дефинира от Първия закон на Нютон като свойство на телата да се противопоставят на външно въздействие (виж Лекция 2). Масата m се въвежда като количествена мярка за инертност и е константа за дадено тяло. Тя зависи само от плътността и обема му: $m = \rho V$. В действителност, инертността на телата расте с нарастване на скоростта им на движение. Релативистката маса m_r описва количествено това свойство на телата.

$$m_r = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} m = \gamma m \quad , \quad 8-3$$

където m е масата в покой.

В Релативистката Механика (при субсветлинни скорости на движение), импулсът на затворена механична система, така както го дефинирахме в лекция 4 (4-1), не се запазва. Това е така, защото инертността е относителна. Релативисткият импулс (8-4) и пълната енергия на частица (8-5) получаваме от (8-3). За затворена механична система те се запазват във всички ИКС.

$$\vec{p} = m_r \vec{v} = \gamma m \vec{v} \quad 8-4$$

$$E = m_r c^2 = \gamma m c^2 \quad 8-5$$

Като решим системата от три уравнения (8-3), (8-4) и (8-5) спрямо E , \vec{p} и m ; получаваме важна връзка между пълната енергия на частица, нейния импулс и масата ѝ в покой:

$$E = c \sqrt{\vec{p}^2 + m^2 c^2} \quad 8-6$$

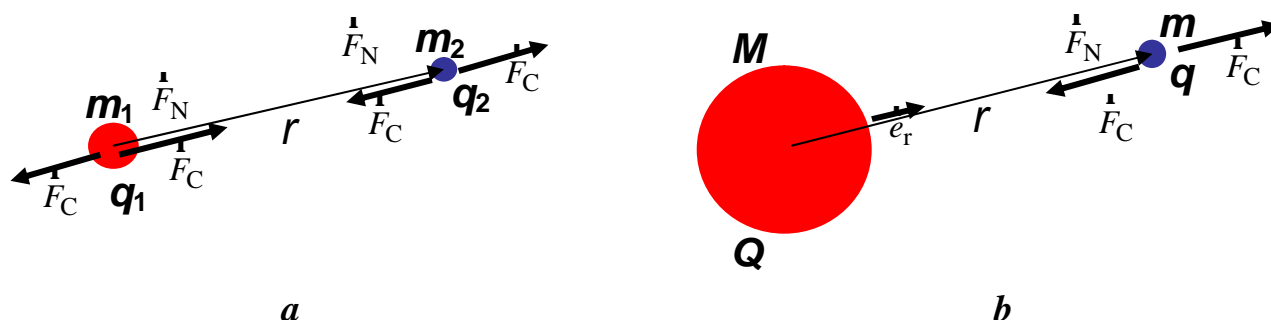
Ако частицата е в покой, т.е. $\vec{p} = 0$, от (8-6) следва:

$$E_0 = m c^2 \quad 8-7$$

E_0 е енергията на частица в покой. Това е знаменитата формула на Айнщайн, превърнала се в емблема на модерната Физика. Именно (8-7) е формулата, която всеки си представя, когато се заговори за Физика. Многократно доказана експериментално, сега тази връзка между маса и енергия ни изглежда проста и ясна. В началото на 20 век обаче, това съвсем не е било така. От гледна точка на Класическата Механика, масата и енергията са две независими категории, а светлината се разпространява мигновено и няма никаква връзка с масата и енергията на тяло в покой. Ето защо е било толкова трудно да се възприеме Специалната Теория на Относителността през далечната 1905 година, въпреки че крайната скорост на разпространение на светлината е била вече експериментален факт.

Лекция 9: Електрично поле. Източници. Закон на Кулон. Интензитет и потенциал на електричното поле

До тук се запознахме с основните идеи и закони на Класическата и Релативистката Механика, които изучават гравитационното взаимодействие. Масата (или още гравитационният заряд) на телата е причина за гравитационното привличане между тях и поражда гравитационно поле (виж Лекция 3; дефиницията за силово поле). Електромагнитното взаимодействие се описва от Класическата и Квантовата Електродинамика. Причина за електромагнитното взаимодействие е електричният заряд. Около електрически заредените тела възниква електромагнитно поле. Ще навлезем в същността на електромагнитното взаимодействие като правим аналогия с гравитационното.



Фигура 9-1

Ако две тела с маси m_1 и m_2 се намират на разстояние r , то Нютоновата сила на взаимодействие между тях (виж Лекция 2 (2-4)) е:

$$|\vec{F}_N| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad 9-1$$

където $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ е гравитационната константа. Ако двете тела притежават електричен заряд съответно q_1 и q_2 , то електричното взаимодействие (ако зарядите са точкови и неподвижни) се описва от закона на Кулон (Фигура 9-1 a):

$$|\vec{F}_C| = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad 9-2$$

където $k_e = 1/4\pi\epsilon_0 = 9 \times 10^9 \text{ mF}^{-1}$ е електричната константа, а $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ е диелектричната проницаемост на вакуума. Аналогията между двата закона е очевидна; като заменим в (9-1) масите (гравитационните заряди) на телата с електричните им заряди, и G с k_e , получаваме (9-2). Гравитационната и електричната константи показват интензивността на двете взаимодействия. Но докато k_e има ясен физичен смисъл, изразява електричните свойства на вакуума, то гравитационните свойства на вакуума не са изучени още.

По-интересен за практиката е случаят, когато тяло със значителна маса M (примерно Земята) създава гравитационното поле (Лекция 3), а с помощта на друго пробно тяло с маса $m \ll M$ измерваме това поле (Фигура 9-1 b). Гравитационната сила (виж 2-4), която изпитва пробното тяло е:

$$\vec{F}_N = -G \frac{Mm}{r^2} \vec{e}_r \quad 9-3$$

$\hat{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{r}$ е единичния радиус-вектор, а знакът „-“ означава привличане.

Силата, действаща на единица пробен заряд във всяка една точка на дадено силово поле се нарича *интензитет* на това поле. Следвайки тази обща дефиниция за интензитета на гравитационното поле получаваме:

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{F}_N}{m} = -G \frac{M}{r^2} \hat{e}_r \quad 9-4$$

В частност, когато се разглежда системата тяло – Земя, \mathbf{g} се нарича *земно ускорение*.

Ако в електрично поле създадено от тяло със заряд Q (Фигура 9-1 *b*) внесем пробно тяло със заряд $q \ll Q$, то електричната сила, която ще изпитва пробното тяло ще бъде:

$$\mathbf{F}_C = \pm k_e \frac{Qq}{r^2} \hat{e}_r \quad 9-5$$

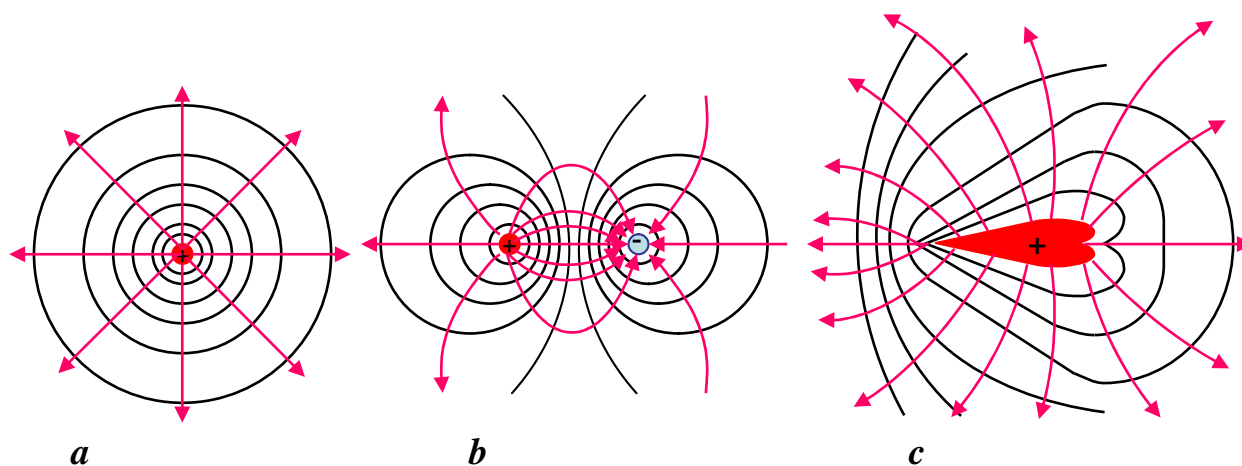
Електричните заряди са два вида „+“ и „-“, затова \mathbf{F}_C може да бъде на отблъскване или на привличане. Интензитетът на електричното поле ще бъде:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_C}{q} = \pm k_e \frac{Q}{r^2} \hat{e}_r \quad 9-6$$

Както гравитационното, така и електричното поле е потенциално (виж Лекция 3), т.е.:

$$\mathbf{E} = -\nabla j, \quad j = k_e \frac{Q}{r^2} \quad 9-7$$

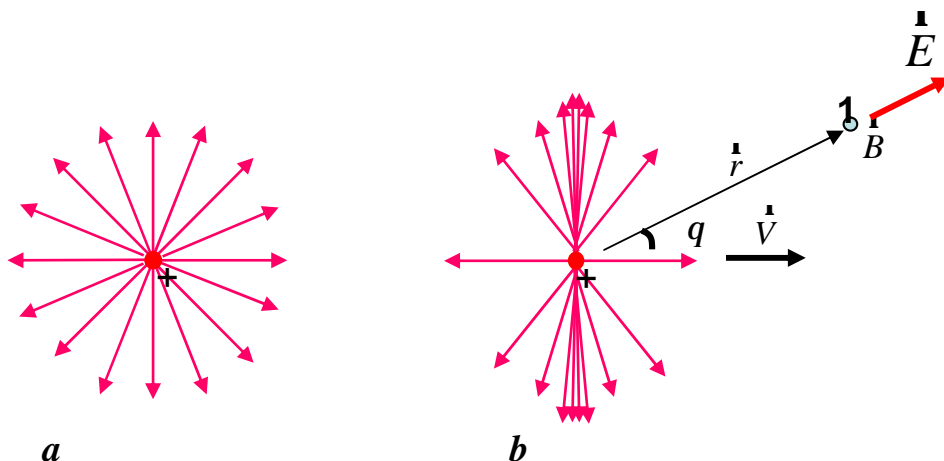
Съвкупността от точки в пространството с един и същ потенциал ($j = \text{const}$) образуват екипотенциални повърхности. За онагледяване на пространствената конфигурация на електричното поле се използват силовите линии на интензитета. Това са мислени линии, чиято плътност в дадена област от пространството е пропорционална на големината на интензитета в тази област, а допирателната към тях в дадена точка показва посоката на интензитета в тази точка. Силовите линии на интензитета пресичат перпендикулярно екипотенциалните повърхности. Силовите линии на интензитета и сечението на екипотенциалните повърхности с равнината на листа са показани на Фигура 9-2 за положителен точков заряд (Фигура 9-2 *a*); за електричен дипол (Фигура 9-2 *b*); и за положително заредено острие (Фигура 9-2 *c*).



Фигура 9-2

Лекция 10: Магнитно поле. Източници. Закон на Био-Савар. Закон на Ампер. Сила на Лоренц

Законът на Кулон (9-5) важи за неподвижни точкови заряди. Силовите линии на интензитета на неподвижен точков заряд притежават централна симетрия (Фигура 10-1 а).



Фигура 10-1

Ако зарядът се движи със скорост \vec{v} , поради свиване на пространството по посока на движението (6-4), централната симетрия на електричното му поле се нарушава и преминава в осева симетрия (Фигура 10-1 b). Нека означим интензитета на неподвижен заряд (9-6) с \vec{E}_C . Тогава интензитетът на електричното поле в точка 1 (покрай която зарядът преминава със скорост \vec{v}) в момента t е:

$$\vec{E} = \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 q\right)^{3/2}} \vec{E}_C \quad 10-1$$

Следователно при движението на електричен заряд пространствено-временната симетрия на електричното му поле се нарушава. Възниква магнитно взаимодействие, което е релативистки ефект и зависи от избора на ИКС. Източници на магнитното поле са движещите се електрични заряди.

Магнитната индукция в точка 1 в момента t е:

$$\vec{B} = k_m \frac{q}{r^2} \vec{v} \times \vec{e}_r, \quad 10-2$$

където $k_m = m_0 / 4p = 10^{-7}$ Н/м е магнитната константа, а $m_0 = 4p \times 10^{-7}$ Н/м е магнитната проницаемост на вакуума. Посоката на вектора \vec{B} в разглеждания случай е от листа към нас (виж Лекция 4 (*)).

Отношението на електричната (9-2) към магнитната константа на вакуума е:

$$\frac{k_e}{k_m} = \frac{1}{e_0 m_0} = \frac{9 \times 10^9}{10^{-7}} = 9 \times 10^{16} = c^2 \quad 10-3$$

Следователно магнитното взаимодействие на движещите се заряди с виртуалните частици на вакуума е c^2 пъти по-слабо от електричното. Тъй като в Природата почти не се срещат

неподвижни електрически заряди, то електричното взаимодействие между движещите се заряди винаги е съпроводено и с магнитно взаимодействие между тях, поради което взаимодействието се нарича *електромагнитно*.

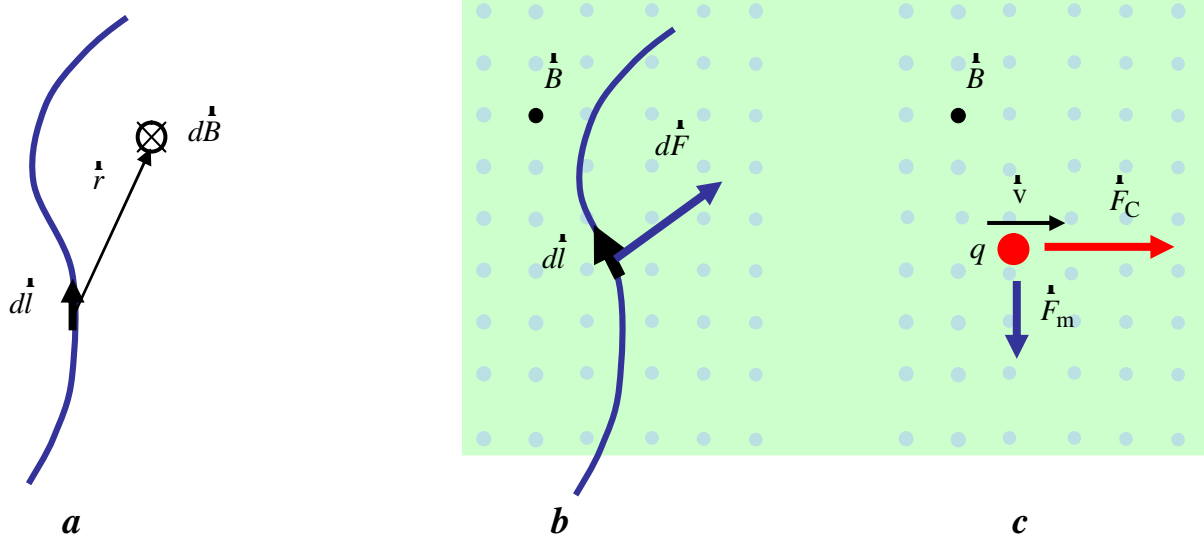
На практика най-често имаме работа не с единични движещи се заряди, а с проводник по който тече ток с големина I . Законът на Био-Савар (10-4) описва индукцията на магнитното поле $d\vec{B}$, дължаща се на елемент $d\vec{l}$ от проводник, по който тече ток I на разстояние \vec{r} от $d\vec{l}$ (Фигура 10-2 а).

$$d\vec{B} = k_m \frac{I}{r^2} d\vec{l} \times \vec{e}_r \quad 10-4$$

За да намерим индукцията \vec{B} , дължаща се на целия проводник, трябва да интегрираме по $d\vec{l}$ (10-4). Ако проводникът, по който тече ток I , се намира във външно магнитното поле с индукция \vec{B} (Фигура 10-2 б), то на елемент $d\vec{l}$ от проводника ще действа магнитна сила $d\vec{F}$, съгласно закона на Ампер (10-5).

