DR. VERMES MIKLÓS

A XX. század fizikájának elhelyezése a gimnázium tananyagában

Az utóbbi években több oldalról emelik ki annak szükségességét, hogy a XX. század fizikájának fél-háromnegyed évszázad elmúltával az eddiginél sokkal nagyobb mértékben kell tananyagunkban szerepelnie. Ilyen irányú változás már régóta esedékes, nagyon szükséges, és a türelmetlenül sürgetők elég kis csapatának az érdeme lesz, ha a cél megvalósul.

Az „új” tananyagrész kiválasztása, elhelyezése, feldolgozása, beépítése azonban nagyon vitatott. Modern fizika, anyagszerkezet stb. szavak esetében nem mindenki gondol ugyanarra. Fennállhat a veszély, hogy az ún. modern fizika az iskolában rendszertelen mesedélutánná válik, amikor le kell mondani az ebben a tárgyban megszokott, egymásra épülő, alkalmazható gondolatmenetről, és sok minden rendszertelenül szétesik. E sorok írójának az a nézete, hogy az „új” tananyagot be kell építeni az ún. régibe, mindenütt ott, ahol csak lehet, mint a korábbi ismeretek javítását, általánosítását. Az eljárás eredményeképp természetszerűen adódik a szélesebb látókörű ismeret. További szempont: amennyire csak lehet, meg kell várni a tanuló absztraháló képességének kifejlődését, mert az életkori sajátosságokat figyelembe kell venni. Minden lépést idejében meg kell alapozni, a nehézségeket szét kell osztani. A nemcsak elvégezhetetlen, de fogalmilag is bonyolult bemutató fizikai kísérletek helyett jó szolgálatot tesznek alkalmasan megtervezett numerikus példák.

Egy ilyen megvalósított összeállítás vázlatát adja ez a cikk, az egyes órák anyagának vázlatos felsorolásával, a tagozatos osztályok óraszámára alapozva. Ahol szükséges, ott az ismertetés részletezőbb.

II. OSZTÁLY

[Newton II. axiómájának tanítása, az ezzel kapcsolatos gyakorló feladatok 5–10 órán történt elvégzése után sorra kerülő órák anyagának vázlata.]

1. óra. Az ún. kocsikísérletben egy testet állandó erővel gyorsítottunk annak idején és megfigyeltük gyorsulását, valamint sebességének az időtől való függését. Megfigyelték és kísérletek millióiban igaznak találták, hogy állandó gyorsulás jön létre. Az állandó erőnek és az állandó gyorsulásnak a hányadosát nevezik tömegnek, amely az illető testre jellemző állandó szám (m):

$$F = ma, \text{ illetve } m = \frac{F}{a}.$$

Századunk elején olyan kísérleteket is végeztek, amelyekben a gyorsulás és ezzel együtt az elért sebesség igen nagyok voltak. Ilyen esetben a tapasztalat az előbbitől eltérő volt. A gyorsított elektron tömege kb. 10^{-30} kg, az elektromos erő $F = 10^{-20}$ newton (0,06 volt/m térerőnél).
Egy kísérlet ezeket az eredményeket adja a sebességnek az időtől való függésére, az adatok egyszerű megválasztása mellett:

t idő (s)	*v* sebesség (m/s)	*a* gyorsulás (m/s^2)	*m* tömeg (kg)
0	0		
…	…		
0,001 0,002	0,1·10^8 0,2·10^8	0,1·10^8:10^{-3}=1·10^{10}	$\dfrac{10^{-20}}{1\cdot 10^{10}}=10^{-30}$
0,01 0,011	1·10^8 1,094·10^8	0,094·10^8:10^{-3}= =0,94·10^{10}	$\dfrac{10^{-20}}{0{,}94\cdot 10^{10}}=1{,}06\cdot 10^{-30}$
…	…	…	
0,027 0,028	2·10^8 2,075·10^8	0,075·10^8:10^{-3}= =0,75·10^{10}	$\dfrac{10^{-20}}{0{,}75\cdot 10^{10}}=1{,}33\cdot 10^{-30}$
…	…		

Különböző időpontokban, különböző elért sebességek mellett figyelték meg a sebesség 0,001 s alatti növekedését és azt találták, hogy az mindig kevesebb: 0,1, azután 0,094, majd 0,075·10^8 m/s. Ebből következően a gyorsulás mindig kisebb Ugyanazon erő nagyobb sebesség mellett már csak kisebb sebességnövekedést okoz, ami a test tehetetlenségének a növekedését jelenti. Ha a sebesség nagyobb, akkor a tömegre nagyobb eredményt kapunk, ezt mutatják ezek a kísérletek. A növekedés mértékére ez az összefüggés érvényes:

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

és ezt a tapasztalat tökéletesen igazolta. c = 3·10^8 m/s a fénysebesség. Ezzel függ össze a fénysebesség elérhetetlensége, ha elektronokat, protonokat, puskagolyókat stb. akarunk gyorsítani.

[Egy másik ilyen kiegészítő tartalmú óra akkor kerül beiktatásra, amikor már elvégeztük a helyzeti és mozgási energia tanítását, azután 3–5 órán keresztül konkrét példákon, feladatokon begyakoroltuk a mechanikai energiamegmaradás törvényét.]

1. óra. Emlékeztetünk a Newton II. törvény kiegészítéseként tanult tényre, a tömegnek a sebességtől való függésére. A következő adatokra hivatkozunk és kiegészítjük azokat a mozgási energiával.

v sebesség (m/s)	*m* tömeg (kg)	*mv*^{2}/2 energia (joule)
0	10^{-30}	0
1·10^8	1,06·10^{-30}	1,06·10^{-30}·(1·10^8)^2/2=0,53·10^{-14}

Amikor az elektron sebességgel mozog, tömege Δm = 0,06·10^{-30} kg-mal lett több, miközben mozgási energiája ΔE = 0,53·10^{-14} joule-lal növekedett. Az együttesen bekövetkező növekedések aránya:

$$\frac{\Delta E}{\Delta m}=\frac{0{,}53\cdot 10^{-14}\ \text{joule}}{0{,}06\cdot 10^{-30}\ \text{kg}}=(3\cdot 10^8\ \text{m/s})^2=c^2.$$

Tehát az energia ΔE joule-lal történő növekedése együtt jár a tömeg $\Delta E/c^2$ = Δm kg-nyi növekedésével. Ez az arányosság a tapasztalat szerint minden energiafajra érvényes; az Einstein-egyenlet:

$$\Delta \text{E} = c^2\cdot\Delta m.$$

Az energia és a tömeg együtt jönnek, együttmennek.

