

## За електрослабото взаимодействие

**Анотация:** Привеждат се сведения за електрослабото взаимодействие, които допълват информацията, предвидена в програмата по физика и астрономия за 12. клас, профилирана подготовка.

Наред с проблемите на астрофизиката, проблемите, свързани със структурата на материята са едни от най-интересните и способни да мотивират учащите да изучават физика. Съвременното състояние на физиката на частиците е изложено обстойно от акад. М. Матеев в тема 13-14 на учебника по физика и астрономия за 12. клас [1, стр. 159]. В частност, там са описани както особеностите на електромагнитното и на слабото взаимодействие, така и тяхното обединение от Шелдон Глешоу, Стивън Вайнберг и Абдус Салам (теорията на ГВС), като въпросите са разгледани и в теоретичен, и в експериментален аспект. В мартенския брой на сп. Physics Education се появи статията [2], която по великолепен начин допълва информацията от учебника и може да се използва при изучаване на този материал.

За да стане ясно в какъв смисъл е интересна въпросната статия, ще припомним основните етапи на изграждането на съвременната картина на фундаменталните взаимодействия в училище, като за пример ще разгледаме най-добре познатото – електромагнитното взаимодействие.

На първия етап, още в 6. клас, ние казваме на учениците, че някои частици (електрони, протони) притежават характеристика, която наричаме **електричен заряд**. Тогава те се запознават и с основното свойство на зарядите – в зависимост от своите знаци да се привличат или да се отблъскват с електрични сили.

На втория етап, в 9. клас, учениците научават, че зарядите не си взаимодействат от разстояние, че съществува посредник на взаимодействието – електричното (по-общо – електромагнитното) поле. На този етап се изгражда следната картина на взаимодействието: единият заряд разглеждаме като източник, който създава електрично поле и **това поле** (а не източникът му!) вече действа на всеки внесен в него друг заряд. Законът на Кулон осигурява израз за характеристиката на полето – на разстояние  $r$  от точков заряд  $Q$  интензитетът на полето има големина:

$$(1) \quad E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Електростатичното поле може да се характеризира и със своя потенциал  $\varphi$ , като между интензитета и потенциала съществува връзката:

$$(2) \quad E = -\frac{\partial\varphi}{\partial r}, \text{ където } \varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Изграждането на третия етап започва в 10. клас и завършва в 12. клас. На този етап разкриваме, че фундаменталните взаимодействия се осъществяват чрез обмен на виртуални<sup>1</sup> частици: единият участник във взаимодействието излъчва такава частица, която има определена енергия и импулс, другият участник поглъща частицата и така участниците обменят помежду си енергия и импулс. В тази картина резултатите от взаимодействието, които на първия етап (в 6. – 7. клас) се описват на езика на силите, в 12. клас се свеждат до обмен на енергия и импулс. Електромагнитното взаимодействие се осъществява, като частиците с електричен заряд обменят фотони ( $\gamma$ -кванти), при силното взаимодействие кварките обменят глюони, а при слабото взаимодействие се

<sup>1</sup> За разлика от реалните частици, при виртуалните частици енергията  $E$  и импулса  $\vec{p}$  се изменят независимо, т.е. за тях не е в сила равенството  $E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4$ .

обменят  $W^\pm$  и  $Z^0$  бозони. В тази картина  $\gamma$ -квантите са кванти на електромагнитното поле, източник на което са електричните заряди. Фактът, че тяхната маса в покой е нула е следствие от факта, че в закона на Кулон разстоянието между зарядите фигурира **точно** с квадрата си (или – че потенциалът е пропорционален на  $1/r$ ).

В [2] може да се намери отговор на въпроса кванти на кои полета са  $W^\pm$  и  $Z^0$  бозоните и кои са зарядите, пораждащи тези полета. С изясняване на този отговор се открояват общите черти в механизмите на слабо и на електромагнитното взаимодействие и смисълът на обединението, извършено в теорията на ГВС, става ясно защо говорим не за две, а за едно – електрослабо взаимодействие.

Известно е, че и в класическата теория на Максвел, и в квантовата електродинамика (КЕД) има една запазваща се величина – електричният заряд  $Q$  на частиците. В теорията на ГВС всяка частица се характеризира с още две запазващи се величини, наречени *слаб изоспин*  $\vec{I}^w$  и *слаб хиперзаряд*  $Y^w$ . Слабият изоспин  $\vec{I}^w$  е векторна величина в едно абстрактно тримерно пространство и неговата трета компонента  $I_3^w$  е свързана с електричния заряд  $Q$  на частиците и с хиперзаряда посредством равенството:

$$(3) \quad Q = I_3^w + \frac{Y^w}{2} .$$

Така, например, за електрона  $Q = -1$ ,  $I_3^w = -\frac{1}{2}$  и следователно от горната формула  $Y^w = -1$ .