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad 10-5$$

И тук силата \vec{F} , действаща на целия проводник, можем да получим чрез интегриране на (10-5) по $d\vec{l}$.



Фигура 10-2

Важен за практиката е случаят на ускоряване на заредени частици в съвременните ускорители за изследователски или медицински нужди. Първоначално, заредените частици се ускоряват в линеен ускорител под действието на електрично поле (закон на Кулон). След това, частиците навлизат в циклотрон, където под действието на магнитно поле се завъртат в кръг (закон на Ампер), тъй като магнитната сила е насочена винаги перпендикулярно на скоростта \vec{v} (Фигура 10-2 с). Силата на Лоренц (10-8) е сума от Кулоновата (10-6) и Амперовата (10-7) сили и описва движението на заредена частица в електромагнитно поле.

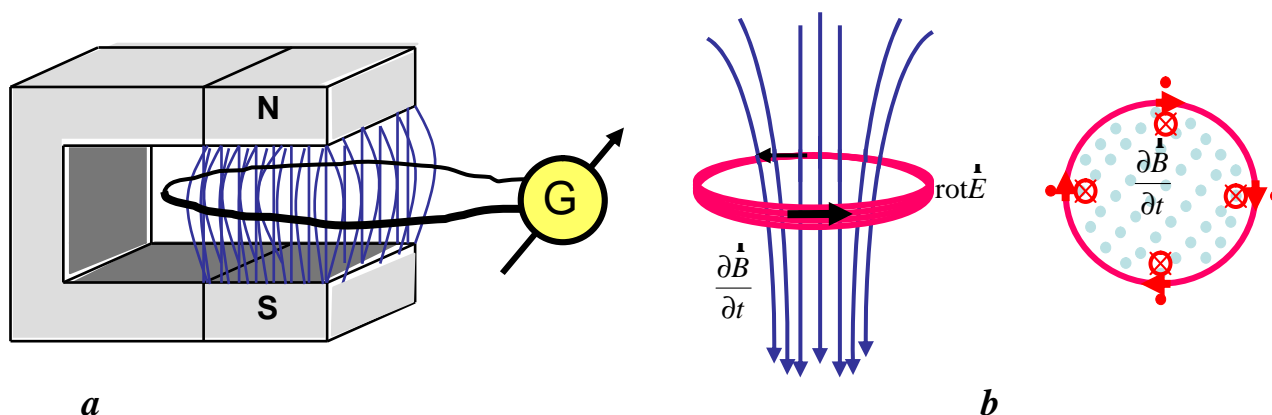
$$\vec{F}_C = q\vec{E} \quad 10-6$$

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \quad 10-7$$

$$\vec{F} = \vec{F}_C + \vec{F}_m = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad 10-8$$

Лекция 11: Електромагнитна индукция. Закон на Фарадей

През 1820 година датският физик Х. Оерстед открива, че около проводник, по който тече ток възниква магнитно поле. За това свое откритие Оерстед получава Нобелова награда, а Био и Савар описват явлението количествено (виж 10-4). Веднага след откритието на Оерстед, английският физик М. Фарадей започва експеримент по доказване на обратния ефект, т.е. външно магнитно поле трябва да индуцира в проводник електричен ток. В магнитното поле на постоянен магнит той поставил проводников контур свързан с галванометър (Фигура 11-1 *a*). Но ток през контура не протичал. Цели 10 години са били необходими на Фарадей за да установи през 1831г., че не магнитното поле, а неговата промяна във времето води до индукцията на електричен ток в проводниковия контур.



Фигура 11-1

Историята разказва, че голяма заслуга за това откритие имал неговият прислужник, който почиствайки кабинета му по невнимание бутнал магнита и Фарадей забелязал, че стрелката на галванометъра реагирала. Заслугата на Фарадей е в неговата твърда убеденост в съществуването на ефекта и завидната му упоритост. Причината Фарадей да загуби цели 10 години за достигане до истината е в погрешната концепция за същността на магнитното поле, възприета по това време (19 век). Смятало се, че магнитното поле е обективно съществуващо, независимо от електричното поле и се създава от магнитни заряди. Даже цял раздел от Физиката бил развит – „Магнитостатика”. В началото на 20 век, както видяхме в Лекция 10, се поставя началото на Релятивистката Електродинамика, която на базата на СТО показва, че магнитното взаимодействие е релятивистки ефект.

Законът на Фарадей има следния математически израз:

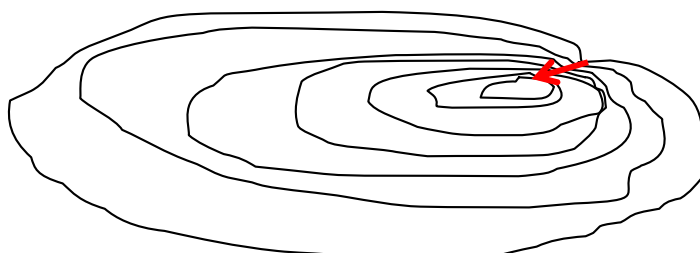
$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad , \quad 11-1$$

$\text{rot} \vec{E}$ описва вихровото електрично поле ^(*), $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ описва промяната на магнитното поле с времето. Знакът “-” изразява правилото на Ленц (Фигура 11-1 *b*), което гласи: *посоката на индуцирания ток е такава, че магнитното поле, което той създава, да се противопостави на външното магнитно поле.*

Следователно всяка промяна на магнитното поле с времето, поражда вихрово електрично поле.

(*)

В Лекция 3 въведохме векторния пространствен диференциален оператор ∇ (виж 3-11).



Фигура 11-2

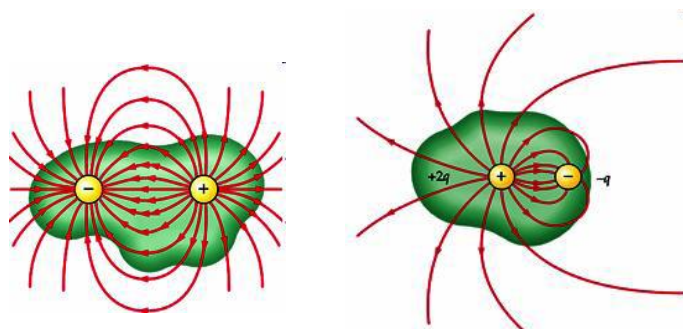
Ако искаме да опишем промяната на дадена функция в пространството (Фигура 11-2), прилагаме към нея ∇ , като резултатът е вектора *градиент* (grad), който показва посоката на най-бързото нарастване в пространството на тази функция (11-2).

$$\nabla j(\vec{r}, t) = \text{grad} j(\vec{r}, t), \text{ вектор с компоненти: } \left(\frac{\partial j}{\partial x}, \frac{\partial j}{\partial y}, \frac{\partial j}{\partial z} \right) \quad 11-2$$

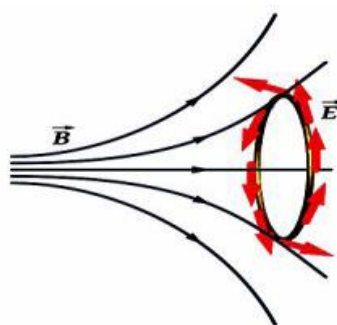
Ако приложим ∇ скаларно към вектор \vec{b} (11-3), резултатът е скалара *дивергенция* (div), който показва конфигурацията на силовите линии на вектора \vec{b} през затворена повърхност. На Фигура 11-3 *a* е показана *дивергенцията* на силовите линии на \vec{E} през затворена повърхност около електричен дипол и около два заряда с големина $+2q$ и $-q$.

$$\nabla \cdot \vec{b} = \text{div} \vec{b}, \text{ скалар} \quad 11-3$$

В първия случай, колкото силови линии пробождат повърхността от вътре на вън, толкова се връщат обратно, поради което $\text{div} \vec{E} = 0$. Във втория случай това не е така и $\text{div} \vec{E} > 0$.



a



b

Фигура 11-3

Ако приложим ∇ векторно към вектор \vec{E} (11-4), резултатът е вектора *ротация* (rot), който показва завихрянето на силовите линии на вектора \vec{E} (Фигура 11-3 *b*).

$$\nabla \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E}, \text{ вектор} \quad 11-4$$

/за свойствата на векторното произведение на два вектора виж приложението към Лекция 4/

Лекция 12: Енергия на електромагнитното поле. Уравнения на Максвел

Законът на Кулон (9-5) описва електричното взаимодействие между неподвижни точкови заряди във вакуум. За изучаването на взаимодействието на електричното поле с дадена материална среда се използва по-обща векторна характеристика на полето – електрична индукция \vec{D} .

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}, \quad 12-1$$

където ϵ е относителната диелектрична проницаемост на средата. За описанието на магнитното поле във вакуум е удобно използването на векторната характеристика – интензитет на магнитното поле \vec{H} .

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad 12-2$$

където μ е относителната магнитна проницаемост на средата.

Всяко движение на заряди (електрично трептене) генерира електромагнитно поле, което се разпространява в пространство-времето (електромагнитна вълна). Плътноста на енергията (енергията в единица обем) на електромагнитното поле е:

$$w = \frac{\vec{E} \cdot \vec{D}}{2} + \frac{\vec{H} \cdot \vec{B}}{2}, \quad 12-3$$

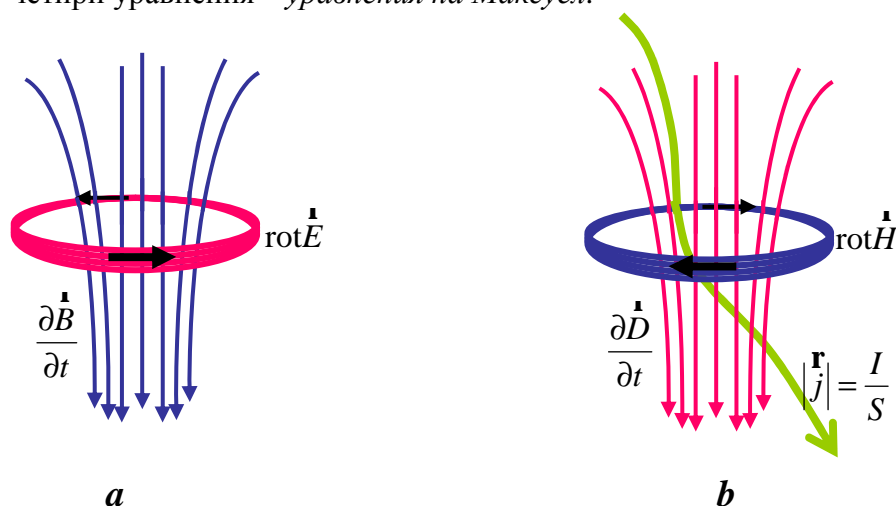
където $\frac{\vec{E} \cdot \vec{D}}{2}$ е плътността на енергията на електричното поле, а $\frac{\vec{H} \cdot \vec{B}}{2}$ – на магнитното.

Като използваме (12-1) и (12-2), можем да изразим w само чрез интензитетите на електричното и магнитното поле (12-4) или само чрез техните индукции (12-5).

$$w = \frac{\epsilon_0 \epsilon \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu \vec{H}^2}{2}, \quad 12-4$$

$$w = \frac{\vec{D}^2}{2\epsilon_0 \epsilon} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0 \mu} \quad 12-5$$

Всяко електромагнитно взаимодействие, електромагнитно поле в дадена материална среда или разпространението на електромагнитна вълна, може да се опише със система от четири уравнения – уравнения на Максвел.



Фигура 12-1

Първото уравнение на Максвел (12-6) изразява закона на Фарадей (Фигура 12-1 a).

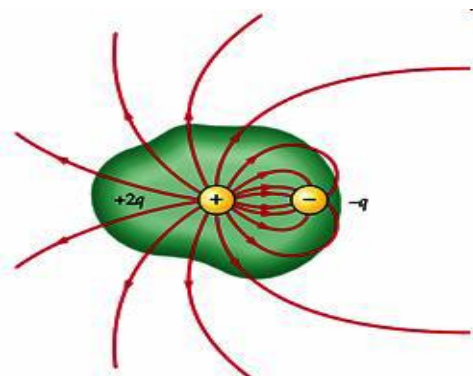
$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad 12-6$$

всяка промяна на магнитното поле с времето, поражда вихрово електрично поле.

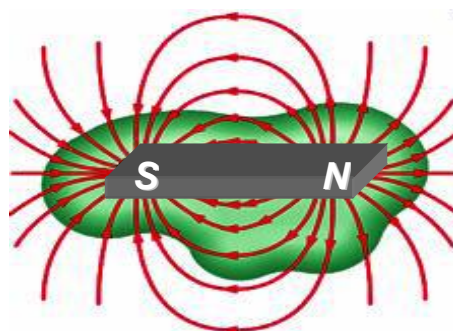
Второто уравнение на Максвел (Фигура 12-1 b) описва обратния ефект: всяка промяна на електричното поле с времето, както и протичането на електричен ток, поражда вихрово магнитното поле (12-7).

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad 12-7$$

където $|\vec{j}| = I/S$ е плътността на електричния ток.



a



b

Фигура 12-2

Третото уравнение на Максвел (Фигура 12-2 a) описва факта, че електричното поле е потенциално (12-8).

$$\text{div} \vec{D} = r, \quad 12-8$$

където $r = \frac{\sum q_i}{V}$ е плътността на електричния заряд вътре в затворената повърхност.