Számítási feladatok.

Az ember tömegének növekedése futáskor, vagy ha felmegy a harmadik emeletre. A Föld tömegének a növekedése a Nap körüli keringése folytán.

[Ismeretes, hogy csak viszonylag kis sebességek esetében adja $mv^2/2$ mozgási energiát, a pontos kifejezés:

$$m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}-1\right).]$$

III. OSZT ÁLY

[Már megtörtént a fizikai fénytan tanítása. Minden tanuló mérte optikai ráccsal a nátrium, higany (esetleg tallium, lítium, kadmium stb.) színképvonalaihoz tartozó hullámhosszakat. A tanulók ismerik a fény hullámtermészetét és felhívtuk a figyelmüket arra, hogy a megvilágítás erőssége a hullámamplitúdó négyzetével arányos. Ezután következik a fotont tárgyaló anyagrész.]

1. óra. A fénysugárban energia terjed, amelyet a fényforrás kibocsát és a felfogó felület elnyel. Ha egy papírlappal fényt fogunk fel, akkor ennek minden cm^2-e egy bizonyos idő alatt egy bizonyos energiát nyel el. Erre vonatkozó kísérletet végzünk el.

Kísérlet. Egy keretbe piros-sárga-zöld-kék üveglemezeket helyezünk egymás mellé és megmutatjuk, hogy nagyjában egyformán átlátszók, mögöttük a megvilágítás erőssége körülbelül egyező. Ezután piros teremvilágítás mellett fotó nagyítópapírt teszünk az üveglemez-sorozat alá, és a fotópapírt néhány másodpercig az üveglemez-sorozaton keresztül fehér fénnyel világítjuk meg. A papírt előhívjuk és megállapítjuk, hogy csak a kék üveg alatt feketedett meg, a zöld alatt esetleg egy keveset, de a sárga és a piros alatt semmit sem.

A kísérlet eredménye: ugyanaz az összenergia nem ugyanolyan hatású a kék fényben, mint a pirosban. Ennek okát 1900-ban Planck fedezte fel: a fény kibocsátása és elnyelése meghatározott adagokban történik, ezek neve foton (fénykvantum). A foton energiája arányos az n rezgésszámmal:

$$E = hn.$$

$h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ joule/hertz a Planck-állandó. Ahhoz, hogy az ezüstbromid szemcséiből ezüst váljon ki, a kék fény fotonjainak energiája elegendő, a pirosé kevés.

(A Planck-állandó nagyságrendje megkapható ebből a kísérletből, de pontos értéke nem. 1 mól AgCl képződési hője 30 kcal = $12\cdot10^4$ joule, tehát 1 darab AgCl bontásához $12\cdot10^4:6\cdot10^{23} = 2\cdot10^{-19}$ joule szükséges, amely érték a látható fény fotonjainak területére esik.)

2. óra. Áttekintjük a különböző színű fények fotonjainak energiaértékeit:

	λ hullámhossz µm-ben	n rezgésszám s^{-1}-ben	E energia joule-ban	m tömeg kg-ban
szélső piros	0,72	$4{,}1\cdot10^{14}$	$2{,}7\cdot10^{-19}$	$3\cdot10^{-36}$
nátrium-sárga	0,589	$5{,}09\cdot10^{14}$	$3{,}168\cdot10^{-19}$	$3{,}52\cdot10^{-36}$
higany-zöld	0,546	$5{,}49\cdot10^{14}$	$3{,}418\cdot10^{-19}$	$3{,}797\cdot10^{-36}$
szélső kék	0,4	$7{,}5\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{-19}$	$5{,}5\cdot10^{-36}$

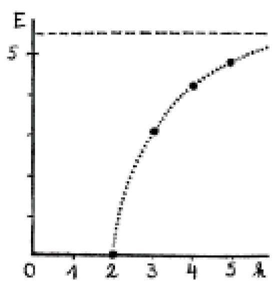
Hivatkozunk a II. osztályban tanult tényre, a tömeg és energia együttes jelentkezésre. Eszerint hn energiájú foton kisugárzásakor hn/c^2 tömeg is távozik. Tehát a fotonnak tömege van, amelynek nagysága hn/c^2. Kiszámítjuk a különböző fotonokhoz tartozó, rendkívül kicsiny tömegeket.

Kétféle anyaggal találkozunk a természetben. Az ún. korpuszkula nem érheti el a fénysebességet, ilyenek a puskagolyó, elektron, proton stb. A másik fajta anyagra, a fotonra az érvényes, hogy (vákuumban) csak fénysebességgel képes mozogni, minden olyan próbálkozás, amely lassítani szeretné, a foton megszűnésével jár és tömegét, energiáját átveszik az elnyelő korpuszkulák. Az ellentétes folyamat a fénykibocsátás.

3. óra. A fénykibocsátás egy esetét vizsgáljuk: a hidrogénatom Balmer-sorozatát. Ha csak lehetséges, spektroszkóppal megnézzük és megmérjük 3–4 vonalának a hullámhosszát. Az elektromos feszültség hatására világító hidrogén néhány pontosan meghatározott hullámhosszúságú fényt, pontosan meghatározott energiájú fotont bocsát ki. Ebből vissza lehet majd arra következtetni, mi történik az atomban. Mint ahogyan egy épületből kiszűrődő hangból következtetni lehet arra, hogy ott bent mit csinálnak.

Táblázatban összegyűjtjük a Balmer-sorozat fényeinek hullámhosszát, kiszámítjuk rezgésszámait és ezeknek a fotonoknak az energiáját. (Az utolsó rovatot később töltjük ki.)