За слабо взаимодействие слабият изоспин и слабият хиперзаряд играят същата роля, каквато за електромагнитното взаимодействие играе електричният заряд – те са източници на полета. Квантите на полето на хиперзаряда се бележат с  $X$ , а квантите на полето, породено от третата компонента на слабия изоспин се бележат с  $W^0$ . Тъй като съгласно с (3) електричният заряд е комбинация от слабия хиперзаряд и третата компонента на слабия изоспин, всеки електрон и всяка друга реална частица е носител и на определен слаб хиперзаряд и слаб изоспин. Така четирите заряда – трите компоненти на слабия изоспин  $\vec{I}^w$  и слабият хиперзаряд  $Y^w$  стават източници на четири полета, чиито кванти се бележат съответно с  $W^+$ ,  $W^0$ ,  $W^-$  и  $X$ . Известният ни от КЕД  $\gamma$ -квант, например, се оказва комбинация от  $W^0$  и  $X$  съгласно формулата:

$$(4) \quad \gamma = W^0 \sin \theta_w + X \cos \theta_w ,$$

където  $\theta_w$  представлява споменатият в [1] на стр. 177 ъгъл на Вайнберг. Според теорията на ГВС в природата трябва да съществува още една електронеутрална комбинация от  $W^0$  и  $X$ , т.е. частица:

$$(5) \quad Z^0 = W^0 \cos \theta_w - X \sin \theta_w .$$

Теорията предсказва и масите на  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -частиците и, след като частиците бяха открити в ЦЕРН, предсказаните стойности се оказаха в отлично съгласие с експериментално определените маси [3].

И така, в съответствие с обединената теория на ГВС два електрона (два електрически заряда) могат да взаимодействат не само като обменят  $\gamma$ -квант, но и като обменят електронеутралната  $Z^0$ -частица (ако те обменят частица, която има електричен заряд – напр.  $W^+$  или  $W^-$ , в края на реакцията вече няма да присъстват два електрона, а някакви други частици). За разлика от  $\gamma$ -квантите обаче,  $Z^0$ -частиците имат маса в покой. Ето защо потенциалът на полето, чиито кванти са те, вече не е от вида  $1/r$ , а по-сложен:

$$(6) \quad V = \frac{a}{r} e^{-kr} , \text{ където } k = \frac{m_z c}{\hbar} , \text{ а } m_z \text{ е масата на } Z^0 .$$

Вижда се, че “кулоновата” част  $a/r$  е експоненциално подтисната – благодарение на голямата маса на  $Z^0$  (примерно 100 протонни маси) с отдалечаване от източника експонентата бързо клони към нула, което обяснява краткодействието на слабото взаимодействие: отклоненията от кулоновия потенциал се проявяват само на разстояния от порядъка на  $r = \frac{1}{k} = \frac{\hbar}{m_z c} \approx 10^{-18} \text{ m}$ . (Кулоновият потенциал (2)

фактически се описва с функция от същия вид – (6), но тъй като масата в покой на фотона е нула –  $m_\gamma = 0$ , то съответно  $k = 0$  и експонентата става единица.)

Следователно, освен допълнение към картината и механизма на електрослабото взаимодействие, приведените по-горе сведения водят до важното заключение, че законът на Кулон не е общовалиден – той представлява само едно приближение към точния израз за електрослабата сила, с която си взаимодействат два заряда, приближение, което е валидно при достатъчно голямо разстояние ( $\gg 10^{-18} \text{ m}$ ) между тях.

Накрая следва да отбележим, че на този, трети етап от изграждане на картината на взаимодействията, се извършва още едно разширение на самото понятие *взаимодействие*. Както бе отбелязано по-горе, докато разглеждаме взаимодействието между два електрона, например, като резултат от обмен на виртуални  $\gamma$ -кванти, то се свежда до обмен на енергия и импулс. Електрослабото взаимодействие може да се осъществява обаче и чрез обмен на заредени частици ( $W^+$  или  $W^-$ ), при което участниците обменят електричен заряд. Доколкото ние схващаме електричния заряд като една от характеристиките на частиците, неговата промяна означава всъщност промяна на самата частица, участваща във взаимодействието. Така например ако  $d$ -кварк и електронно антинеутрино обменят  $W^-$ -бозон, в резултат ще се получат електрон и  $u$ -кварк (вж. [3], стр.9). Чрез подобен механизъм се осъществява и силното взаимодействие. Така смисълът на понятието взаимодействие се обогатява, като се изяснява, че при фундаменталните взаимодействия участниците могат да обменят освен енергия и импулс и редица свои характеристики.

Литература:

1. **Попов Хр.** и др., Физика и астрономия за 12. клас, профилирана подготовка, Просвета София, 2002.
2. **Ryder L.**, Charge, Phys. Educ., **42**, 2007, p. 141. (Пълният текст може да се намери на адрес [www.iop.org/journals/physed](http://www.iop.org/journals/physed).)
3. **Матеев М.**, Откриването носителите на слабото взаимодействие  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -частиците, Физика, С., 1, 1984, с. 7.

Сп. *Физика*, **3**, 2007.