Разбира се електричното поле освен потенциално може да бъде и вихрово (12-6), но важното е, че то се създава от електрични заряди и обективно съществува. За разлика от електричното, магнитното поле може да бъде само вихрово (Фигура 12-2 b). Това е и смисълът на четвъртото уравнение на Максвел (12-9).

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad 12-9$$

/ за свойствата на ротацията ($\text{rot} \vec{E}, \text{rot} \vec{H}$) и дивергенцията ($\text{div} \vec{D}, \text{div} \vec{B}$) виж приложението към Лекция 11 /

Лекция 13: Термодинамична система. Уравнение за състоянието на идеален газ. Първи принцип на Термодинамиката

В лекциите от 1 до 12 разгледахме гравитационното и електромагнитното взаимодействие чрез идеализирани системи от две тела (система отправно тяло – материална точка; система тяло – Земя; система от два точкови заряда и т.н.). Термодинамиката разглежда на макро ниво реални системи, състоящи се от много на брой частици. Тя е важен раздел от Физиката, защото е най-близо до ежедневната ни практика.

Основните идеи и закони на Термодинамиката се изразяват в два постулата и три принципа. Но преди да пристъпим към тяхното обсъждане ще въведем някои необходими категории.

Термодинамична Система (ТДС): система от N на брой частици ($N \gg 1$) с размери много по-малки от размерите на Вселената.

Идеален газ (ИГ): ТДС състояща се от материални точки.

1 mol: количество вещество от ТДС, което съдържа толкова частици, колкото атоми има в 12 грама ^{12}C . Числото на Авогадро N_A е броя на частиците в 1 mol.

$$N_A = 6,002 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad 13-1$$

Затворена ТДС (ЗТДС): ТДС, която взаимодейства с околната среда, но не обменя вещество с нея.

Изолирана ТДС (ИТДС): ЗТДС, която не взаимодейства с околната среда.

Първи постулат на Термодинамиката: Всяка ИТДС с течение на времето достига *състояние на равновесие* и остава в него произволно дълго време.

Втори постулат на Термодинамиката: За описване състоянието на равновесие е необходимо и достатъчно въвеждането на вътрешен параметър – *температура* T .

Температурата на ТДС в състояние на равновесие е мярка за интензивността на топлинното движение (т.е. кинетичната енергия) на атомите и молекулите образувачи ТДС. За описване на състоянието на ИГ (най-простата ТДС) са необходими освен температурата T , още два макро параметъра: *налягане* p и *обем* V . Връзката между тях се нарича *уравнение за състоянието на ИГ* (13-2).

$$\text{УСИГ: } pV = \frac{m}{M} RT, \quad 13-2$$

където M е масата на 1 mol ИГ, а m е цялата маса на ИГ в ТДС. За 1 mol ИГ (т.е. $m = M$) следва:

$$\text{УСИГ: } pV = RT \quad 13-3$$

$$R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad 13-4$$

е универсалната газова константа, която е равна на *работата извършена от 1 mol ИГ при изобарно нагряване с 1 градус*. Работата, извършена от една частица от ИГ (при тези условия) ще получим, като разделим R на N_A .

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad 13-5$$

k се нарича константа на Болцман.

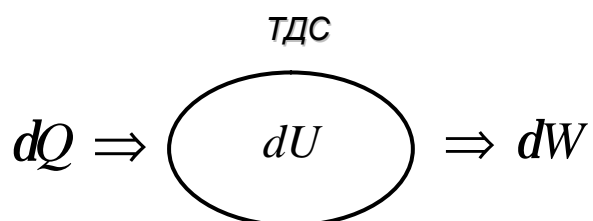
За илюстриране на термодинамични състояния и процеси, най-често се използват p/V диаграми (по абсцисата се нанася обема V на ТДС, а по ординатата – налягането p). В p/V диаграмата всяка точка изобразява термодинамично състояние на ТДС, а всяка крива – термодинамичен процес.

Елементарната работа dW , която една ТДС извършва (или се извършва върху ТДС), води до промяна в налягането p и обема V на ТДС:

$$dW = pdV \quad 13-6$$

Първи принцип на Термодинамиката: Всяко състояние на ТДС се характеризира с вътрешна енергия U , така че внесената в ТДС топлина dQ (Фигура 13-1) да отива за повишаване на вътрешната енергия с dU и за извършване от ТДС на работа dW .

$$dQ = dU + dW \quad 13-7$$



Фигура 13-1

Обозначенията на елементарната работа с dW и това на елементарното количество топлина с dQ показват, че dW и dQ са Пфаф форми (виж приложението към Лекция 3).

Лекция 14: Изопроцеси. Топлинен капацитет. Работа на идеален газ при различните изопроцеси

Изопроцеси са тези термодинамични процеси, при които един от параметрите: температурата T , обема V , налягането p или ентропията S се запазват постоянни.

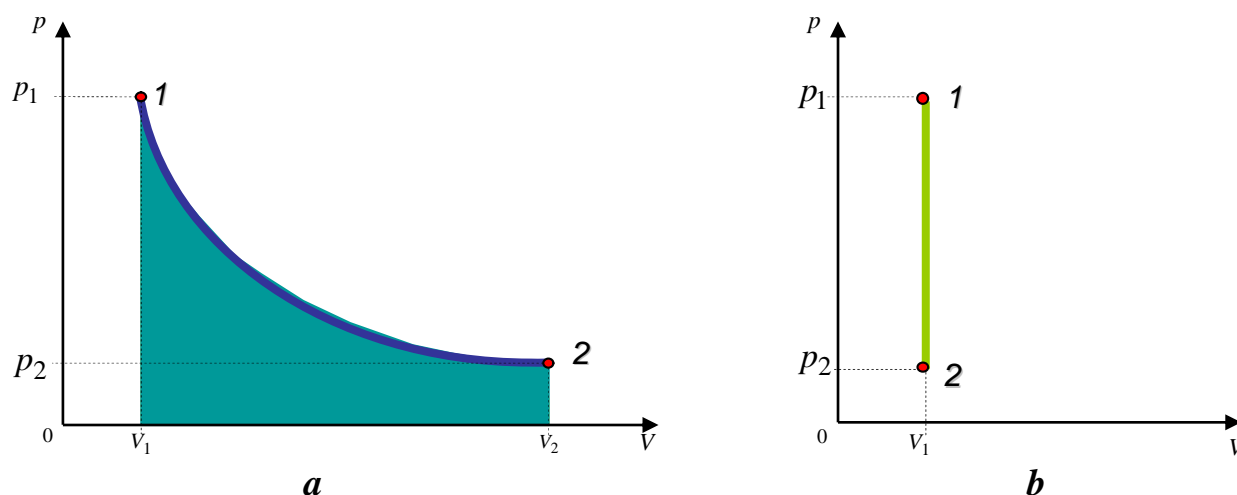
Освен изброените параметри, една ТДС се характеризира и с топлинния си капацитет. *Топлинен капацитет* е количеството топлина, необходимо да се придаде на ТДС, за да повиши температурата си с един градус (14-1).

$$C_{\alpha} = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_{\alpha}, \quad 14-1$$

където α индексира съответния термодинамичен процес.

Ще разгледаме конкретния вид на УСИГ (13-3), работата на ТДС (13-6) и нейния топлинен капацитет (14-1) при различните изопроцеси на ИГ.

Изотермичен процес: това е термодинамичен процес, който се извършва при постоянна температура $T = \text{const}$. Фигура 14-1 *a* изобразява изотермично разширение на ИГ от



Фигура 14-1

състояние 1 (p_1, V_1) до състояние 2 (p_2, V_2). УСИГ при изотермичен процес има вида:

$$pV = \text{const} \quad 14-2$$

Работата W , извършена от ИГ при изотермичното му разширение от обем V_1 до обем V_2 ще получим, като интегрираме (13-6):

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad 14-3$$

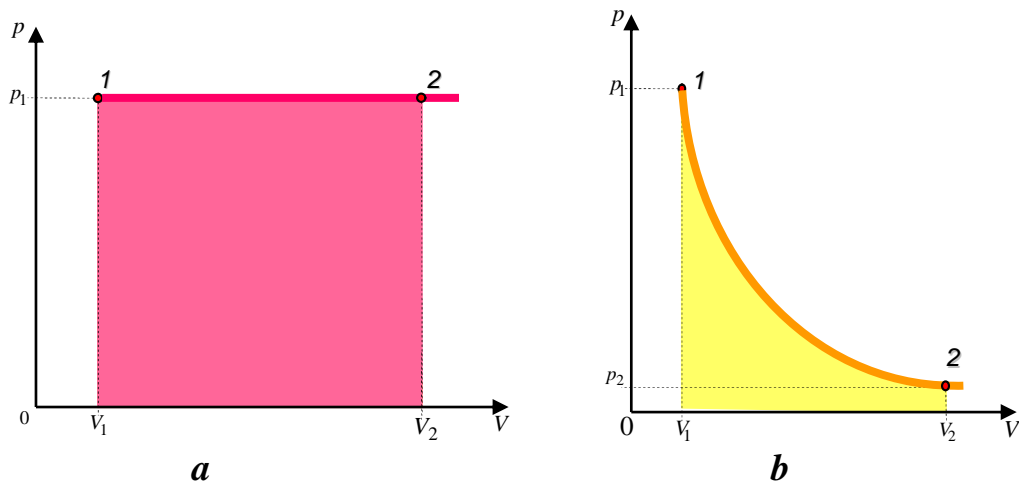
Графически работата W е равна на площта под кривата (Фигура 14-1 *a*) на изопроцеса и е положителна (т.е. извършва се от ТДС) ако ИГ се разширява. Ако ИГ се свива, то работата W е отрицателна (т.е. върху ТДС се извършва работа за намаляване на обема ѝ). От (14-1) за топлинния капацитет при $T = \text{const}$ (т.е. $dT = 0$) ще получим $C_T = \infty$. В духа на изказаната дефиниция за топлинен капацитет обаче, този резултат няма ясен физически смисъл.

Изохорен процес (топлообмен): това е термодинамичен процес, който се извършва при постоянен обем $V = \text{const}$. Фигура 14-1 *b* изобразява изохорно понижаване на налягането на ИГ от състояние 1 (p_1, V_1) до състояние 2 (p_2, V_1). УСИГ при изохорен процес има вида:

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad 14-4$$

От (13-6), както и от Фигура 14-1 *b* се вижда, че при изохорния процес не се извършва работа, $W = 0$. От (14-1) и (13-7) за топлинния капацитет при $V = \text{const}$ следва:

$$C_V = \frac{dU}{dT} \quad 14-5$$



Фигура 14-2

Изобарен процес: това е термодинамичен процес, който се извършва при постоянно налягане $p = \text{const}$. Фигура 14-2 *a* изобразява изобарно разширение на ИГ от състояние 1 (p_1, V_1) до състояние 2 (p_1, V_2). УСИГ при изобарен процес има вида:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad 14-6$$

От (13-6), както и от Фигура 14-2 *a* се вижда, че при изобарния процес се извършва най-много работа от ИГ (14-7).

$$W = p(V_2 - V_1) \quad 14-7$$

За топлинния капацитет при $p = \text{const}$ следва (14-8).

$$C_p = C_V + R \quad 14-8$$

Изоентропичен процес (адиабатен): това е термодинамичен процес, който се извършва при постоянна ентропия (виж Лекция 15) $S = \text{const}$. Фигура 14-2 *b* изобразява адиабатно разширение на ИГ от състояние 1 (p_1, V_1) до състояние 2 (p_2, V_2). За УСИГ следва:

$$pV^k = \text{const} \quad 14-9$$

където $k = \frac{C_p}{C_V} = \frac{C_V + R}{C_V} > 1$, поради което адиабатата е по-стръмна от изотермата.

При адиабатния процес $dQ = 0$ и от (13-7) следва, че ИГ извършва работа за сметка само на намаляването на вътрешната си енергия:

$$dW = -dU \quad 14-10$$

Лекция 15: Ентропия. Втори принцип на Термодинамиката. Трети принцип на Термодинамиката

Ентропията S е важна физична и философска категория. Тя е мярка за безпорядък в една ТДС. Статистическата дефиниция на S е:

$$S = k \ln \Omega , \quad 15-1$$

където Ω е статистическото тегло или броя на микросъстоянията, характеризиращи дадено макросъстояние на ТДС; k е константата на Болцман (13-5). Да си представим съд, в който има само 4 частици. Ако преградим съда, то броя на възможните съотношения между частиците останали в лявата и дясната половини ще бъде 5: (0:4), (1:3), (2:2), (3:1) и (4:0). За преградения съд $\Omega = 5$ и от (15-1) пресмятаме ентропията $S = 2,22 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

Термодинамиката формулира промяната на ентропията dS така: *Ентропията расте, когато при внасяне на топлина в ТДС, температурата се запазва постоянна* (15-2).

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad 15-2$$

Ако извадим парче лед от фризера ($T = -20^\circ\text{C}$) и го поставим в съд върху включен котлон, то ще внасяме с времето постоянно количество топлина dQ . Първоначално T ще расте и леда ще се затопля от -20°C до 0°C , при което S не се променя. Когато ледът започне да се топи, T се задържа постоянна ($T = 0^\circ\text{C}$), а S расте (т.е. $dS > 0$) защото новото състояние на ТДС (лед+вода) е с по-голяма степен на безпорядък. Когато цялото парче лед се стопи, T отново ще расте, а S няма да се променя до момента на започване на кипенето.

Втори принцип на Термодинамиката. Философията на този принцип ще разтълкуваме чрез четири различни негови формулировки:

Формулировка на Клаузиус: При топлообмен dQ преминава от по-топлото към по-студеното тяло. Твърдението е частен случай на втория принцип на Термодинамиката и важи за изохорен процес (14-4). Въвеждането му се налага, защото първият принцип на Термодинамиката не забранява охлаждането на по-студено тяло за сметка на затоплянето на по-топло при топлообмен.

Формулировка на Келвин: Не е възможен цикличен термодинамичен процес, при който цялото количество топлина, внесено в ТДС, да се превърне в работа. Т.е. не е възможен перпетуум мобиле (вечен двигател) от втори род (виж Лекция 16).

