

ავთანდილ შურღაია

ატომური და ბირთვული ფიზიკა

მეოცე საუკუნის დასაწყისში ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შესწავლამ მეცნიერები კვანტური თეორიის შექმნამდე მიიყვანა. აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების ექსპერიმენტული შედეგების მონაცემების ასახსნელად მ. პლანკმა წამოაყენა ჰიპოთეზა, რომლის თანახმად, ელექტრომაგნიტური ტალღის გამოსხივება ხდება დისკრეტულად, პორციებად (ამ პორციას ეწოდა შემდგომ ფოტონი). თითოეული ფოტონის ენერგია E კი განისაზღვრება გამოსხივების სიხშირით ν :

$$E = h\nu.$$

პროპორციულობის კოეფიციენტს ეწოდება პლანკის მუდმივა - $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ ჯწმ.

ეს ჰიპოთეზა განაზოგადა ა. აინშტაინმა. მისი თეორიის თანახმად, ელექტრომაგნიტური ტალღის არა მარტო გამოსხივება, არამედ გავრცელებაც და შთანთქმაც ფოტონების სახით ხდება. ამ დაშვებით ა. აინშტაინმა ახსნა ფოტოეფექტის მოვლენა. კერძოდ, დაცემული ფოტონების ენერგია ხმარდება ლითონის ზედაპირიდან ელექტრონის ამოფრქვევას და მისთვის კინეტიკური ენერგიის მინიჭებას:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

ამ ფორმულაში A ელექტრონის გამოსვლის მუშაობას აღნიშნავს. ის ლითონის ზედაპირიდან ელექტრონის ამოსაგლეჯად საჭირო ენერგიის ტოლია. ლითონის ზედაპირზე დაცემული სინათლის მინიმალურ სიხშირეს, რომელიც საჭიროა ლითონის ზედაპირიდან ელექტრონის მხოლოდ ამოსაგლეჯად, წითელი საზღვარი ეწოდება.

$$h\nu_{min} = A.$$

პლანკის ფორმულასთან ერთად ლ. დე-ბროილის ფორმულაც

$$p = \frac{h}{\lambda'}$$

ქმნის ელექტრომაგნიტური ტალღის დუალური თეორიის საფუძველს. ამ ორი ფორმულის თანახმად, ფოტონის (სხვაგვარად - ელექტრომაგნიტური ტალღის კვანტის) ენერგია E და მისი იმპულსი p განისაზღვრება ტალღური მახასიათებლებით - სიხშირით და ტალღის სიგრძით. ამ ფორმულების თანახმად, შეიძლება, პირიქით, ნაწილაკს მივაწეროთ ტალღის თვისებები და მის ენერგიას და იმპულსს შეუსაბამოთ ტალღის სიგრძე და სიხშირე.

ელექტრომაგნიტური ტალღის დუალიზმი ნ. ბორმა ატომის ე. რეზერვორდის მიერ შემუშავებული მოდელის წინააღმდეგობის ასახსნელად გამოიყენა. ეს წინააღმდეგობა კი იმაში მდგომარეობდა, რომ ატომის ბირთვის გარშემო მოძრავი ელექტრონი, კლასიკური თეორიის თანახმად, უნდა ასხივებსდეს ენერგიას და საბოლოოდ ეცემოდეს ატომის ბირთვს. ნ. ბორის ჰიპოთეზის თანახმად, ატომი განსაზღვრული E_n ენერგიის მქონე სტაციონარულ მდგომარეობაში იმყოფება. ამ დროს იგი არც ასხივებს და არც შთანთქმავს. სტაციონარული მდგომარეობების ენერგია დისკრეტულად იცვლება. ატომი ასხივებს ელექტრომაგნიტურ ტალღას, როდესაც უფრო მაღალი E_n ენერგიის მქონე სტაციონარული მდგომარეობიდან უფრო დაბალი E_m ენერგიის მქონე სტაციონარულ მდგომარეობაში გადადის. გამოსხივებული ტალღის სიხშირე კი განისაზღვრება ტოლობით:

$$v_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}.$$

ამავე ფორმულით განისაზღვრება ატომის მიერ შთანთქმული ტალღის სიხშირე, როდესაც იგი გადადის უფრო მაღალი ენერგიის მქონე სტაციონარულ მდგომარეობაში (ატომი აღიზნება). ამ მდგომარეობაში ატომი ძალიან მცირე ხანს რჩება. იგი იცვლის სტაციონარულ მდგომარეობას და გამოსხივებს შესაბამის ენერგიას. ნ. ბორის თეორიის მიხედვით. წყალბადის მე- n სტაციონარული მდგომარეობის ენერგია გამოითვლება ფორმულით:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 kme^4}{2h^2} \frac{1}{n^2}.$$

ამ ფორმულამ, რომელიც მოგვიანებით კვანტური თეორიის ფარგლებშიც მიიღო ე. შრედინგერმა, კარგად აღწერა იმ დროისთვის ექსპერიმენტულად მიღებული წყალბადის ატომის გამოსხივების სპექტრი, თუმცა სიძნელეებს წააწყდა სხვა ნივთიერებების გამოსხივების სპექტრის შესწავლისას. ეს კი წარმატებით მოახერხა კვანტურმა მექანიკამ.

ატომის მსგავსად, ატომის ბირთვსაც ახასიათებს დისკრეტული ენერგეტიკული დონეები. ზოგიერთი ელემენტის ატომებისთვის დამახასიათებელია არამდგრადობა, რაც ატომის ბირთვის რადიოაქტიური გარდაქმნებით გამოიხატება. ამ დროს ნივთიერება იცვლება. გაირკვა, რომ ბირთვის შემადგენელი პროტონებისა და ნეიტრონების მასათა ჯამი აღემატება მათ მიერ შექმნილი ბირთვის მასას. მასათა სხვაობას ეწოდება მასის დეფექტი:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M.$$

ხოლო შესაბამის ენერგიას (ა. აინშტაინის ფორმულის თანახმად) -

$$E = \Delta mc^2$$

ბირთვის ბმის ენერგია. ამ ფორმულაში Z არის პროტონების რიცხვი ბირთვში, A - მასური რიცხვი, M - ბირთვის მასა, ხოლო c - სინათლის სიჩქარე. ბირთვულ რეაქციებში ადგილი აქვს ელექტრული მუხტისა (Z რიცხვის) და მასური რიცხვის შენახვის კანონებს. ცნობილია ორი სახის ბირთვული რეაქცია: ერთი, რომლის დროსაც ბირთვი იხლიჩება და წარმოიქმნება ახალი, უფრო მდგრადი ელემენტი, რომლის ბმის ენერგია, მოსული ერთი ნუკლონის წილად, უფრო მაღალია და მეორე - თერმობირთვული რეაქცია, მსუბუქი ბირთვების სინთეზი, რომლის დროსაც წარმოიქმნება ახალი ელემენტი ასევე ერთი ნუკლონის წილად მოსული უფრო მაღალი ბმის ენერგიით. ამ ტიპის რეაქცია რომ განხორციელდეს, საჭიროა ძალიან მაღალი ტემპერატურა (როგორც არის, მაგალითად, მზეზე). პირველი სახის რეაქცია შესაძლოა თვითნებურად განხორციელდეს (ურანი და სხვა მძიმე ელემენტები). მას რადიაქტიურ გამოსხივებას (დაშლას) უწოდებენ. ცნობილია სამი ტიპის რადიაქტიური გამოსხივება -

α, β და γ . პირველი მათგანი წარმოადგენს ჰელიუმის ბირთვს, მეორე - ელექტრონს (ან პოზიტრონს), ხოლო მესამე მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივებაა. გამოსხივება განსაზღვრული კანონზომიერებით მიმდინარეობს.

ნივთიერებაში დარჩენილი ბირთვების რაოდენობა $N = N_0 e^{-\lambda t}$, სადაც N_0 არის

ბირთვების საწყისი რაოდენობა, ხოლო λ - ბირთვების დაშლის ალბათობა ერთ წამში.