λ hullámhossz µm-ben	n rezgésszám s^{-1}-ben	hn energia joule-ban	k
0,656	$4{,}570 \cdot 10^{14}$	$3{,}025 \cdot 10^{-19}$	3
0,486	$6{,}169 \cdot 10^{14}$	$4{,}084 \cdot 10^{-19}$	4
0,434	$6{,}910 \cdot 10^{14}$	$4{,}574 \cdot 10^{-19}$	5
0,410	$7{,}312 \cdot 10^{14}$	$4{,}840 \cdot 10^{-19}$	6



Ha egy koordináta-rendszerben egymás mellé helyezzük a fotonenergiákat jelző pontokat, ezek valamiféle szabály szerint helyezkednek el. Biztosan oka van annak, hogy a hidrogénatom miért éppen ezeket a fotonokat bocsátja ki. A pontok elhelyezéséből kiolvasható, hogy a foton energiája ilyen törvény szerint alakul.

$$E = A - \frac{B}{k^2},$$

ahol k egész szám, hiszen egyes meghatározott energiájú fotonok kibocsátására kerül sor.

10^{-19} joule-ban számolva $A = 5{,}446$, $B = 21{,}784$.

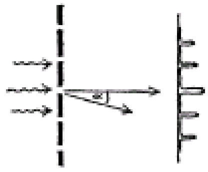
Így sikerült megtalálni azt a leíró törvényt, amely a hidrogén fényének hullámhosszait rendbe szedi. A leíró törvény alapján sikerül majd az atom belsejének a törvényeit felderíteni.

4. óra. A fényinterferencia és a foton összekapcsolása. Emlékezetbe idézünk egy fénnyel végzett interferenciakísérletet. $d = 2$ µm rácsállandójú optikai rácson $\lambda = 0{,}5$ µm hullámhosszú zöld fényt bocsátunk át. A $\lambda = d \sin \alpha$ törvény alapján $\sin \alpha = 0{,}25$-höz tartozó $\alpha = 14{,}5°$-os irányban várható az első erősítés, 30°-nál a második stb. De hogyan csinálják ezt a fotonok?

Elvégezték a következő kísérletet is. A $d = 2$ µm-es rácson 1324 m/s sebességű elektronokat bocsátottak át. Az ernyőként szolgáló fotolemezen elektronok érkezését jelző feketedés volt látható az eredeti irányon kívül 14,5°-os, 30°-os stb. irányokban is. A fényképező lemezen az elektronok eloszlása ugyanolyan volt, mint az előbbi optikai kísérletben a fényer6sségé.

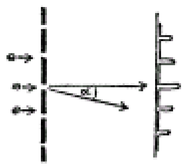
A jelenség magyarázata a következő. Az anyagi részecskék, korpuszkulák és fotonok mozgására egyaránt a következő mozgástörvény érvényes. Egyetlen részecskénél nem lehet megmondani, hová megy. Sok részecskével végzett kísérletben a statisztikai átlagra természeti törvény érvényes, amely annál élesebben jelentkezik, minél több részecske szerepel a kísérletben. Ez a törvény következőképp szól:

Ha m tömegű részecske v sebességgel mozog, akkor kiszámítandó egy $\lambda = h/mv$ hosszúságjellegű mennyiség, mint matematikai segédmennyiség. Meg kell vizsgálni, hogy az adott kísérleti berendezésben egy ilyen hullámhosszúságú hullámzás hol adna (interferenciával) erős hullámzást és a részecskét nagy valószínűséggel ott találjuk meg, ahol ennek a hullámzásnak az intenzitása nagy.



Az elektronokkal végzett kísérlet esetében $m = 10^{-30}$ kg, $v = 1324$ m/s, a hullámhossz λ=0,5 μm. Ilyen hullámhosszú hullámzás 0°, 14,5°, 30° stb. irányokban adna erősítést, ami azt jelenti, hogy ezekben az irányokban találunk sok elektront.

A fénnyel végzett kísérlet esetében $m = hn/c^2$, $v = c$, $\lambda = h{:}hn/c = c/n$, ami a fény ismert hullámhossza. Tehát fotonok esetében maga a fényhullám tölti be az irányító hullám szerepét.



Makroszkópos testeknél olyan kis hullámhosszak adódnak, hogy csak (α=0° jön létre, például 1 m/s sebességgel repülő 1 grammos testnél $\lambda = 6{,}6\cdot10^{-31}$ méter.

Az eljárás szépsége, hogy korpuszkula és foton mozgását egyszerre foglalja törvénybe, azonkívül határesetben adja a klasszikus viselkedést. Egyes részek sorsáról semmit sem lehet mondani, viszont sokra élesen érvényes a törvény. És ami megdöbbentő: akkor is, ha hosszabb ideig végzett kísérletben a fotonok, elektronok olyan ritkán vannak jelen, hogy csak egyenként tartózkodnak az eszköz terében.

IV. OSZTÁLY

[Az elektromosságtan befejeződött az elektromos rezgésekkel és az elektromágneses hullámokkal. A teljes elektromágneses színkép végigtekintése alkalmat ad a foton ismétlésére, valamint a különböző fényelektromos jelenségek tanulmányozására.]

l. óra. Ismétlő feladatok a foton energiájának, tömegének, impulzusának számítására különböző elektromágneses hullámok esetében.

λ hullámhossz	500 méter	0,5 μm	10^{-7} cm = 10 Å
n rezgésszám s^{-1}-ben	$6\cdot10^{5}$	$6\cdot10^{14}$	$3\cdot10^{17}$
hn energia joule-ban	$3{,}972\cdot10^{-28}$	$3{,}972\cdot10^{-19}$	$1{,}982\cdot10^{-16}$
$\frac{hn}{c^2}$ tömeg kg-ban	$4{,}4\cdot10^{-45}$	$4{,}4\cdot10^{-36}$	$2{,}2\cdot10^{-33}$
$\frac{hn}{c}$ impulzus kg$\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}}$-ban	$1{,}32\cdot10^{-36}$	$1{,}32\cdot10^{-27}$	$6{,}66\cdot10^{-25}$

Számítási feladatok.