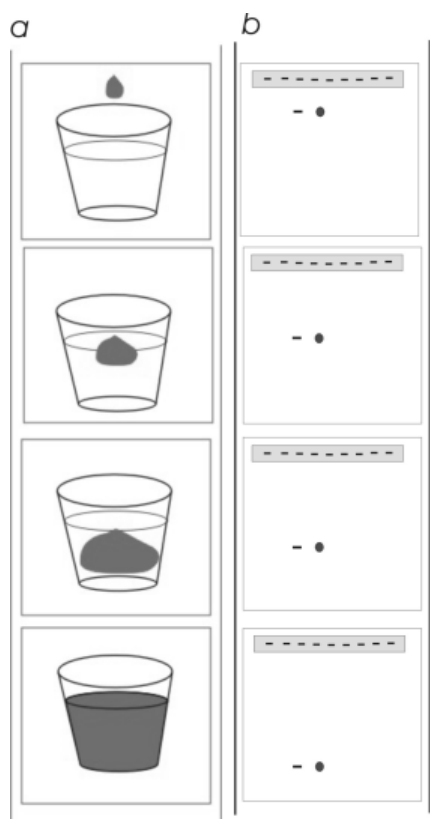
Формулировка на Каратеодори: Пфаф формата dQ е холономна. На пръв поглед тази математическа формулировка няма нищо общо с втори принцип на Термодинамиката и физическият ѝ смисъл е неясен. Една Пфаф форма е холономна, ако за нея съществува интеграционен множител, който да я доведе до пълен диференциал. На езика на Физиката това означава, че за dQ съществува множител $1/T$, който я превръща в пълен диференциал dS (15-2). Следователно именно формулировката на Каратеодори въвежда термодинамичната дефиниция на ентропията.

Статистическа формулировка: В затворена ТДС ентропията не намалява

$$dS \geq 0 , \quad 15-3$$

т.е. времето тече от минало към бъдеще.

Ентропията е не само физична, но и фундаментална философска категория. Нека обсъдим връзката на ентропията със стрелата на времето и съществуването на антиматерия. Да си представим кинолента, на която е заснето разтварянето на капка мастило в чаша с вода (Фигура 15-1 *a*) и друга – на която се вижда как електрон се отдалечава от отрицателно заредена плоча (Фигура 15-1 *b*). Нека кинооператорът пусне лентата да се завърти обратно, т.е. да обърне хода на времето – от бъдеще към минало. В първия случай (Фигура 15-1 *a*), много лесно ще познаем, че времето тече обратно. Защо? Защото дори и да не сме чували



Фигура 15-1

за ентропия, от ежедневиия си опит знаем, че безпорядъкът нараства с течение на времето и то без външна намеса. Т.е. ние разбрахме, че времето тече обратно именно по намаляването на ентропията, което според (15-3) е невъзможно. Подсъзнателно всеки от нас си е дефинирал втория принцип на Термодинамиката приблизително така: *в нашия материален Свят времето тече от минало към бъдеще*.

Ако вторият филм (Фигура 15-1 *b*) се пусне обратно, трудно ще познаем, че стрелата на времето е обърната, защото ентропията на системата плоча – частица не се променя. Видяното можем да обясним по два различни начина:

- (1) *електронът се движи обратно във времето;*
- (2) *електронът се държи като положително заредена частица (позитрон).*

От хипотеза (1) следва, че елементарните частици се движат както по посока, така и обратно на стрелата на времето. Тези, които се движат назад във времето ние „виждаме“ на ускорителите само в момента на тяхното взаимодействие с частиците движещи се по посока на времето. Т.е. антиматерия не съществува. Движение назад във времето означава, че в света на елементарните частици с най-ниска енергия (вакуума), ентропията

за изолирана ТДС никога не нараства $dS \leq 0$. Следователно ще трябва да приемем, че вторият принцип на Термодинамиката се нарушава във вакуума.

Хипотеза (2) дефинира съществуването на антиматерия (позитронът е античастицата на електрона). За всяка частица съществува съответната античастица с противоположен заряд. Движение назад във времето няма; (15-3) се изпълнява и за вакуума, но ще трябва да обясним: *защо материята има доминираща роля пред антиматерията?*

Трети принцип на ТД (теорема на Нернст): този принцип определя граничните условия на приложение на Термодинамиката. Той гласи: **с никакъв процес не е възможно да се достигне до температура $T = 0$ К.**

Да видим как се променя ентропията, когато температурата клони към нула. $T = 0$ К означава, че всякакво движение в ТДС е спряло (т.е. единствено микросъстояние $\Omega = 1$). От (15-1) следва, че когато $T \rightarrow 0$, то $\Omega \rightarrow 1$ и $S \rightarrow 0$. Но от (15-2) следва, че когато $T \rightarrow 0$, то $S \rightarrow \infty$. Това противоречие се отстранява с въвеждането на граничното условие:

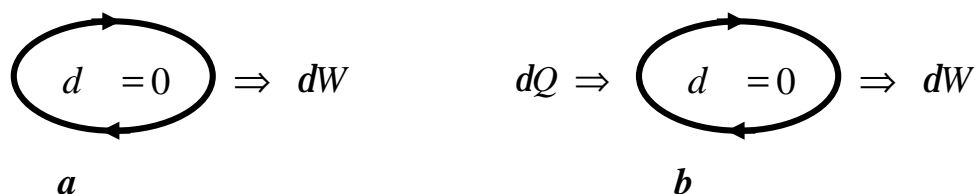
$$\lim_{T \rightarrow 0} S = \text{const}$$

$$T \rightarrow 0$$

15-4

Лекция 16: Вечни двигатели от първи и втори род. Цикъл на Карно

Двигател е ТДС, в която се извършват циклични процеси, като при всеки цикъл ТДС извършва работа и възстановява вътрешната си енергия. Т.е. в края на всеки цикъл $dU = 0$. Двигател, който да работи неограничено дълго време без да черпи енергия от вън, се нарича *перпетуум мобиле от първи род* (Фигура 16-1 а). Многобройни са безплодните опити да се

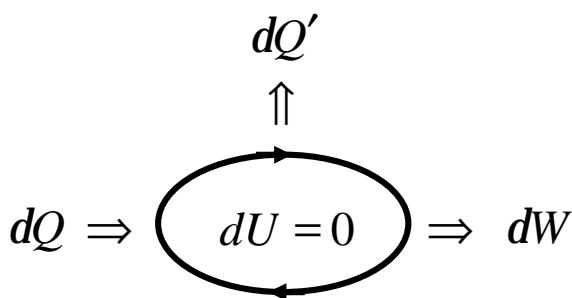


Фигура 16-1

построи перпетуум мобиле от първи род (в периода 13 – 18 век). През 1775 година Парижката Академия на Науките официално се отказва от разглеждане на подобни проекти, въпреки че Термодинамиката още не е била развита като наука. Идеята на перпетуум мобиле от първи род противоречи на закона за запазване на енергията, т.е. на Първия Принцип на Термодинамиката (13-7), който е бил формулиран в средата на 19 век. Ако запишем (13-7) за цикличен процес (т.е. $dU = 0$), следва:

$$dQ = dW \quad 16-1$$

Следователно, според Първия Принцип на Термодинамиката е възможен двигател, при който цялото количество топлина се превръща в работа (16-1). Такъв двигател се нарича *перпетуум мобиле от втори род* (Фигура 16-1 б). Неговото съществуване се забранява от Втория Принцип на Термодинамиката във формулировката на Келвин от 1851 година (виж Лекция 15). И докато опитите да се построи перпетуум мобиле от първи род са преустановени още през 18 век, то усилията за пускане в ход на перпетуум мобиле от втори род продължават и до днес (от неукни ентусиасти), за съжаление с гарантиран неуспех.



При реалния топлинен двигател част от топлината dQ' се извежда от ТДС, за да може тя да се върне в изходното си термодинамично състояние след всеки цикъл (Фигура 16-2). Коефициентът на полезно действие h на реален двигател е:

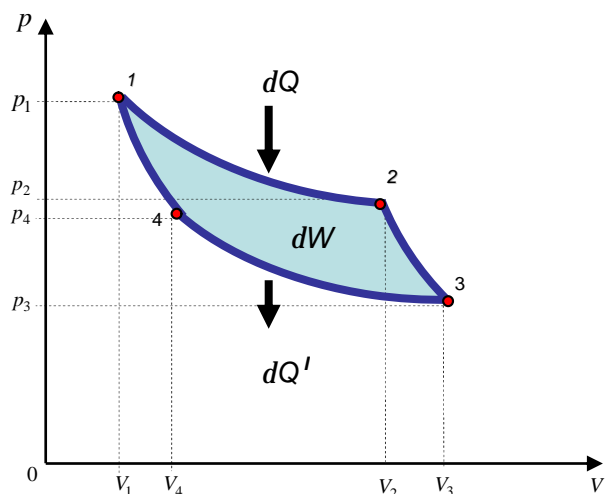
$$h = \frac{dW}{dQ} = \frac{dQ - dQ'}{dQ} < 1 \quad 16-2$$

Фигура 16-2

Инженерите, които продължават да строят перпетуум мобиле от втори род, смятат че достигането до $h=1$ е чисто технологичен проблем, който ще бъде преодолян!...За съжаление, Вторият Принцип на Термодинамиката няма да ни позволи, дори и в най-далечно бъдеще, да построим двигател без загуби.

За пръв път цикличен термодинамичен процес на реален топлинен двигател е бил изследван теоретично през 1824 година от С. Карно. На фигура 16-3 е показана схемата на *цикъла на Карно* в p/V диаграма. Цикълът се състои от четири обратими термодинамични изопроцеси: два изотермични и два адиабатни (виж Лекция 14).

Цикълът на Карно е изиграл важна роля за развитието на Термодинамиката и топло-техниката, като теоретичен инструмент за анализ на коефициента на полезно действие h на реален топлинен двигател. Работната среда в ТДС е идеален газ (ИГ). Последователно се извършват следните изопроцеси:



Фигура 16-3

1) *Изотермично разширение (крива 1 – 2):* От изходно състояние 1(p_1, V_1) ИГ приема от нагревател количество топлина dQ и се разширява изотермично до състояние 2(p_2, V_2), при което извършва работа (виж 14-3):

$$dW_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad 16-3$$

2) *Адиабатно разширение (крива 2 – 3):* От състояние 2(p_2, V_2) ИГ се разширява адиабатно (без топлообмен) до състояние 3(p_3, V_3), при което извършва работа (14-9):

$$dW_{23} = \int_{V_2}^{V_3} p dV^k, \quad 16-4$$

за сметка на намаляване на вътрешната си енергия (14-10).

3) *Изотермично свиване (крива 3 – 4):* От състояние 3(p_3, V_3) ИГ се свива изотермично до състояние 4(p_4, V_4), при което в охладителя се отдава количество топлина dQ' и се извършва отрицателна работа (т.е върху ИГ се извършва работа):

$$dW_{34} = - \int_{V_3}^{V_4} p dV \quad 16-5$$

4) *Адиабатно свиване (крива 4 – 1):* От състояние 4(p_4, V_4) ИГ се свива адиабатно (без топлообмен) до състояние 1(p_1, V_1), при което върху ИГ се извършва работа за повишаване на вътрешната му енергия до изходното ниво:

$$dW_{41} = - \int_{V_4}^{V_1} p dV^k \quad 16-6$$

Работата извършена от ИГ за един цикъл е $dW = dW_{12} + dW_{23} + dW_{34} + dW_{41}$ и графически се изразява със заштрихованата площ на диаграмата (Фигура 16-3).

Лекция 17: Светлината като електромагнитна вълна. Електромагнитен спектър

Всеки вълнов процес се описва с *вълнова функция* $\Psi(\mathbf{r}, t)$, явният вид на която зависи от конкретната вълна. Еволюцията на $\Psi(\mathbf{r}, t)$ в пространство-времето е свързана със скоростта на разпространение на вълната в съответната среда. Всяка вълнова функция удовлетворява *вълновото уравнение*:

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad 17-1$$

където v е скоростта на вълната в средата, в която се разпространява.

Ще приложим уравненията на Максвел (виж Лекция 12) за да докажем, че *ако с трептящи електрични заряди възбудим електромагнитно поле, то в пространство-времето ще се разпространява електромагнитна вълна.*

За неутрална ($\rho = 0$) и непроводяща ($\mathbf{j} = 0$) среда, и като се имат предвид (11-3), (11-4), (12-1), (12-2), (12-6), (12-7), (12-8) и (12-9), системата уравнения на Максвел придобива вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{E} = -m_0 m \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = e_0 e \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{array} \right. \quad 17-2$$

Решаваме системата уравнения (17-2) спрямо \mathbf{E} , като прилагаме векторно оператора ∇ към двете страни на първото уравнение:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -m_0 m \frac{\partial (\nabla \times \mathbf{H})}{\partial t} = -e_0 e m_0 m \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad 17-3$$

Лявата страна на (17-3) преобразуваме, като използваме следното правило от векторната алгебра:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad 17-4$$

От (10-3), (17-3) и (17-4), и като се има предвид, че $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ следва:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{em}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad 17-5$$

По същия начин решаваме системата уравнения (17-2) спрямо \mathbf{H} и получаваме:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{em}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad 17-6$$

Получените уравнения (17-5) и (17-6) са вълнови уравнения за векторите \mathbf{E} и \mathbf{H} . Следователно електромагнитното поле се разпространява като вълна. Ако изберем за посока

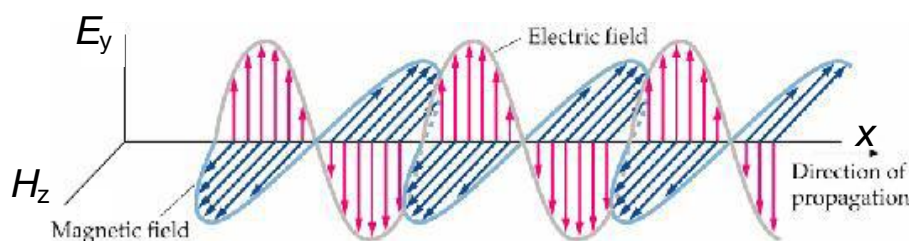
на разпространение на електромагнитната вълна оста x , то решенията на (17-5) и (17-6) са съответно:

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kx + j) , \quad 17-7$$

$$H_z = H_m \cos(\omega t - kx + j) , \quad 17-8$$

където E_m и H_m са амплитудните стойности на интензитетите, ω е кръговата честота, j е началната фаза на трептене, а k е *вълновото число*, което е отношението на ω към скоростта на вълната v и е обратно пропорционално на дължината на вълната λ :

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} , \quad (\omega = 2\pi n ; v = \lambda n) \quad 17-9$$