ბირთვებისთვის განმარტებულია ნახევარდაშლის პერიოდის ცნება - დრო, რომელიც საჭიროა ბირთვების განახევრებისთვის. ის ამგვარად აღინიშნება: $T_{1/2}$. ამ სიდიდის

მეშვეობით ბირთვების დაშლის კანონზომიერება შეიძლება გადაიწეროს ასე:

$$N = N_0 2^{-t/T_{1/2}}, \text{ ამასთან ერთად } T_{1/2} = \ln 2 / \lambda.$$

პრაქტიკული გამოთვლებისთვის სასარგებლოა დაშლის აქტივობა: $A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = N_0 \lambda e^{-\lambda t}$.

სიდიდეს $A_0 = N_0 \lambda$ ნივთიერების საწყისი აქტივობა ეწოდება. აქტივობის ერთეულია ბეკერელი.

ჩამკვეტი ძაბვა: როგორი უნდა იყოს ფოტოფექტის ჩამკვეტი ძაბვა, თუ 100 ნმ ტალღის სიგრძის მქონე ულტრაიისფერი სხივებით ვოლფრამის კათოდის დასხივებისას

ამოფრქვეული ელექტრონები ქმნიან ნულის ტოლ დენს? ვოლფრამის გამოსვლის მუშაობა $A = 4.5\text{ევ}$.

თუ კათოდს და ანოდს პოლარობას შევუცვლით, მაშინ კათოდიდან დასხივებით ამოფრქვეულ ელექტრონებს ელექტრული ველი დაამუხრუჭებს და ჩამკეტი ძაბვისთვის ვერც ერთი ელექტრონი ვერ მიაღწევს ანოდს. ამ დროს ამოფრქვეული ელექტრონების კინეტიკური ენერგია ელექტრული ველის მუშაობის ტოლია:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_{\text{წ.}}$$

აქ $e = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{კ}$ არის ელექტრონის მუხტი. კინეტიკური ენერგია განვსაზღვროთ ფოტოეფექტის ა. აინშტაინის ფორმულით:

$$\frac{mv^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - A.$$

$$\lambda = 100\text{ნმ} = 10^{-7}\text{მ}, A = 4.5\text{ევ} = 7.2 \cdot 10^{-19}\text{ჯ}.$$

ჩამკეტი ძაბვისთვის მივიღებთ:

$$U_{\text{წ.}} = \frac{1}{e} \left(h \frac{c}{\lambda} - A \right) = 7.9\text{ვ}.$$

პლანკის მუდმივა: პლანკის მუდმივას რიცხვითი მნიშვნელობის გასაგებად ჩატარდა ცდა. კათოდის წითელი ფერის სინათლით დასხივებისას ($\nu_1 = 3.9 \cdot 10^{14}\text{ჰც}$) ჩამკეტი ძაბვა აღმოჩნდა $U_{\text{წ.1}} = 0.5\text{ვ}$ ტოლი, ხოლო იისფერი სინათლით დასხივებისას ($\nu_2 = 7.5 \cdot 10^{14}\text{ჰც}$) - $U_{\text{წ.2}} = 2\text{ვ}$ ტოლი. გამოთვალეთ ამ მონაცემებით პლანკის მუდმივას სიდიდე.

თუ ა. აინშტაინის ფორმულაში ელექტრონის კინეტიკურ ენერგიას ჩავანაცვლებთ ჩამკეტი ძაბვით, მაშინ