A legerősebb napfényben (50 000 lux) 1 cm^2-re 0,15 watt érkezik. λ = 0,5 μm-rel számolva ez cm^2-enként hány fotont jelent összesen mekkora tömeggel? ($3{,}75\cdot10^{17}$ foton, $1{,}65\cdot10^{-18}$ kg)

Az egész Föld, 6370 km sugarú főkörének területét számítva mekkora teljesítményt kap és mennyi másodpercenként a fotonokkal érkező tömeg? ($2{,}7\cdot10^{14}$ kW, 2,4 kg; a hőegyensúly folytán ennyit el is veszít.)

A Nap 1 cm^2-e mennyi teljesítményt sugároz ki (arányossággal számolva) és az egész napfelszín mekkora teljesítményt és másodpercenként mennyi tömeget bocsát ki? (7 kW/cm^2, $4{,}2 \cdot 10^{23}$ kW, $5 \cdot 10^6$ tonna/s)

2. óra. Fotocella és fényelem tanítása, bemutatása. Gyakorlati alkalmazások, például fotometria és hangosfilm. Elektronsokszorozó bemutatása.

3. óra. Az elektronvolt nevű energiaegység (1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule). Az 1. órán szereplő fotonok energiái elektronvoltban. Számítási feladatok.

Mekkora sebességgel lép ki fotoelektromos jelenség alkalmával a cézium-fémből az elektron, ha 0,5 µm-es hullámhosszú fénnyel világítjuk meg és a kilépési munka $3 \cdot 10^{-19}$ joule? (470 km/s)

A platinánál a kilépési munka 6 eV. Milyen rövid hullámhossznál kezdődik a fotoelektromos hatás? (0,207 µm)

4. óra. A Compton-effektus, természetesen nem tényleges kísérlet, hanem egyszerű adatokkal megválasztott numerikus példa alapján.

Eredetileg adva van $9 \cdot 10^{-31}$ kg tömegű nyugvó elektron, ebbe beleütközik 10 Å hullámhosszú, $3 \cdot 10^{17}$ s^{-1} rezgésszámú, $hn = 200 \cdot 10^{-18}$ joule energiájú, $2{,}2 \cdot 10^{-33}$ kg tömegű, $6{,}66 \cdot 10^{-25}$ kg·m/s impulzusú foton. Az ütközés centrális, vagyis a foton eredeti irányában verődik vissza, fénysebességgel. Az elektron sokkal nagyobb tömegű, mint a foton, a jelenség arra emlékeztet, amikor egy pingponglabda pattan vissza egy futball-labdáról.

Az ütközés után az elektron $0{,}0148 \cdot 10^8$ m/s sebességgel indul el jobbra, amivel $0{,}98 \cdot 10^{-18}$ joule mozgási energia és $13{,}30 \cdot 10^{-25}$ kg·m/s impulzus jár. A balra visszalökődő fotonnak már csak $199{,}02 \cdot 10^{-18}$ joule energiája van, aminek megfelelően rezgésszáma $2{,}9853 \cdot 10^{17}$ s^{-1}, hullámhossza 10,0492 Å. A foton csak fénysebességgel haladhat, ezért energiája csak a rezgésszám kisebbedése révén csökkenhet, a visszavert Röntgen-sugár kissé hosszabb hullámú. Az energia (tömeg) megmaradásán kívül az impulzus is megmarad. Kísérlet előtt $6{,}66 \cdot 10^{-25}$ kg·m/s volt az összes impulzus, jobb oldal felé irányulva. A kísérlet után az elektron jobbra mutató $13{,}30 \cdot 10^{-25}$ kg·m/s impulzusán kívül van a visszavert foton részéről $-6{,}64 \cdot 10^{-25}$ kg·m/s impulzus balfelé, az összeg most is: $13{,}30 \cdot 10^{-25} - 6{,}64 \cdot 10^{-25} = 6{,}66 \cdot 10^{-25}$.

[Ezután következik a tulajdonképpeni atomfizikai rész, ahol a sorrend: elemi részek → atommag → elektronhéj (egész atom) → vegyület, kristály.]

5. óra. Az elemi alkatrészek ismertetése. Méretükről egészen pontosan nem lehet nyilatkozni (kb. 10^{-13} cm), de tömegük, töltésük 6 tizedesig pontosan megadható. További adat a tengely körüli forgás impulzusnyomatéka, mágneses nyomatéka (spin). A felsorolt részek: elektron, pozitron, neutron, proton, neutrino. Adataik ismertetése és összehasonlítása.
Számítási feladatok.

Kb. mennyi a neutron sűrűsége 10^{-13} cm-es átmérő esetében? ($3{,}2 \cdot 10^{15}$ $gramm/cm^3$)

A Föld neutronsűrűség mellett mekkora volna? (150 m átmérőjű)

6. óra. Az elemi részek egymásba való átalakulása. Példák.

1.	neutron =	proton +	elektron +	energia (neutrino)
	1,67489 =	1,67252 +	0,00091 +	$0{,}00146 \cdot 10^{-27}$ kg.

A neutron felezési ideje kb. 1000 s.

2. Megfordítása: proton meg elektron energiafelvétellel alakulhat neutronná.

3. Szétsugárzás: elektronból és pozitronból két, egyenként $9\cdot10^{-31}$ kg tömegű, $8{,}1\cdot10^{-14}$ joule = 1 MeV energiájú foton keletkezhet, vagyis 0,025 Å hullámhosszú γ-sugárzás.

4. Párképződés: elektron-pozitron pár keletkezése fotonból.

Számítási feladatok.

1 gramm anyag szétsugárzásakor mennyi energia keletkezne? ($2{,}5\cdot10^{6}$ kWh)

Milyen hullámhosszú γ-sugárzás adhatna szétsugárzáskor proton-antiproton párt? ($1{,}32\cdot10^{-13}$ cm)

Elektron-pozitron párképződésnél mekkora sebességgel indul el egy ólomatom, amely az impulzusfelesleget elviszi? (1560 m/s)

7. óra. Az elemi részek átalakulásai közben változatlanul megmaradó mennyiségek áttekintése:

tömeg (energia),
elektromos töltés,
impulzus,
(spin).