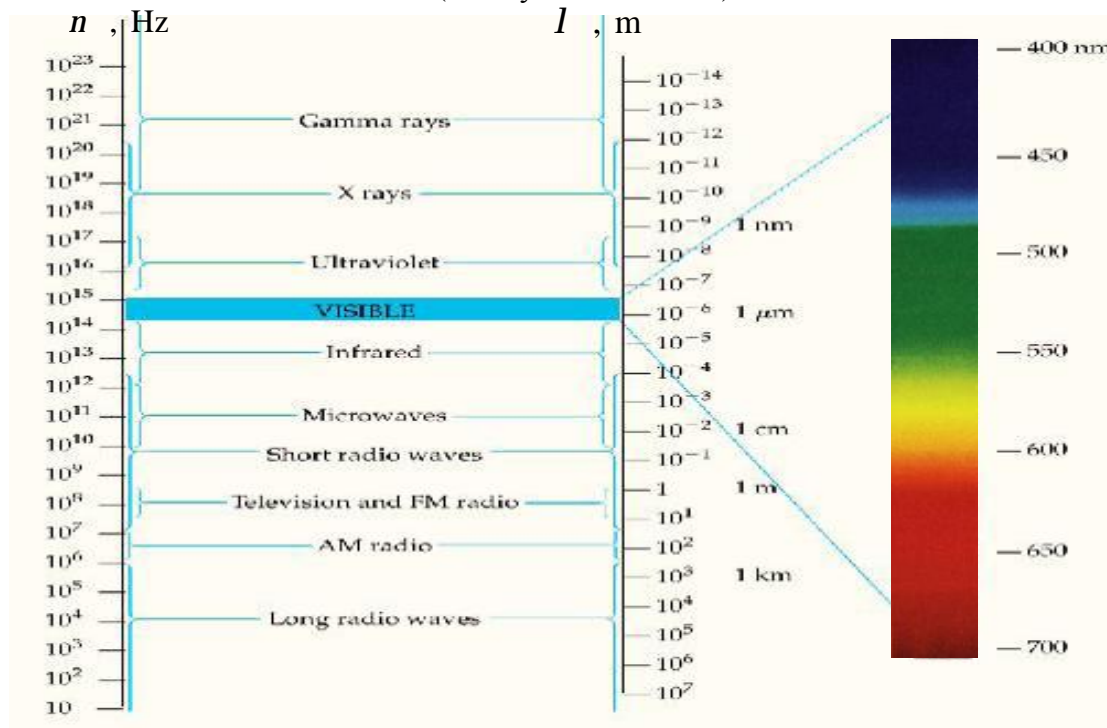
Фигура 17-1

От (17-7) и (17-8) следва, че електромагнитната вълна е напречна, като векторите \vec{E} и \vec{H} трептят в перпендикулярни равнини (Фигура 17-1). Като сравним (17-5) и (17-6) с (17-1) за скоростта на разпространение на светлината в среда със съответните диелектрични (ϵ) и магнитни (μ) свойства, получаваме:

$$\frac{1}{v^2} = \frac{\epsilon\mu}{c^2} , \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} , \quad n = \sqrt{\epsilon\mu} = \frac{c}{v} \quad 17-10$$

където n е *показателят на пречупване* на средата.

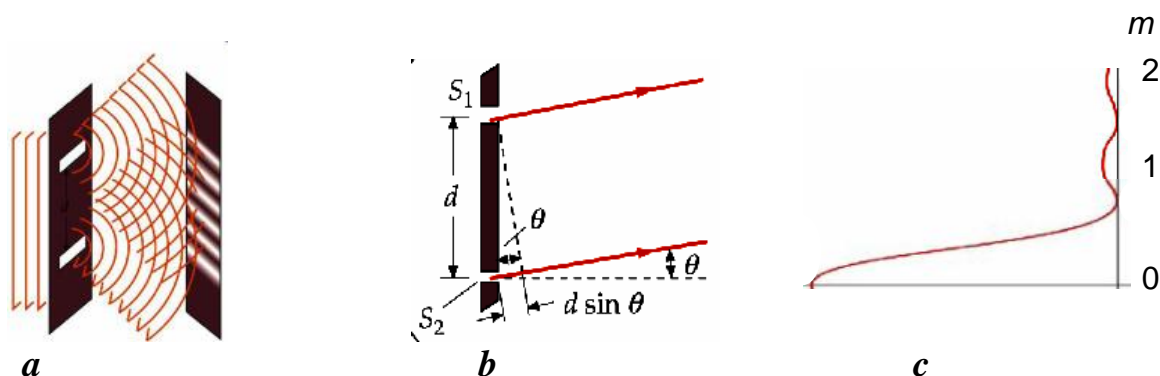
Фигура 17-2 представя електромагнитния спектър. Вижда се, че светлината е една съвсем незначима част от него (между 700 и 400 nm).



Фигура 17-2

Лекция 18: Интерференция. Дифракция. Принцип на Хюигенс - Френел

Интерференция на светлината е била наблюдавана още през 17в. от Нютон, който обаче не е успял да я обясни със своята *корпускулярна теория*. Според Нютон, светлината е поток от частици (корпускули) с различна големина. Правилното обяснение на интерференцията, като типично вълново явление, било дадено от Френел и Юнг в началото на 19в. В опита на Юнг, монохроматична светлина преминава през два тесни процепа (Фигура 18-1a),



Фигура 18-1

които изпълняват ролята на точкови източници. На екрана зад процеците се наблюдават поредица от максимуми и минимуми на интензитета на светлината, вместо геометричната проекция на двата процепа. Светлинните вълни от двата източника ще опишем с (17-7):

$$\begin{cases} E_1 = E_{01} \cos(\omega_1 t - kx + j_1) \\ E_2 = E_{02} \cos(\omega_2 t - kx + j_2) \end{cases} \quad 18-1$$

Ако светлинните вектори \vec{E}_1 и \vec{E}_2 трептят с еднаква честота (т.е. $\omega_1 = \omega_2$) и постоянна в пространство-времето начална фазова разлика (т.е. $dj = j_2 - j_1 = \text{const}$), то вълните са *кохерентни*. Следователно *преразпределението на светлинния поток в пространство-времето при наслагване на кохерентни вълни* се нарича *интерференция*.

Пътят, който светлината изминава в среда с показател на пречупване n (виж 17-10) се нарича *оптичен път* $L = ns$, където s е геометричния път. Разликата в оптичните пътища от двата процепа (Фигура 18-1 b) до m -ти максимум / $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ (Фигура 18-1 c), който се вижда под ъгъл q е :

$$\Delta L = L_2 - L_1 = d \sin q = ml, \quad 18-2$$

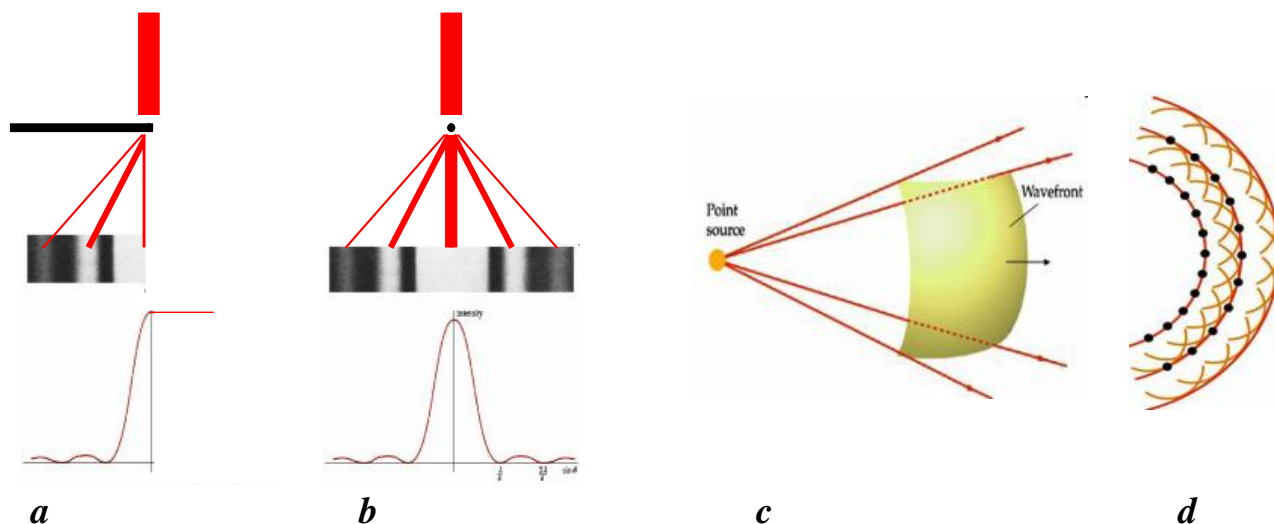
където d е разстоянието между процеците, l е дължината на вълната. Условието за получаването на максимум или минимум върху екрана са съответно:

$$\begin{aligned} \Delta L &= ml \rightarrow \text{max} \\ \Delta L &= \left(m + \frac{1}{2}\right)l \rightarrow \text{min} \end{aligned} \quad 18-3$$

Да разгледаме монохроматична светлина, разпространяваща се покрай преграда (Фигура 18-2 a). Зад преградата, на мястото на геометричната сянка, се наблюдават поредица от максимуми и минимуми (т.е. нарушени са законите на геометричната оптика). Ако на пътя на светлината поставим тънка нишка (Фигура 18-2 b), зад нея отново се

наблюдава дифракционна картина. Дифракция се нарича отклонението на светлината от законите на геометричната оптика при разпространение в среда с резки нехомогенности.

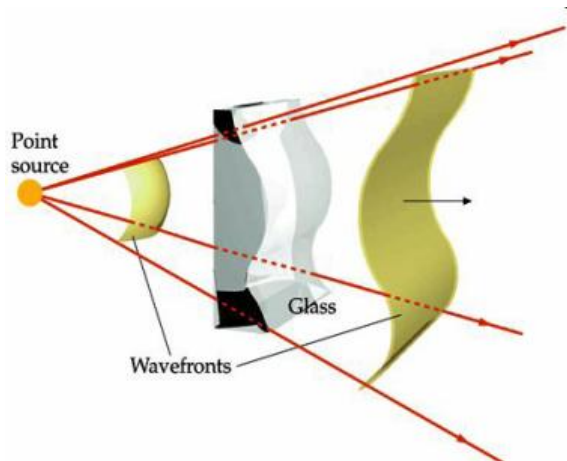
Интерференцията и дифракцията имат една и съща физична същност: преразпределение на светлинния поток в резултат на суперпозиция на кохерентни вълни. За интерференция говорим, когато имаме малък брой дискретни кохерентни източници. При дифракцията, кохерентните източници са разположени непрекъснато (т.е. безкраен брой).



Фигура 18-2

Дифракцията може да бъде обяснена с помощта на принципа на Хюйгенс-Френел: Всеки елемент от вълновия фронт (Фигура 18-2 c) е център на вторична сферична вълна (точков източник). От интерференцията на излъчените сферични вълни се образува новия вълнов фронт (Фигура 18-2 d).

Принципът на Хюйгенс-Френел обяснява качествено граничното поведение на вълните през прегради и отвори. За да се наблюдава дифракционна картина трябва да е изпълнено условие (18-2), т.е. големините на преградите и отворите d , през които светлината преминава, трябва да бъдат от порядъка на дължината на вълната λ . Така тези прегради и



Фигура 18-3

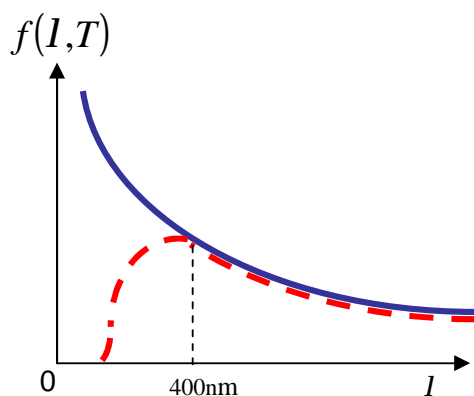
отвори прикриват отделни участъци (т.е. точкови кохерентни източници) от вълновия фронт. В резултат на интерференцията на останалите, неприкрити кохерентни точкови източници се получава, според условие (18-3), дифракционната картина. Когато светлината преминава през среда с по-висока оптична плътност от вакуума (стъкло, вода и др.), нейната скорост на разпространение в тази среда намалява n пъти (виж 17-10). Според геометрията на оптически по-плътната среда, вълновият фронт се деформира (Фигура 18-3), но дифракция при изход в първоначалната среда не настъпва.

Лекция 19: Квантови свойства на светлината. Фотони. Фотоефект

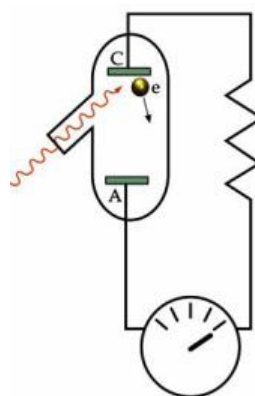
Всяко нагрето тяло излъчва електромагнитни вълни. Температурата на тялото е характеристика на средната кинетична енергия на съставлящите го частици (виж Лекция 13). Следователно спектърът на излъчване зависи от температурата на тялото. Тази зависимост в Класическата Физика се описва от закона на Рейли-Джинс (19-1) и се нарича *излъчвателна способност* на абсолютно черно тяло.

$$f(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^2} kT \quad 19-1$$

където k е константата на Болцман (13-5), а λ е дължината на излъчената електромагнитна вълна. Излъчвателна способност $f(\lambda, T)$ е представена на Фигура 19-1 *a* с непрекъсната крива. Експериментално измерената излъчвателна способност е начертана на същата графич-



a



b

Фигура 19-1

ка с пунктир. Вижда се, че за $\lambda \geq 400\text{nm}$ класическата теория се съгласува отлично с експеримента. За $\lambda < 400\text{nm}$ (т.е. в ултравиолетовата област) обаче, класическата теория противоречи на експеримента. Това противоречие, което не може да бъде обяснено с Класическата Физика, носи наименованието *ултравиолетова катастрофа*. През 1900 г. Макс Планк решава този казус, като поставя началото на Квантовата Механика. Планк изказва хипотезата, че *светлината се излъчва на кванти с енергия*:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}, \quad 19-2$$

където h е константата на Планк, чиито физически смисъл става ясен по-късно. По същото това време Класическата Физика се сблъскала и с друг необясним експериментален факт – *фотоефекта*.

Фотоефектът е открит през 1887г. от Херц. Под действието на светлина, от метален катод (Фигура 19-1 *b*) се избиват електрони (наречени *фотоелектрони*), които се събират от анода – протича *фототок*. Фотоефектът има три особености, които класическата теория не може да обясни:

(1) *Безинертност*: Фотоелектрони се отделят практически едновременно с осветяването (след 10^{-9}s), дори при много малък интензитет $I_{\text{св}}$ на светлината. Според вълновата теория (Лекция 17), на свободните електрони в метала е нужно време за да се ускорят достатъчно в

електричното поле на падащата електромагнитна вълна и да напуснат метала. Колкото по-малък е $I_{\text{св}}$, толкова повече време им е нужно за да се "загреят".

(2) *Червена граница*: За всеки метал съществува максимална дължина на вълната I_0 (в червената област на спектъра), така че за всяка $I > I_0$ фотоефект не се наблюдава, дори при голям $I_{\text{св}}$. Според вълновата теория, фотоефект трябва да възниква при всяка I , стига $I_{\text{св}}$ да е достатъчно голям.