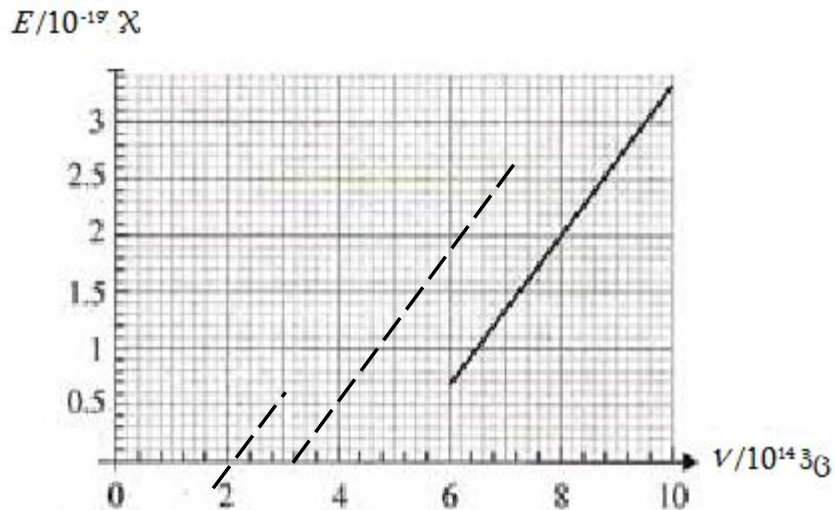
$$eU_{\text{წ.}} = h\nu - A.$$

გამოვიყენოთ ეს ფორმულა ორჯერ. ამ შემთხვევაში, ცდის მონაცემების მიხედვით, შეიძლება დავწეროთ:

$$h = \frac{e(U_{\beta 1} - U_{\beta 2})}{\nu_1 - \nu_2} = 6.67 \cdot 10^{-34} \text{ჯწმ.}$$

ფოტოეფექტი: ნახაზზე მოცემულია ფოტოელემენტიდან ამოფრქვეული ელექტრონის ენერჯიის დაცემული სინათლის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი (მთლიანი ხაზი). იპოვეთ:

- ა) წითელი საზღვარი;
- ბ) გამოსვლის მუშაობა;
- გ) ელექტრონის კინეტიკური ენერჯია, თუ ფოტოელემენტზე დაცემული სინათლის სიხშირეა $8 \cdot 10^{14}$ ჰც;
- დ) სხვა ფოტოელემენტის წითელი საზღვარია $6 \cdot 10^{14}$ ჰც; დახაზეთ იმავე გრაფიკზე ელექტრონის კინეტიკური ენერჯიის სინათლის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი.



- ა) წითელი საზღვარი არის სიხშირე რომელიც ელექტრონის ნულოვან კინეტიკურ ენერჯიას შეესაბამება. თუ გავაგრძელებთ ამოცანაში მოცემულ გრაფიკს (ნახაზზე მთლიანი წრფე), ის აბსცისათა ღერძს გადაკვეთს წერტილში $4.4 \cdot 10^{14}$ ჰც, რომელიც არის წითელი საზღვარი.
- ბ) რადგან წითელ საზღვარზე ელექტრონის კინეტიკური ენერჯია ნულის ტოლია, ამიტომ

$$A = h\nu_{min} = 2.9 \cdot 10^{-19} \text{ჯ.}$$

გ) გრაფიკიდან (მთლიანი ხაზი) ჩანს, რომ სინათლის სიხშირეს $8 \cdot 10^{14}$ ჰც შეესაბამება ელექტრონის კინეტიკური ენერგია $2 \cdot 10^{-19}$ ჯ;

დ) ელექტრონის ენერგიის დაცემული სინათლის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი წარმოადგენს წრფეს, რომლის დახრილობა პლანკის მუდმივას ტოლია, ამიტომ $6 \cdot 10^{14}$ ჰც წითელი საზღვრის მქონე ფოტოელემენტის შესაბამისი გრაფიკი იქნება ამოცანაში მოცემული გრაფიკის პარალელური წრფე, რომელიც აბსცისთა ღერძს გადაკვეთს წერტილში $6 \cdot 10^{14}$ ჰც (ნახაზზე წყვეტილი ხაზი).

ფოტონების რიცხვი: რამდენ ფოტონს გამოასხივებს ნათურა ერთ წამში, თუ მისი სიმძლავრეა $P = 75$ ვტ და გამოსხივებული სინათლის ენერგიის 1%-ს შეადგენს $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ მ ტალღის სიგრძის მქონე ფოტონები?