[A III. osztályos tananyagban szerepelt ún. anyaginterferencia felújítása, ismétlése.]

Az anyagi részek mozgásának általános törvénye: *m* tömegű, *v* sebességű részecskénél számítandó egy hullámhossz (de Broglie):

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

A továbbiakban egy ilyen hullámhosszú hullámzás mint matematikai segédmennyiség szerepel. Ahová ez a hullámzás eljut, illetve ahol a hullámtan törvényeiből erős hullámzás következik, ott van nagy valószínűsége annak, hogy a részecskét megtaláljuk. (A hullámzó mennyiség mint valamilyen hullámzó skaláris mennyiség gondolható el, hullámszerűen változhatna például a sűrűség, vagy a törésmutató.) A hullámzás erősségét amplitúdójának, ψ_0 -nak a négyzete jelenti.

[Nagyon célszerű, ha annak idején a hangtanban, fénytanban megtárgyaljuk, hogy az intenzitás az amplitúdó négyzetével arányos.]

Eddigi példa, amely a mozgás általános alaptörvényének az alkalmazását mutatta: a III. osztályos tananyag 4. órájában tárgyalt ún. anyaginterferencia, amely sok, egyenlő sebességű elektron esetében lép fel.

8. óra. A részecske mozgását megszabó, a ψ matematikai segédmennyiség hullámzását felhasználó törvény alkalmazásában az a nehéz pont, hogy meg kell találni az illető esetben szereplő hullám kialakulását, viselkedését.

Ezen az órán megmutatjuk, hogy egyetlen *v* sebességgel mozgó, *m* tömegű részecske esetében milyen a ψ-hullám:

$$\psi = \frac{A}{\sqrt{a}}\cdot e^{-2(x/a)^2}\cos\omega t,$$

az amplitúdó:

$$\psi_0 = \frac{A}{\sqrt{a}}\cdot e^{-2(x/a)^2}.$$

A bemutatott és a tanulók között kiosztott pontos rajz $m = 9\cdot10^{-31}$ kg-ra (elektron) és $v = 1{,}47\cdot10^{7}$ m/s-ra (600 volt) vonatkozik. Ekkor $\lambda = 0{,}5$ Å és $a = 1$ Å.

A rajzból látszik, hogy egy hullámcsoportról van szó, amelynek a szélességét *a* adja meg. A hullámcsomag idővel kiszélesedik. $t = 8{,}54\cdot10^{-17}$ s múlva, amikor a részecske 12,56 Å utat tett meg, a körülbelüli szélesség már 2 Å. Ez is rajta van a kiosztott és bemutatott rajzon.

[A normálás kérdését, *A* nagyságát csak futólag érintjük. Az óra célja egy konkrét eset bemutatása, amely alkalmat ad a határozatlansági törvény bemutatására. Ha megmondjuk, hogy a kétszeres szélességre való szétfutás ideje $2\pi\sqrt{3}\,a^2\, m/h$, akkor kiszámítható, hogy egy 40 cm-es, 50 kg-os ember ψ-hulláma $4\cdot10^{27}$ év alatt futna szét kétszeresére.]

A szóban forgó rajzról megállapíthatjuk, hogy a helymérés pontatlansága kb. 1 Å, az impulzusmérésé kb. $1\cdot10^{-24}$ kg·m/s, mert a hullámcsomag-ábra ezt elvileg magával hozza. A pontatlanságok szorzata:

$$10^{-10}\ \text{m} \cdot 10^{-24}\ \text{kg·m/s} = 10^{-34}\ \text{kg·(m/s}^2\text{)·m·s} \approx h/2\pi.$$

Az impulzus- és helymeghatározás pontatlanságainak a szorzata már elvben sem lehet $h/2\pi$-nél kisebb (Heisenberg-féle határozatlansági törvény).

Számítási feladat.

Ha egy 50 kg-os ember helyét 1 mm pontossággal adjuk meg, akkor mennyi sebességmeghatározásának minimális hibája? ($2\cdot10^{-33}$ m/s)

9. óra. Az elemi részek adatait meghatározó alapvető kísérletek rövid ismertetése. Rutherford-szórás. Tömegspektrográf. Millikan-kisérlet. Stern-Gerlach-kisérlet (szerepelt már a mágnességtanban is).

10. óra. A periódusos rendszer első 16 elemének felépítése vázlatosan. Rendszám, neutronszám, tömegszám. A mag és a héj méretének, tömegének egybevetése. Ionképződés.

Számítási feladat.

0,5 Å távolságból mekkora egy proton és elektron között az elektrosztatikus erő és a gravitációs erő? ($8\cdot10^{-8}$ newton és $3{,}6\cdot10^{-47}$ newton). A gravitációs erő csak nagy tömegek összehalmozásakor jut érvényre, belőle csak vonzás van.

11. óra. A magerő. Létezésének szükségessége. Elektromos töltéstől való függetlensége, telítetési jellege (légypapír-hasonlat).

Az elektronhéjnál $8\cdot10^{-8}$ newton kezdeti erőnél 0,5 Å távolságból a végtelenbe viváshez $40\cdot10^{-19}$ joule = 25 eV energia tartozik (kalória-egyenérték 40 cal/gramm).

Atommagnál 10^{-13} cm távolságban 1 protonra 800 newton taszítóerő hat, a végtelenbe vivés munkája $8\cdot10^{-13}$ joule = 5 MeV.

12. óra. Három atommag esetében kiszámítjuk a nukleonok tömegének összegezésével adódó tömeget, ezt összehasonlítjuk a valóságos tömeggel és a tömeghiányt 1 nukleonra vonatkoztatjuk. A számítást $6\cdot10^{23}$ darab keletkező atommagra végezzük el.