(3) E_k на фотоелектроните не зависи от $I_{\text{св}}$: Максималната кинетична енергия E_k на фотоелектроните не зависи от $I_{\text{св}}$, а само от I . От вълновата теория следва, че E_k на фотоелектроните е пропорционална на $I_{\text{св}}$, защото при нарастване на $I_{\text{св}}$, електричното поле на падащата вълна е по-силно и електроните получават от него по-голяма енергия.

През 1905г. Айнщайн успешно обяснява фотоефекта, като доразвива хипотезата на Планк: *светлината не само се излъчва на кванти, но също така се разпространява и се поглъща на кванти – фотони*. Следователно, един електрон поглъща един фотон и се отделя от метала, ако придобитата енергия е по-голяма от отделителната работа W (минималната работа, която трябва да извърши електрона, за да се откъсне от повърхността на метала).

$$hn = W + E_k \quad 19-3$$

Уравнението на Айнщайн за фотоефекта (19-3) изразява факта, че светлината се поглъща на кванти и в същността си представлява закон за запазване на енергията. Фотон се поглъща мигновено от електрон, което обяснява (1). Ако $hn < W$, фотоефект не се наблюдава, тъй като енергията на фотона не е достатъчна за отделянето на електрона (2). Минималната честота на фотона, при която е възможен фотоефект е:

$$n_{\min} = \frac{W}{h} \quad \text{или} \quad I_0 = \frac{c}{n_{\min}} = \frac{ch}{W} \quad 19-4$$

Фактът, че максималната кинетична енергия E_k на фотоелектроните не зависи от $I_{\text{св}}$ (3) следва от уравнението на Айнщайн (19-3).

През 1916г. Миликен измерва с необходимата точност отделителната работа W за някои от използваните метали и от (19-3) определя h :

$$h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad 19-5$$

$$\mathbf{h} = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

В Квантовата Механика е по-удобно използването на \mathbf{h} , при което (19-3) се записва във вида:

$$\mathbf{h}w = W + E_k, \quad 19-6$$

където $w = 2\pi n$ е кръговата честота.

По-късно се оказва се, че h не е просто коефициент на пропорционалност, а има ясен физичен смисъл, и играе важна роля в Квантовата Механика и Философията: *h е елементарен квант действие* (виж Лекция 3). Така достигаме и до един от най-важните постулати на Квантовата Механика: *Действието се квантува!*

Лекция 20: Идеи на Квантовата Механика. Хипотеза на Де Бройл. Релации на Хайзенберг

Основните предпоставки за възникването на Квантовата Механика са четири експериментални факта, които Класическата Физика не може да обясни:

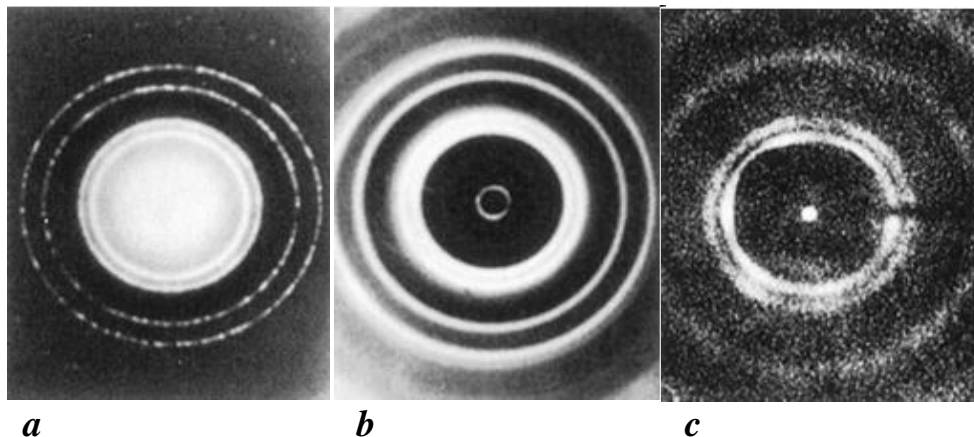
- (1) *Ултравиолетовата катастрофа* (виж Лекция 19).
- (2) *Фотоефектът* (виж Лекция 19).
- (3) *Корпускулярно-вълновият дуализъм на електрона.*
- (4) *Стабилността на атома.*

При интерференция и дифракция (Лекция 18) светлината се държи като вълна, но при фотоефекта (Лекция 19), тя проявява типично корпускулярни свойства – поток от частици. Двойственият характер на светлината се дължи на *корпускулярно-вълновият дуализъм на фотона*. През 1924г. френският физик Луи Виктор Де Бройл изказва хипотезата, че *всички форми на Материята имат свойства както на частици, така и на вълни* (наречени аташирани вълни, или вълни на Де Бройл). Връзката между корпускулярните и вълнови свойства на частиците Де Бройл формулира така: *на всяка движеща се частица с импулс \vec{p} съответства аташирана вълна с дължина:*

$$\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|} \quad 20-1$$

В хипотезата на Де Бройл (20-1) се крие дълбока философия: *корпускулярните и вълновите свойства на частиците са свързани посредством елементарния квант действие h , т.е. взаимодействието на елементарно ниво се осъществява между частици-вълни.*

Първото експериментално доказателство на хипотезата на Луи Де Бройл получават американските физици Клинтън Девисън и Лестър Джермер. През 1927г. те изследват разсейването на електрони от Ni мишена. На фотоплаката, на която се регистрират отразените от Ni повърхност електрони, се наблюдава дифракционна картина. По разположението на дифракционните максимуми (виж 18-3) те определят λ на вълната, причинила тази дифракционна картина. Знаейки скоростта на падащите електрони, Девисън и Джермер пресмятат импулса им $|\vec{p}|$ и доказват връзката (20-1). Техните изследвания доказват също *корпускулярно-вълновият дуализъм на електрона*, който Класическата Физика не може да обясни. През същата 1927г. Томсън получава дифракционна картина (електронограма), като облъчва тънка Au пластина (Фигура 20-1 *a*) с електронен сноп, ускорен до енергия 600eV (което съответства на аташирана вълна с $\lambda = 0,5\text{\AA}$). На Фигура 20-1 *b* е показана за сравнение рентгенограма на Al (X – лъчите имат $\lambda = 0,7\text{\AA}$).



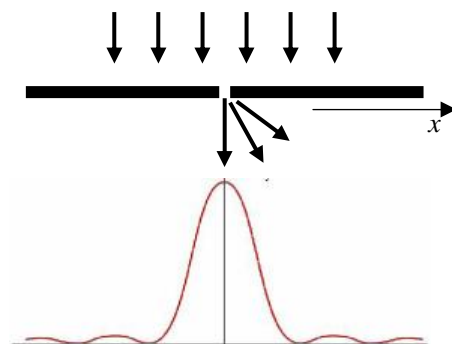
Фигура 20-1

По-късно Томсън осъществява и дифракция (Фигура 20-1 с) с ускорени до енергия 0,0568eV неутрони (което съответства на аташирана вълна с $\lambda = 1,2\text{\AA}$) през тънка пластина от Cu.

Най-важната предпоставка за възникването на Квантовата Механика е неспособността на Класическата Физика да обясни *стабилността на атома*. Според нея, електронът при движението си около ядрото непрекъснато губи кинетична енергия; скоростта му намалява; центробежната сила също намалява; Кулоновата сила нараства; разстоянието до ядрото бързо намалява и накрая електронът пада върху него. Атомът престава да съществува след време от порядъка на няколко μs . Но атомът е стабилен и ние се радваме на Света, в който живеем, изграден от атоми и молекули в най-невероятни комбинации помежду си.

В Класическата Механика за тяло, движещо се по оста x , във всеки момент знаем всички негови динамични параметри (координата x , импулс p_x , енергия E). На микро

частиците не могат да бъдат приписани динамични параметри. Информация за тях получаваме от взаимодействието им с макро обекти (измерителни прибори, детектори) и затова резултатите изразяваме с динамични параметри за макро обекти. Важно основно свойство на микро частиците е, че не можем едновременно да получим точна стойност на всички динамични параметри, които ги характеризират. Ще илюстрираме казаното, като разгледаме дифракцията на електронен сноп от тесен процеп. Нека снопа пада (Фигура 20-2) перпендикулярно на оста x . Какво знаем за положението x и импулса p_x на отделен електрон? Преди да премине през процепа, импулсът на електрона е $p_x = 0$ и съответно неопреде-



Фигура 20-2

леността на импулса му е $\Delta p_x = 0$. Относно неговата координата x , тя е напълно неопределена. Електронът може да се намира навсякъде по оста x и следователно, неопределеността на положението му е $\Delta x = \infty$. В момента на преминаване през процепа с ширина d , неопределеността на координата е $\Delta x = d$, а неопределеността на импулса е:

$$\Delta p_x = p \sin j_1 + p \sin j_2 + p \sin j_3 + p \sin j_4 + \dots, \quad 20-2$$

където p е импулса преди процепа, а $j_1, j_2, j_3, j_4, \dots$ са ъглите, под които се виждат съответно първия, втория, третия и т.н. максимуми (виж Лекция 18). Ако се ограничим само до първи дифракционен максимум от (20-2) ще следва:

$$\Delta p_x > p \sin j_1 \quad 20-3$$

От условието (18-2) за попадане на електрона в първи дифракционен максимум следва,

$$\Delta x \sin j_1 = \lambda \Rightarrow \Delta x = \frac{\lambda}{\sin j_1} \quad 20-4$$

Като умножим почленно (20-3) и (20-4), и вземем предвид (20-1), получаваме:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \quad 20-5$$

Аналогично можем да получим връзка между неопределеността на енергията ΔE и времето Δt , за което електронът се намира в това енергетично състояние:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h \quad 20-6$$

(20-5) и (20-6) изразяват *принципа на неопределеността* (или т.н. релации на Хайзенберг).

Лекция 21: Уравнение на Шрьодингер. Физичен смисъл на вълновата функция

С развитието на атомната спектроскопия става ясно, че атомът поглъща и излъчва енергия дискретно, тъй като в спектъра му се наблюдават отделни линии (линеен спектър), съответстващи на преходите от едно енергетично състояние в друго. Енергията на атома зависи от неговата електронна конфигурация. Състоянието на електрона (частица-вълна) в атома може да се опише с вълнова функция $\Psi(\vec{r}, t)$. Заместването на Ψ в класическото вълново уравнение (17-1) ще доведе до получаването на непрекъснат енергетичен спектър, което противоречи на експеримента. След експерименталното потвърждение на хипотезата на Де Бройл (20-1) и утвърждаването на принципа на неопределеността на Хайзенберг (20-5, 20-6), Квантовата Механика се нуждаела от математичен апарат, който да описва и предсказва енергетичните спектри на квантовите системи. Ако вземем за пример водородния атом, това означава да можем да предскажем всички електронни състояния при неговото възбуждане, ако знаем вълнова функция Ψ на електрона в основно състояние на атома. Така се развил математическият формализъм на Квантовата Механика, чиито основен постулат гласи: *на всяка механична величина се съпоставя оператор**. На координатата x се съпоставя операторът на местоположението \hat{x} ; на импулса \vec{p} – операторът на импулса \hat{p} ; на потенциала U – операторът \hat{U} ; на пълната механична енергия E – операторът на Хамилтън \hat{H} (хамилтонян).

$$\left\{ \begin{array}{l} x \rightarrow \hat{x} \\ p \rightarrow \hat{p} = -i\hbar\nabla \\ U \rightarrow \hat{U} \\ E \rightarrow \hat{H} \end{array} \right. , \quad 21-1$$

където $i = \sqrt{-1}$ е имагинерната единица. От класическия израз за пълната механична енергия:

$$E = \frac{mv^2}{2} + U = \frac{p^2}{2m} + U , \quad 21-2$$

като заменим класическите величини със съответните им оператори от (21-1), за оператора на Хамилтън \hat{H} се получава:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \hat{U} \quad 21-3$$

Ако приложим оператора на пълната енергия \hat{H} към вълновата функция Ψ , описваща състоянието на микрочастица в свързана квантова система, трябва да получим дискретния енергетичен спектър на тази частица. Именно това е идеята на предложеното от Шрьодингер през 1926г. вълново уравнение, носещо неговото име:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \quad 21-4$$

При решаването на уравнението на Шрьодингер (21-4) заместваме хамилтоняна с неговото операторно съответствие от (21-3):

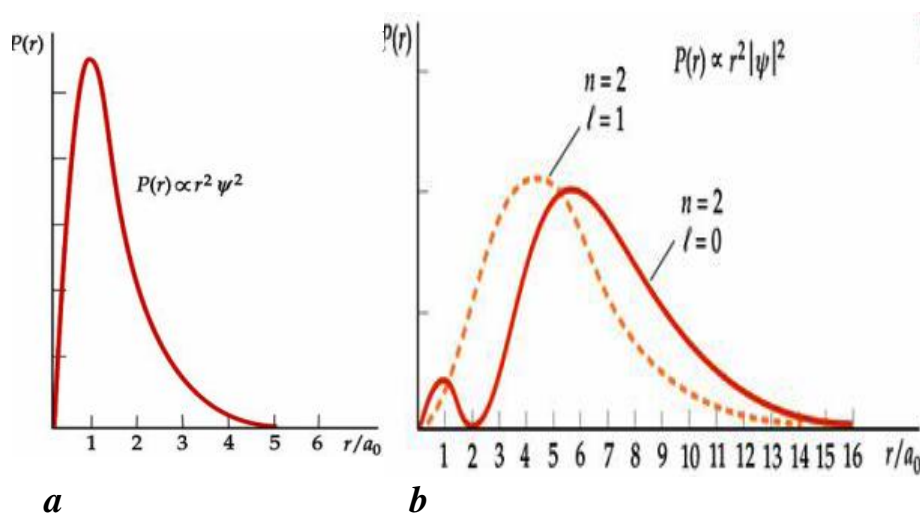
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + \hat{U} \Psi = E \Psi \quad 21-5$$

Уравнение (21-4) се прилага за получаването на енергетичния спектър на частица, чиято вълнова функция $\Psi(x, y, z)$ не се променя с времето. То се нарича *стационарно уравнение на Шрьодингер* и има основна роля в Атомната Физика. В общия случай, когато вълновата функция $\Psi(x, y, z, t)$ се променя във времето (при нестабилни квантови системи), *уравнението на Шрьодингер* има вида:

$$\hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad 21-6$$

Стойностите на енергията E , за които (21-4) има решение, се наричат *собствени стойности*, а функциите Ψ , които го удовлетворяват – *собствени функции*. На дадена стойност на E могат да съответстват повече от една собствени функции. Енергетичният спектър на микрочастицата е именно съвкупността от собствените стойности на E .