აღვნიშნოთ ერთ წამში გამოსხივებული ფოტონების რაოდენობა N -ით. მაშინ შეიძლება დავწეროთ:

$$Nh \frac{c}{\lambda} = 0.01 \times P.$$

აქედან მივიღებთ

$$N = \frac{0.01P\lambda}{hc} = 1.9 \cdot 10^{18} \text{წმ}^{-1}.$$

ფოტონების მიერ წარმოებული წნევა: წარმოვიდგინოთ, რომ წინა ამოცანაში მიღებული ფოტონები ეცემა სარკულ ზედაპირს და მისგან ირეკლება. რა წნევას აწარმოებენ ისინი სარკის ზედაპირზე, თუ ამ უკანასკნელის ფართობია $S = 0.5 \text{მ}^2$?

სარკეზე წარმოებული წნევის ძალის სიდიდე F ტოლია დაცემული ფოტონების იმპულსის ცვლილებისა ერთ წამში. ერთი ფოტონის იმპულსი

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

ფოტონის იმპულსის ცვლილება შეადგენს $2p$ -ს. ერთ წამში დაცემული N რაოდენობის ფოტონების იმპულსის ცვლილება იქნება

$$2Np = 2N \frac{h}{\lambda}$$

ამრიგად, ფოტონების მიერ წარმოებული წნევა

$$P = \frac{F}{S} = \frac{2Nh}{\lambda} = 10^{-8} \text{ ნ/მ}^2.$$

წყალბადის ატომი: წყალბადის ატომებს ეჯახება სინათლე, რომლის ერთი კვანტის ენერგია ტოლია 10.4 ევ. ახსენით, რა ემართება წყალბადის ატომს. განიხილეთ იგივე პროცესი იმ შემთხვევისთვის, სადაც ფოტონის მაგივრად იმავე ენერგიის მქონე ელექტრონია. არის თუ არა განსხვავება? პასუხი ახსენით.

n=4		E=-0.85ევ
n=3		E=-1.51ევ
n=2		E=-3.4ევ

ამ ამოცანაზე გვჭირდება

$$n=1 \text{ ————— } E=-13.6\text{ევ}$$

პასუხის გასაცემად წყალბადის ატომის სტაციონარული მდგომარეობების დიაგრამა, რომელიც

ენერგიების მოცემულია ნახაზზე. როგორც ვხედავთ, წყალბადის ატომს ძირითად მდგომარეობაში გააჩნია $E_1 = -13.6$ ევ. პირველი აგზნებული მდგომარეობა შეესაბამება ენერგიას

$E_2 = -3.4$ ევ, დაცემული ფოტონის ენერგია აღემატება ამ ორ დონის ენერგიების

სხვაობას, რის გამოც შეიძლება ვიფიქროთ, რომ წყალბადის ატომი გადახტება პირველ აგზნებულ მდგომარეობაში. სინამდვილეში ასე არ ხდება, რადგან ამ შემთხვევაში

ფოტონს დააკლდება ენერგია $E_2 - E_1 = 10.2$ ევ. ეს ენერგია ნაკლებია ფოტონის

ენერგიაზე, ანუ ფოტონმა უნდა გასცეს ეს ენერგია და დაიტოვოს 0.2ე. მაგრამ ფოტონის ენერგია დისკრეტულია და არ შეიძლება შემცირდეს ნებისმიერი სიდიდით - ფოტონის ენერგია შთანთქმულ უნდა იქნეს მთლიანად. უკანასკნელ შემთხვევაში წყალბადის ატომის ენერგია უნდა გახდეს -3.2ეე, ასეთი ენერგიის სტაციონარული მდგომარეობა კი მას არ გააჩნია, ამიტომ ფოტონი ვერ გამოიწვევს წყალბადის ატომის ენერგიას. ელექტრონის ენერგია კი შეიძლება შეიცვალოს ნებისმიერი სიდიდით და მას შეუძლია დაკარგოს ატომის აგზნებისთვის საჭირო 10.2ეე ენერგია, რაც ატომის აგზნებას გამოიწვევს.