	${}^{4}_{2}\text{He}$	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	${}^{235}_{92}\text{U}$
Számított	4,016892 g	56,239332 g	236,028666 g
Észlelt	3,986500 g	55,710595 g	234,112616 g
Hiány	0,030392 g	0,528737 g	1,916050 g
a tömegszám egységére jut	0,007598 g	0,009441 g	0,008153 g

Ha 1 grammnyi, $6\cdot10^{23}$ darab atommagot állítunk össze nukleonjaiból, akkor ekkora tömegű az összes eltávozó energia (foton). A tömeghiány a képződéskor eltávozó energia mértéke.

Adataink első közelítésben a magerőnek a nukleonok számától való függetlenségét mutatják. De kis eltérések vannak. Kisebb rendszámnál azért kevesebb az 1 nukleonra jutó képződési energia, mert a felület dominál a térfogattal szemben, minden nukleon nem tudott teljesen a mag belsejébe kerülni. A nagyobbaknál már túl nagy lesz a protonok közötti taszító erő. A vas atommagja a legstabilisabb; kisebb magok egyesítésekor, nagyobb magok hasításakor várható energia-felszabadulás.
Számítási feladat.
Az 1 gramm hélium keletkezésekor elment 0,007598 grammnyi fotonnak mennyi az energiája? (180 000 kWh)

13. óra. Izotóp elemek. Példák: klór, urán, hidrogén izotópjai.

14. óra. Nehéz hidrogén és trícium, ezek oxidjai. Izotóp elválasztási eljárások.

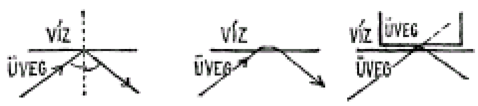
15. óra. A radioaktivitás felfedezésének története. α és β átalakulás. A γ-sugárzás.
Számítási feladat.
A rádium atommagjából az α-rész $1{,}515 \cdot 10^7$ m/s sebességgel indul. Mennyi a mozgási energiája? Mennyi energiát ad le 1 gramm rádium teljes elbomlásakor? (4,78 Me V , 500 000 kcal)

16. óra. A felezési idő. Radioaktív bomlási sorok. Az aktivitásegysége: 1 curie, (ha $3{,}7 \cdot 10^{10}$ bomlás történik másodpercenként; rádium esetében 1 grammnál valósul meg). Az 1 grammnyi radioaktív anyag aktivitása fordítva arányos a felezési idővel.

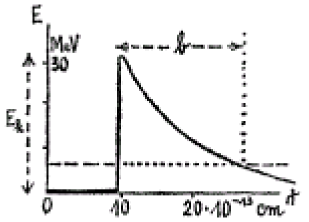
17. óra. A radioaktív kutatás kísérleti eszközei, bemutatásokkal: fényképezés, elektroszkóp, szcintilláció, GM-cső, Wilson-kamra. További eszközök: buborékkamra, szikrakamra, szilárdtest-nyomdetektor.

18. óra. Számítási feladatok.
Mennyi urán aktivitása 1 Ci? (2,8 tonna)
Mennyi polónium aktivitása 1 Ci ? ($2{,}3 \cdot 10^{-4}$ gramm)
Kórházi kobaltágyúban levő 4,5 kCi aktivitású ${}^{60}_{27}\mathrm{Co}$-nek mennyi a tömege? (14 gramm)
1959. január 1-én 1 μCi aktivitású ${}^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ -nak mennyi az aktivitása 1975. február 21-én? (0,7 μCi)
Egy 0,7 μCi aktivitású ${}^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ -készítményben mennyi a radioaktív elem mennyisége és hány bomlás történik másodpercenként? ($1{,}33 \cdot 10^{-8}$ gramm, 26000)

19. óra. Az alagút-effektus. A részecske mozgását a ψ-hullámmal lehet megjósolni. Vizsgáljuk meg egy hullám teljes visszaverődését.



Üvegből víz felé menő hullám teljes visszaverődést szenved. De kissé át kell mennie a másik közegbe, különben honnan tudná, hogy vissza kell-e fordulnia vagy nem. Ha nagyon közel melléje helyezünk egy másik üvegtömböt, akkor a hullám egy kis része belemegy ebbe. Így a fénysugár kis része átmegy a tiltott rétegen. Ez minden hullámra igaz, így ψ-re is. Tehát igen kis valószínűséggel oda is eljut a részecske, ahová energiája alapján nem volna lehetséges eljutnia.



Alkalmazzuk az alagút-effektust a rádium α-bomlására. A rádiumból 4,78 MeV energiával repül ki az α-rész, tehát a radon magja ennyivel kisebb energiájú, mint a rádiumé. Miért nem bomlik el azonnal minden rádium-atommag? Mert egy energiaküszöb akadályozza. A rádium atommagjának a sugara $9\cdot10^{-13}$ cm, itt a Coulomb-erő (és a magerő) 470 newton. Az α-rész eltávolításához szükséges munkavégzést mint a távolság függvényét mutatja az ábra. Legalább 31 MeV mozgási energia mellett tudna csak az α-rész eltávozni, de csak 4,78 MeV-vel rendelkezik. Néhány közülük mégis távozik az alagút-effektussal, mert ψ-függvénye igen kis mértékben kint is hullámzik, egy kevéssé ott is van ψ_0^2, tehát bizonyos valószínűséggel ott is megjelenik α-rész. Ezek adják a magot elhagyó α-sugárzást.

A kijutás valószínűsége:

$$e^{-\frac{4\pi\sqrt{2m}}{h}\cdot b\cdot\sqrt{E_h}}.$$

Számítási feladat.

Mi a valószínűsége annak, hogy egy 60 kg-os ember egyszer csak egy 10 m magas fal tetején legyen? ($10^{-7\cdot10^{37}}$)

[Hasznos, ha már a fénytanban felhívjuk a figyelmet a teljes visszaverődéskor a tiltott közegbe átmenő fénysugárra.]

20. óra. A mesterséges atomátalakítás. Az atommagba nagy sebességgel elektronokat, protonokat, deutonokat, α-részeket, neutronokat stb. ütköztetve az atommagban ezekből valami benn marad, sokszor egy másik részecske távozik. Mindenképp új atommag keletkezik. Néhány példa. Legtöbbször a mesterségesen előállított elem radioaktív (mesterséges radioaktivitás). Ekkor elsősorban negatív vagy pozitív bétasugárzás fordul elő, nem túl hosszú felezési időkkel.