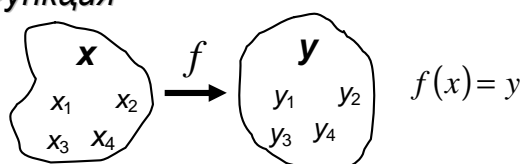
На всяка микрочастица приписваме вълна на Де Бройл (20-1), но тя не е вълна, която се движи заедно с частицата. Вълната на Де Бройл и частицата са един и същ обект. Вълновата функция Ψ описва вълната на Де Бройл, но ясен физичен смисъл има нейния квадрат $|\Psi|^2$, който определя *вероятността частицата да се намира в дадена област от пространство-времето*. Вероятността за намиране на електрона около ядрото на атома на водорода, в основно (a) и първо възбудено (b) състояние, е показана на Фигура 21-1.



Фигура 21-1

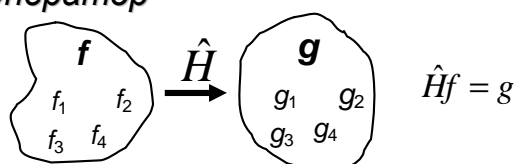
(*) **Оператор**: математическо правило, което приложено към една функция f , дава друга функция g . Операторът борави с функции (Фигура 21-2 b), докато функцията борави с числа (Фигура 21-2 a).

Функция



a

Оператор



b

Фигура 21-2

Лекция 22:

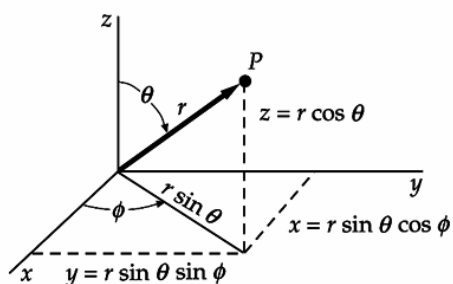
Квантова теория на атома. Квантови числа. Принцип на Паули

В квантовата теория на атома, движението на електрона се описва с *вълнова функция* ψ . Квадратът на вълновата функция $|\psi|^2$ дава вероятността за намиране на електрона в определена област от пространство-времето. Граничните условия, които физичната реалност налага на ψ водят до *квантуване на енергията*.

В атома на водорода H, един електрон с маса m се движи в централно-симетричното поле (с потенциал U) на ядрото. Стационарното уравнение на Шрьодингер за H атом е:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + U\psi = E\psi \quad 22-1$$

За изолиран H атом, потенциалната енергия U на електрона зависи само от разстоянието му до ядрото r . За удобство, уравнение (22-1) се решава аналитично в сферични координати r , θ , и ϕ , които са свързани с декартовите координати x , y , и z както следва (22-2):



$$\begin{aligned} z &= r \cos \theta \\ x &= r \sin \theta \cos \phi \\ y &= r \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad 22-2$$

Фигура 22-1

Частното диференциално уравнение (22-1), като се запише в сферични координати (22-3), позволява да се разделят променливите.

$$-\frac{\hbar^2}{2mr^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\hbar^2}{2mr^2} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \right] + U(r)\psi = E\psi \quad 22-3$$

Вълновата функция се представя като произведение на функции на всяка една от променливите $\psi(r, \theta, \phi) = R(r)f(\theta)g(\phi)$, където R зависи само от координатата r , f зависи само от θ , и g зависи само от ϕ . Така частното диференциално уравнение (22-3) се трансформира в три хомогенни диференциални уравнения, едно за $R(r)$, едно за $f(\theta)$, и едно за $g(\phi)$. Потенциалната енергия $U(r)$ се появява само в уравнението за $R(r)$, което се нарича *радиално уравнение*. Конкретният вид на потенциала $U(r)$ не оказва никакво влияние върху решенията на уравненията за $f(\theta)$ and $g(\phi)$, и следователно не влияе върху ъгловата зависимост на вълновата функция $\psi(r, \theta, \phi)$. Това решение е валидно за всички централно-симетрични случаи, когато потенциалната енергия на електрона зависи само от r . Така се описват всички атоми с един най-външен електрон, т.н. *водородоподобни атоми*.

Когато уравнението на Шрьодингер (22-3) се реши в сферични координати, и се вземе предвид свойството на електрона *спин*, се достига до *четири квантови числа*, които описват резултантната вълнова функция $\psi(r, \theta, \phi)$ на електронния облак в атома: Всеки конкретен набор от тези квантови числа определя едно *електронно състояние*.

Главното квантово число n взема целочислените стойности $n = 1, 2, 3, \dots$ и определя радиалната част на вълновата функция $R(r)$. Нарастването на стойността на n съответства на отдалечаване на електрона от ядрото на атома или на *увеличаване на енергетичното състояние на атома*. Тези състояния се обозначават с главните букви K, L, M, ... (22-4):

$$\begin{array}{ccccccc} n = & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & \\ & K & L & M & N & \dots & \end{array} \quad 22-4$$

Орбиталното квантово число l описва квантуването на момента на импулса на електрона в атома. То заема целочислени стойности свързани с главното квантово число n :

$$l = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad 22-5$$

Тъй като електронът обикаля около ядрото, неговият *орбитален момент на импулса* \vec{L} може да заема само дискретни стойности, определени от l , които съответстват на дискретни електронни състояния в пространството около ядрото (22-6):

$$L = \sqrt{l(l+1)} \hbar \quad 22-6$$

Тези пространствени състояния се обозначават с малките букви s, p, d, ... (22-7):

$$\begin{array}{ccccccc} l = & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots \\ & s & p & d & f & g & \dots \end{array} \quad 22-7$$

Ако атомът се намира във външно магнитно поле насочено по оста z , можем да дефинираме z -компонентата на орбиталния момент на импулса L_z . Квантово-механичният анализ показва, че компонентата L_z също се квантува (22-8):

$$L_z = m \hbar \quad 22-8$$

където m е целочислен параметър наречен магнитно квантово число, което може да заема само следните стойности (22-9):

$$m = l, l-1, l-2, \dots, 0, \dots, -l(l-2), -l(l-1), -l \quad 22-9$$

Освен орбиталния момент на импулса, електронът притежава също *вътрешен момент на импулса* \vec{S} наречен spin. Големината на \vec{S} също се квантува (22-10):

$$S = \sqrt{s(s+1)} \hbar, \quad s = \frac{1}{2} \quad 22-10$$

където s се нарича спиново квантово число m_s . Също както L_z се квантува във външно магнитно поле (22-8), така и z -компонентата на спиновия момент на импулс S_z се квантува, като взема стойностите:

$$S_z = m_s \hbar, \quad m_s = +\frac{1}{2} \quad \text{или} \quad m_s = -\frac{1}{2} \quad 22-11$$

Двете стойности на S_z се наричат съответно “горен спин” и “долен спин”.

Принцип на Паули

Свойствата и подреждането на елементите в периодичната система на Менделеев зависят, и се подчиняват на принципа на Паули, който гласи:

Всяко електронно състояние в атома, определено от четирите квантови числа (n, l, m, m_s) се заема само от един електрон.

Лекция 23: Стандартен модел на Вселената. Капков и кварк-глюонен модел на атомното ядро

Стандартен модел на Вселената

Различните сили в Природата, от обикновената сила на триене до чудовищните сили, действащи при експлозията на свръхнова звезда, се дължат на четирите основни взаимодействия (Таблица 23-1): (1) *силно ядрено взаимодействие* (наричано още *адронно взаимодействие*), (2) *слабо (ядрено) взаимодействие* (или още *лептонно взаимодействие*), (3) *електромагнитно взаимодействие* и (4) *гравитационно взаимодействие*. Четирите основни взаимодействия се обуславят от четирите признака (наричани още *заряди*), по които се разделя Материята след Големия Взрив: (1) *адронен (или кварков) заряд*, (2) *лептонен заряд*, (3) *електричен заряд* и (4) *гравитационен заряд (или маса)*. Според заряда, който носи всяка частица материя, тя участва в съответното взаимодействие. Някои частици участват във всичките четири взаимодействия, други само в някои от тях.

Частичите, които участват в *силното ядрено взаимодействие* се наричат *адрони*. Съществуват два вида адрони: *бариони*, които имат спин $1/2$ (или $3/2, 5/2$ и т.н.), и *мезони*, с нулев или целочислен спин. Всички адрони са съставени от фундаментални частици наречени *кварки*, които са същински елементарни частици. Барионите например са трикваркови структури (протонът е *u-d-u* структура, а неутронът е *d-u-d* кваркова структура). Мезоните са по-леки адрони, съставено от два кварка. Свойствата на шестте кварка са представени в Таблица 23-3.

Частичите, които участват в *слабото взаимодействие* се наричат *лептони*. Това са *електроните, мюоните, тауоните* и *неутриното*, които имат нищожна маса в сравнение с адроните. Тези шест лептона (и техните античастици в скобите) са представени в Таблица 23-4. Тауонното неутрино още не е наблюдавано експериментално.

Освен шестте *лептона* и шестте *кварка*, съществуват още шест елементарни частици, наречени *полеви частици* или *полеви кванти*, които са *преносители* на основните взаимодействия.

В Квантовата Електродинамика (QED), електромагнитното поле на електрически заредена частица се описва с *виртуални фотони*, които непрекъснато се излъчват и поглъщат от тази частица. Ако придадем енергия на тази система чрез ускоряване на частиците, то виртуалните фотони могат да бъдат „откъснати” от излъчилата ги частица и се превръщат в реални фотони, които могат да бъдат наблюдавани. Следователно, *фотоните са преносители на електромагнитното взаимодействие*.

Преносителите на *силното ядрено взаимодействие* между кварките са *глюоните*. Изолиран глюон все още не е наблюдаван експериментално. Квантовата теория на силното ядрено взаимодействие се нарича *Квантова Хромодинамика (QCD)*.

Слабото ядрено взаимодействие се пренася от *три полеви кванта*, наречени *векторни бозони*: W^+ , W^- , и Z^0 . Тези частици бяха предсказани от S. Glashow, A. Salam и S. Weinberg в така наречената *електрослаба теория*. Частичите W и Z бяха наблюдавани за пръв път през 1983 г. от групата на Rubbia на ускорителя на CERN в Женева. Масите на W^\pm бозони ($80 \text{ GeV}/c^2$) и Z^0 бозон ($91 \text{ GeV}/c^2$) измерени при тези експерименти са в много добро съответствие с теорията.

Частичата, преносител на *гравитационното взаимодействие*, се нарича *гравитон* (хипотетична частица). Много е вероятно, в ролята на гравитона да се окаже т.н. *бозон на Хигс*. Експерименти по неговата регистрация се провеждат в момента на ускорителя на CERN. В Таблица 23-2 са представени шестте полеви кванта с техните характеристики.

Следователно, според *Стандартния модел* (от 1995г.) Вселената е изградена от *шест кварка* (Таблица 23-3), *шест лептона* (Таблица 23-4) и *шест полеви кванта* (Таблица 23-2).

Charge	Interaction	Rel. intensity	Range limit
q	Strong nuclear interaction	1	$0 - 10^{-15}$ m
Λ	Weak (nuclear) interaction	10^{-13}	$0 - 10^{-18}$ m
e	Electromagnetic interaction	10^{-2}	∞
m	Gravitational interaction	10^{-38}	∞

Таблица 23-1

Bosons That Mediate the Basic Interactions				
Interaction	Boson	Spin	Mass	Electric Charge
Strong	g (gluon) ^a	1	0	0
Weak	W^{\pm}	1	$80.22 \text{ GeV}/c^2$	$\pm 1e$
	Z^0	1	$91.19 \text{ GeV}/c^2$	0
Electromagnetic	γ (photon)	1	0	0
Gravitational	Graviton ^a	2	0	0

Таблица 23-2

Flavor	Spin	Charge	Baryon Number	Mass
Quarks				
u (up)	$\frac{1}{2}\hbar$	$+\frac{2}{3}e$	$+\frac{1}{3}$	$336 \text{ MeV}/c^2$
d (down)	$\frac{1}{2}\hbar$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{1}{3}$	$338 \text{ MeV}/c^2$
s (strange)	$\frac{1}{2}\hbar$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{1}{3}$	$540 \text{ MeV}/c^2$
c (charm)	$\frac{1}{2}\hbar$	$+\frac{2}{3}e$	$+\frac{1}{3}$	$1,500 \text{ MeV}/c^2$
t (top)	$\frac{1}{2}\hbar$	$+\frac{2}{3}e$	$+\frac{1}{3}$	$174,000 \text{ MeV}/c^2$
b (bottom)	$\frac{1}{2}\hbar$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{1}{3}$	$500 \text{ MeV}/c^2$

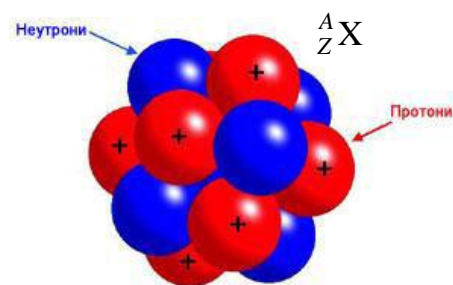
Таблица 23-3

Lepton particle (antiparticle)	Rest mass, MeV/c^2	Particle mean lifetime, s	Charge number	Spin, \hbar	Lepton number
e^- (e^+)	0.511	Stable	-1(+1)	$\frac{1}{2}$	+1(-1)
μ^- (μ^+)	105.7	2.2×10^{-6}	-1(+1)	$\frac{1}{2}$	+1(-1)
τ^- (τ^+)	1784	3×10^{-13}	-1(+1)	$\frac{1}{2}$	+1(-1)
ν_e ($\bar{\nu}_e$)	0	Stable	0(0)	$\frac{1}{2}$	+1(-1)
ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$)	0	Stable	0(0)	$\frac{1}{2}$	+1(-1)
ν_τ ($\bar{\nu}_\tau$)	0	Stable	0(0)	$\frac{1}{2}$	+1(-1)

Таблица 23-4

Капков и кварк-глюонен модел на атомното ядро

Капковият модел на атомното ядро, който все още се използва в науката (Фигура 23-1), разглежда ядрото, като плътна опаковка от протони (Z на брой) и неутрони ($A-Z$ на брой). Напоследък обаче, все повече се утвърждава т.н. кварк-глюонен модел на атомното ядро, за което има сериозни теоретични и експериментални предпоставки. Според него, атомното ядро се състои от кварки и глюони (а не от протони и неутрони). Протоните и неутроните (общо наречени нуклеони) се синтезират в момента на ядрения разпад.



Фигура 23-1

Протоните се състоят от три кварка в комбинация udu , а неутроните от dud кваркова структура. Не само протоните и неутроните, но и всички други кваркови конфигурации (мезони, бариони, хиперони и т.н.) се образуват в процеса на разпад на ядрото. Вътре в ядрото кварките са свободни и обменят глюони само с най-близките си съседи.