21. óra. Alkalmazások technikában, kémiában, biológiában. Tríciumgyártás. Kormeghatározás radioaktív szénnel.

22. óra. Gyorsító berendezések. Szalaggenerátor. Lineáris gyorsító. Ciklotron. Szinkrotron. Tárológyűrűk. Betatron.

23. óra. Az urán hasadása. A láncfolyamat feltételei: tiszta 235-ös urán vagy plutónium és a kritikus méret elérése. Az uránós (plutóniumos) atombomba.

24. óra. Az atomreaktor. Három adat: a 235-ös urán hasításához kell 1 km/s sebességű neutron, a közepes (100 km/s) sebességűeket a 238-as urán nyeli el későbbi plutóniumképződés közben, a 235-ös urán hasadásakor 100000 km/s sebességű neutronok keletkeznek. Ebből következően a hasadáskor keletkező gyors neutronokat lassítani kell.

A klasszikus felépítésű atomreaktor. Az energia kihozatala a hűtőanyaggal és hőkicserélő után gőzfejlesztés a turbina számára.

A hasadó anyagok fajai: természetes izotópkeverék urán, dúsított urán, tiszta 235-ös urán, plutónium.

Lassító anyagok: grafit, nehéz víz, víz nyomás alatt.

Hűtő anyagok: víz nyomás alatt, megolvasztott nátrium, széndioxidgáz.

A reaktorok fajai cél szerint: kutató, energiatermelő, plutóniumgyártó, atomtenyésztő reaktor.

25. óra. Számítási feladatok.

Amikor egy 235-ös uránatom molibdénre, ónra és 3 neutronra esik szét, akkor 187,2 MeV energia szabadul fel. Ez 1 kg-nál mennyi energiát jelent? ($20 \cdot 10^6$ kWh)

Naponta mennyi urán kell egy elektromosan 1000 MW-os erőműben, ha a hatásfok 30%? (3,2 kg tiszta izotóp, vagyis 544 kg természetes urán)

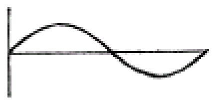
Mennyi energia keletkezik 1 kg hélium szintézisénél? ($187{,}5 \cdot 10^6$ kWh)

A hidrogénbomba. A fúziós reaktor problémája.

26. óra. Dolgozatírás.

[Az elektronhéjakra áttérve a hidrogénatom lesz az első problémánk. Bevezetésül rezgéstani fogalmakat kell feleleveníténünk, hogy a minket érdeklő ψ-hullámzást használni tudjuk.]

27. óra. Amikor a húr rezeg, az amplitúdó a távolság szinuszával arányos:

$$\psi_0 = \psi_{00} \sin \pi \frac{x}{L} = \psi_{00} \sin 2\pi \frac{x}{\lambda_1},$$

mert alaprezgéskor $L = \lambda_1/2$. A húr maximális sebessége az egyes pontokban:

$$v_0 = \frac{2\pi \psi_{00}}{\lambda_1} \sin 2\pi \frac{x}{\lambda_1}.$$

A húr energiája (helyzeti és mozgási energiájának összege) arányos a legnagyobb sebesség négyzetével:

$$E_1 = \frac{C}{\lambda_1^2} \cdot \psi_{00}^2.$$

Mindez az alaprezgésre vonatkozott. Az első felsőrezgésben $\lambda_2 = \lambda_1/2$ és az energia

$$E_2 = \frac{4C}{\lambda_1^2} \cdot \psi_{00}^2 = 2^2 \cdot E_1.$$

Háromorsós felsőrezgésnél

$$E_3 = \frac{9C}{\lambda_1^2} \cdot \psi_{00}^2 = 3^2 \cdot E_1 \text{ stb.}$$

Általában n orsós rezgésnél $E_n = n^2 \cdot E_1$

n csak egész szám lehet, (a rezgés módját megadó kvantumszám).

Más stabilis rezgés nem létezik. Minden egyes rezgési formához meghatározott energia tartozik. Levezethető a húrra egy ilyen törvény:

$$\psi_0 = \psi_{00} \sin \frac{2\pi}{\lambda} x,$$

$$\frac{d\psi_0}{dx} = \frac{2\pi}{\lambda} \psi_{00} \cos \frac{2\pi}{\lambda} x,$$

$$\frac{d^2\psi_0}{dx^2} = -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \psi_{00} \sin \frac{2\pi}{\lambda} x = -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \psi_0.$$

A húr hullámzási törvénye:

$$\frac{\mathrm{d}^2\psi_0}{\mathrm{d}x^2}+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\psi_0=0.$$

A hullámzás végbemehet felületen vagy térben is. Ilyenkor csomóvonalak illetve csomófelületek keletkezhetnek. Felületi rezgésnél 2, térbelinél 3 kvantumszám határoz meg egy hullámzási formát. Minden egyes kvantumszám-kombinációhoz tartozó hullámzáskor az energiának egy meghatározott értéke van.

[Már a III. osztályban a hullámtanban alapozandók meg ezek a gondolatok. A húr Melde-féle kísérlete a felsőrezgésekkel ismét bemutatandó. Jó szolgálatot tesznek a régi időkből megmaradt Chladni-lemezek. A matematika részéről jó előkészület volna, ha használtak volna a második differenciálhányadosra valamilyen jelölést, ha ismernék a sinkx, coskx, e^{kx} differenciálhányadosát. Vágyálom.]

28. óra. A hidrogénatomban a mag környezetében mozgó elektron viselkedését a ψ-hullámos eljárással akarjuk megismerni. Ha az ehhez az esethez tartozó matematikai segédhullámzást megtaláltuk, akkor ψ_0^2 fogja majd megadni annak a valószínűségét, hogy azon a helyen találjuk az elektront.