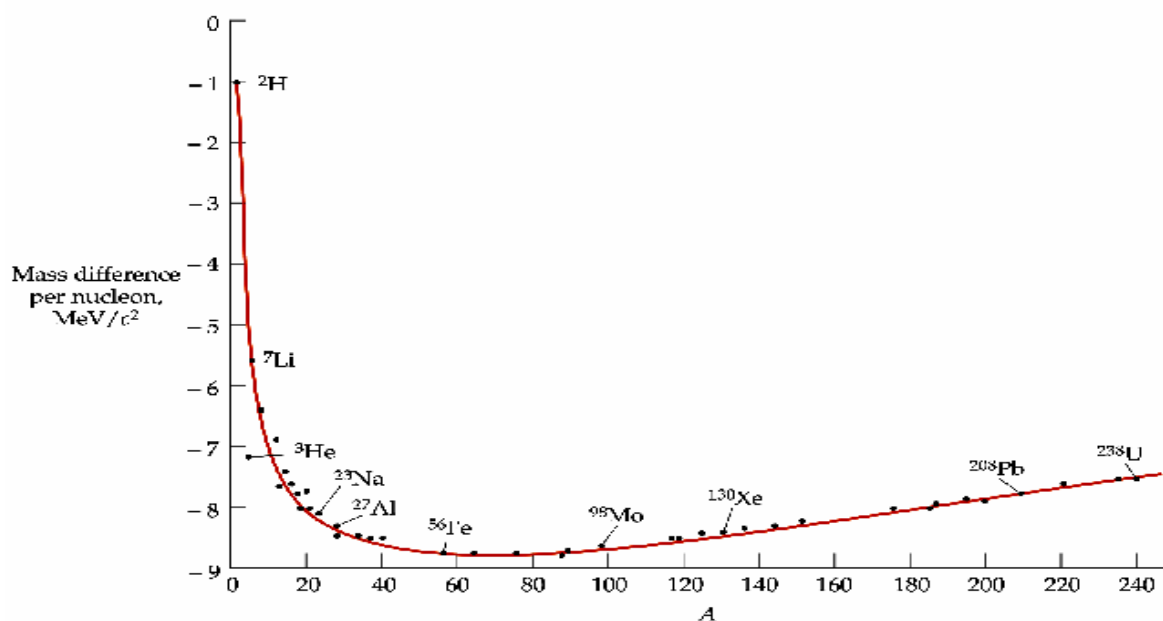
Лекция 24:

Ядрен разпад. Алфа, бета и гама разпад според капковия и кварк-глюонния модел

Масовият дефект на ядрото се дефинира като разлика между масата на ядрото в основно състояние M и сбора от масите в покой на образувалите се при разпада му нуклеони:

$$(M - Zm_p - Nm_n) / A \quad 24-1$$

От Фигура 24-1 се вижда, че масата в покой (падаща се на един нуклеон) за тежките елементи (с атомна маса $A \approx 200$) и тази на леките елементи ($A \leq 20$) е значително по-голяма от масата в покой на елементите от средата на периодичната система.



Фигура 24-1

Според кварк-глюонния модел на ядрото (Лекция 23), ядрата на различните видове атоми представляват различни енергетични кварк-глюонни състояния. Следователно, ядрата на елементите от средата на Менделеевата таблица са в *най-ниско енергетично състояние* и затова са най-стабилни. Така че, енергия може да се освободи, когато тежко ядро като ^{235}U , се разпадне на по-леки ядра — процесът се нарича **ядрен разпад**, или когато много леки ядра, като деутерий ^2H и тритий ^3H , се слоят и образуват по-тежко ядро — процесът се нарича **ядрен синтез**.

Ядрен разпад

Тежките ядра (с атомен номер $Z > 92$) са склонни към *спонтанен ядрен разпад*. Те се разделят самопроизволно на две ядра дори и без външно въздействие. Този факт е пряко доказателство на кварк-глюонния модел, според който кварките образувачи ядрото са свободни вътре в него. Те обменят глюони само с най-близките си съседи. Следователно, кварк-глюонната плазма има константна плътност и увеличаването на броя на кварките при по-тежките ядра не води до нарастване на интензивността на глюонния обмен и респективно на силите на привличане в ядрото. От друга страна, Кулоновото отблъскване нараства с увеличаване на броя на u -кварките в ядрото. Спонтанният ядрен разпад определя горната граница на стабилните кварк-глюонни състояния (т.е. броя на елементите, които могат да съществуват във Вселената).

Някои тежки ядра (U, Pu) се разпадат след поглъщане на бавен неутрон. При разпада на ^{235}U , урановото ядро преминава във възбудено състояние при поглъщането на неутрон. Възбудените ядрени състояния са нестабилни и бързо се разпадат на две стабилни ядра. Разпадът е съпроводен с образуване на свободни неутрони и освобождаване на енергия.

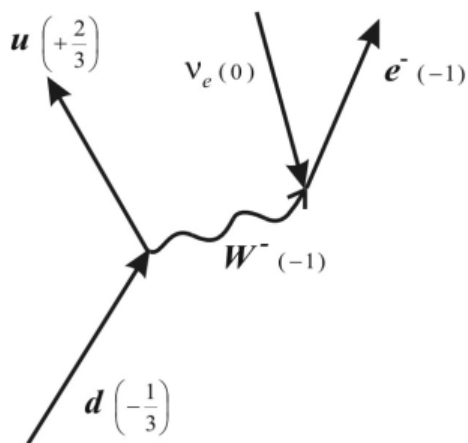
Алфа разпад: При алфа разпада от ядрото P се отделя α - частица (^4He ядро) и се образува по-леко ядро D :



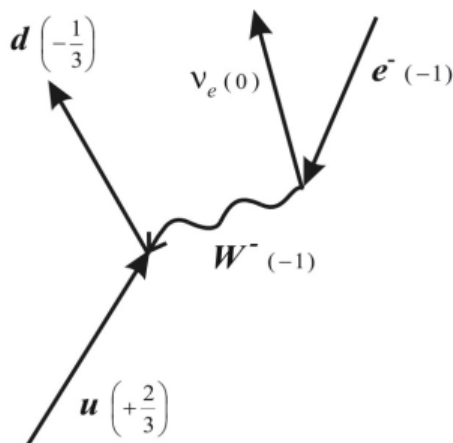
В повечето случаи образуваното ядро D е нестабилно и претърпява следващ α или β разпад. Практически всички тежки ядра ($Z > 83$) са склонни към α разпад.

Бета разпад: Капковият модел обяснява бета разпада с превръщането на протон в неутрон и обратно, вътре в атомното ядро. Според кварк-глюонния модел, при β^- разпада, ядрото P се превръща в ядро D чрез преобразуване на d -кварк в u -кварк и излъчване на електрон e^- , и антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Файнмановата диаграма на този процес е представена на Фигура 24-2.

При β^+ разпада, в ядрото P протича обратният процес: u -кварк се преобразува в d -кварк, а излъчената енергия е под формата на позитрон e^+ и неутрино ν_e (Фигура 24-3). Този процес



Фигура 24-2



Фигура 24-3

може да се разгледа и в обратен ред: електрон e^- излъчва неутрино $\bar{\nu}_e$ и се поглъща от u -кварк, който се преобразува в d -кварк. Такъв процес се нарича *електронен захват*.

В Квантовата Хромодинамика (QCD) античастиците се разглеждат като частици, движещи се назад във времето (от бъдеще към минало). Така електронът и позитронът (неутриното и антинейтрино) са едни и същи частици, движещи се по посока на времето и обратно във времето.

Гама разпад: При гама разпада, ядрото преминава от възбудено в основно състояние чрез изпускане на високоенергиен фотон, наречен g - квант.



Излъчените g - кванти имат *дискретен спектър*, който е доказателство, че ядрата имат *дискретни енергетични състояния на възбуждане* (т.е. енергията на ядрата *се квантува*). Средното време на живот на възбудено ядрено състояние е от порядъка на 10^{-11}s . Съществуват обаче и възбудени ядрени състояния с 10^2 - 10^3 пъти по-дълъг живот. Тези състояния се наричат *метастабилни* и са от изключителен интерес за практиката на бъдещето.

Лекция 25:

Ядрен синтез. Критерий на Лоусън. Магнитен и инерциален ядрен синтез

Ядрен синтез

При ядрения синтез, две леки ядра (примерно деутерий ^2H и тритий ^3H) се сливат и образуват по-тежко ядро. Ядрената реакция на синтез, която ще спаси човечеството от енергийната криза е:



Отделената енергия, която се пада на един нуклеон е 3,52 MeV (17,6 /5). Това е 3.5 пъти повече от енергията получена при ядрен разпад (около 1 MeV/нуклеон).

Поради Кулоновото отблъскване между ядрата ^2H и ^3H , огромна кинетична енергия (от порядъка на 1 MeV) трябва да им се придаде, за да могат те да се доближат достатъчно близо (10^{-15}m), при което да се активира силното ядрено взаимодействие между кварките им. Такава енергия може да се получи в ускорител, но сечението (или вероятността) на разсейване е значително по-голямо от сечението на синтез. Така че, ако бомбардираме тритий с ускорени ядра на деутерий, ще загубим повече енергия за ускоряването на ^2H отколкото ще получим от ядрения синтез. За положителен енергодобив от ядрен синтез, смес от деутерий и тритий трябва да бъде загрята до достатъчно висока температура, така че синтез да възниква вследствие на случайни термични сблъсъци. Температура $T = 10^8\text{K}$ (съответстваща на средна кинетична енергия на йоните $kT \approx 10 \text{ keV}$) е достатъчна за осъществяване на синтез при висока плътност на сместа. При тази температура атомите са напълно йонизирани, веществото е в състояние на *високотемпературна плазма*. Основен проблем при осъществяването на контролируем ядрен синтез е удържането на плазмата при висока плътност, достатъчно дълго време. Във вътрешността на звездите плазмата се удържа от интензивното им гравитационно поле.

Критерий на Лоусън

Енергията, необходима за загряване на плазмата, е пропорционална на плътността на нейните йони n , докато честотата на ударите между тях е пропорционална на n^2 , квадрата на плътността. Ако t е времето на удържане на плазмата в състояние с висока плътност, то освободената при синтеза енергия ще е пропорционална на $n^2 t$. Получената енергия трябва да превишава вложената енергия за загряване и удържане. Следователно:

$$C_1 n^2 t > C_2 n \quad 25-2$$

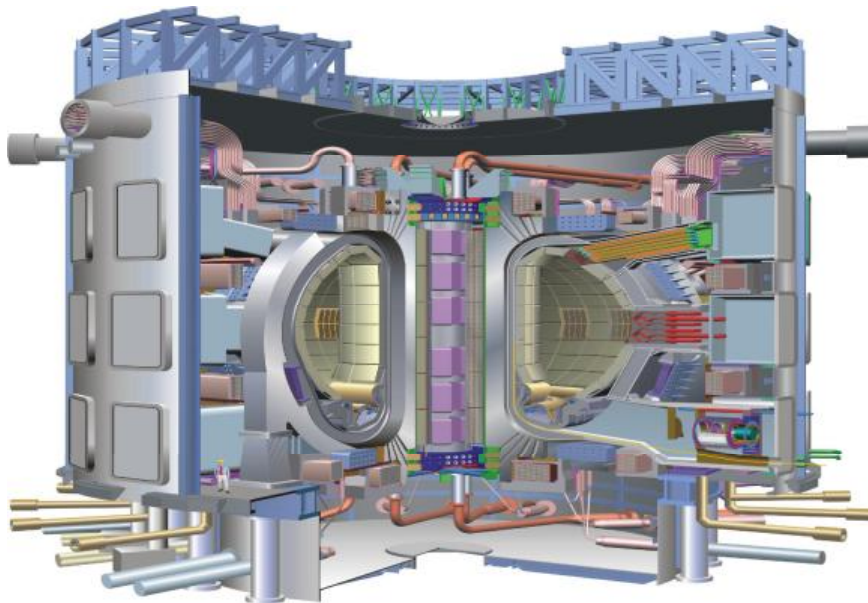
където C_1 и C_2 са константи. За различните реакции на синтез тези константи са оценени за първи път от британския физик J. D. Lawson, който достига до необходимото условие за осъществяване на ядрен синтез, известно като *критерий на Лоусън*:

$$nt > 10^{20} \text{ s/m}^3 \quad 25-3$$

Ако критерият на Лоусън е изпълнен и кинетичната енергия на йоните е от порядъка на $kT \sim 10 \text{ keV}$, енергията получена при ядрения синтез ще е точно равна на енергията изразходена за загряване на водородната плазма. За реализиране на положителен баланс на енергията трябва да се създаде и удържи достатъчно дълго време по-гореща плазма от тази с температура 10 keV. Друга възможност е създаването на свръх-кондензирана плазма за време t , каквато е целта на *инерциалния ядрен синтез* (ICF).

Магнитен и инерциален ядрен синтез

Две са възможните схеми за осъществяване на контролируем ядрен синтез, по които се работи усилено през последните 50 години. При първата, горещата плазма се удържа в *магнитен капан*, до започване на актовете на синтез. Установка от този тип е разработена за първи път в Русия и се нарича *Токамак*. Плазмата се загрева и се удържа в широк тороид. През 2004 г. стартира международен проект ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), за построяването на първия действащ прототип на усъвършенствана инсталация за магнитен синтез от типа Токамак (Фигура 25-1). Реакторът ще бъде построен в Кадараш, Франция и трябва да заработи през 2016г.

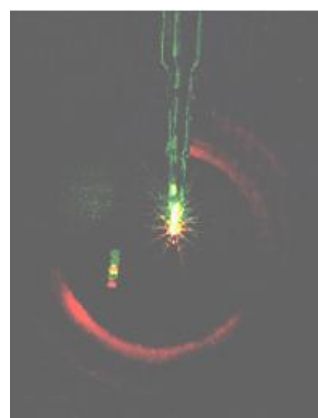


Фигура 25-1

При втората схема, наречена *инерциален капан*, сферична мишена от деутерий-тритиев кристал се облъчва с лазерни снопове с енергия от порядък 10^4J и продължителност на импулса 10^{-8}s . Изследват се и схеми, при които се използват ускорени електронни и йонни потоци вместо лазерни снопове. За да се удовлетвори критерия на Лоусън, мишената трябва да се компресира до стойност 10^4 пъти по-висока от нормалната твърдотелна плътност. Тази свръхвисока плътност се удържа инерциално в продължение на 10ps (10^{-11}s), за което време условията за синтез са налице. Енергията, която ще се освободи е 10^6J . На Фигура 25-2a е показан 10-снопов лазерен реактор с диаметър 5m. Експлозия на мишена с диаметър 0.5mm е показана на Фигура 25-2b.



(a)



(b)

Фигура 25-2