A mag körül abban a pillanatban r méter távolságban levő elektron helyzeti energiája a végtelenhez képest negatív; joule-ban:

$$E_h=-\frac{(1{,}6\cdot10^{-19})^2\cdot9\cdot10^9}{r}.$$

A mozgási energia $E_m=mv^2/2$ pozitív, az összes energia mégis negatív:

$$E=\frac{mv^2}{2}--\frac{(1{,}6\cdot10^{-19})^2\cdot9\cdot10^9}{r}.$$

Ha a húrnál megismert hullámzási törvényt akarjuk használni, akkor azt háromdimenziósan kell felírnunk:

$$\frac{\partial^2\psi_0}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi_0}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi_0}{\partial z^2}+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\psi_0=0.$$

A hullámhossz $\lambda = h/mv$, ezért:

$$\frac{\partial^2\psi_0}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi_0}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi_0}{\partial z^2}+\frac{8\pi^2m\cdot mv^2}{2h^2}\psi_0=0.$$

Behelyettesítve a mozgási energiát:

$$\frac{\partial^2\psi_0}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi_0}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi_0}{\partial z^2}+\frac{8\pi^2m}{h^2}\left[E+\frac{(1{,}6\cdot10^{-19})^2\cdot9\cdot10^9}{r}\right]\psi_0=0.$$

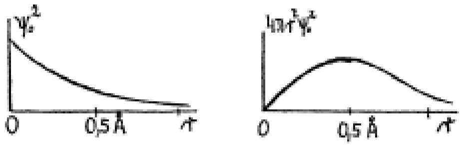
Ez a hidrogénatom elektronjának Schrödinger-egyenlete (1925). ψ csak úgy hullámozhat, ahogyan ez az egyenlet megengedi. De ez az egyenlet sokféle hullámzást enged meg.

Alapállapotban a megoldás $\psi_0 = e^{-r/a}$, ahol

$$a=\frac{h^2}{4\pi^2m(1{,}6\cdot10^{-19})^2\cdot9\cdot10^9}=0{,}5\ \text{Å}.$$

Ezt az eredményt eredményesen lehet a Schrödinger-egyenletbe helyettesíteni, közben kiderül, hogy az összes energia:

$$E_1=-\frac{2\pi^2(9\cdot10^9)^2\cdot m\cdot(1{,}6\cdot10^{-19})^4}{h^2}=-21{,}9\cdot10^{-19}\ \text{joule}.$$



ψ_0 és ψ_0^2 a távolsággal exponenciálisan csökken. Ha gömbfelületek mentén vizsgáljuk ψ_0^2-et, akkor a = 0,5 Å táján maximumot találunk. Ebben a távolságban van viszonylag legtöbbször az elektron.

Az atom gömbszimmetrikus. Csomósík nincs.

[A normálás kérdését nem érintettük. Egyszerűség kedvéért a Bohr-rádiuszt kerek 0,5 Å-nek vettük.

A $\psi_0 = e^{-r/a}$ képletbe 0,2 Å-ös sűrűségben az órán behelyettesítünk padoszloponként. ψ_0^2-et és $4\pi r^2\psi_0^2$-et is ugyanígy közösen számítjuk. Hasznos, ha találunk olyan régebbi függvénytáblázatot, amelyben van e^x.

Néhány tanuló vállalta otthoni munkában az $e^{-r/a}$ megoldásának a Schrödinger-egyenletbe való helyettesítését. Azonban közben minden egyes eredményt ellenőrizni kell, nehogy elszámolás fölösleges időveszteséget okozzon. A helyettesítés végén lesz egy r-mentes és egy $1/r$ tartamú tag. Ezek összege csak úgy lehet minden r-nél nulla, ha az együtthatók is nullák. Ez utóbbi két állítás adja a és E_1 értékét.]

29. óra. ψ-nek felsőrezgései is lehetnek csomófelületekkel. Ezek az ún. gerjesztett állapotok, amelyek akkor jönnek létre, ha a hidrogénatom energiát vesz fel. Az alaprezgést n = 1 főkvantumszámmal jelöltük meg. n =2 első felsőrezgéshez ψ-nek 1 csomófelületű rezgései tartoznak (rezgések 2 orsóban). Ezek is többfélék.

Az l = 0 mellékkvantumszámmal megjelölt esetben a csomófelület gömbfelszín, ekkor $\psi_0 = (r\text{-}2a)e^{-r/2a}$. Gömbfelszín szerint számolva kb. 2,7a-nál van maximuma, a-nál kis maximuma van és 2a-nál csomófelszíne van. Az atom gömbszimmetrikus.

Az l = 1 mellékkvantumszámú esetekben egy-egy csomósík van, valamelyik koordinátatengelyre merőlegesen. A megoldások $\psi_0 = ze^{-r/2a}$, $\psi_0 = xe^{-r/2a}$, $\psi_0 = ye^{-r/2a}$. Az esetek megkülönböztethetők m = 0, m = +1, m = –1 mágneses kvantumszámmal. Az l = 1-bez tartozó három eset különbözősége akkor nyilvánul meg, ha a hidrogénatom mágneses térbe kerül, mert ekkor a háromféle állapotban különböző beállás történik.

Minden n = 2-böz tartozó esetben az elektron összes energiája: $E_n = E_1/n^2$. A kvantumszámok csoportosítása szerint n^2 különböző állapot lehetséges. Mindegyikhez kétféle spinbeállás tartozik.

[A Schrödinger-egyenletbe való behelyettesítési próbák megfelelő vezetés és segítő ellenőrzés mellett most is lehetségesek. Az n = 2, l = 0-hoz tartozó grafikonokat is el szokták egyesek készíteni. Mutatni lehet ábrákat és képeket magasabb kvantumszámú állapotokról.]

30. óra. A vonalas színképek keletkezése. A magasabb energiájú állapotból egy alacsonyabb energiájú állapotba való átalakuláskor 1 foton sugárzódik ki, amely elviszi az energiakülönbséget. Ebből következően a k főkvantumszámú állapotból a j főkvantumszámú állapotba való átmenetelkor a kisugárzott fény rezgésszáma:

$$\frac{|E_1|}{h}\cdot\left(\frac{1}{j^2}-\frac{1}{k^2}\right).$$

A Balmer-sorozat esetében j = 2, k = 3.
A Balmer-sorozat vonalainak megfigyelése.

31. óra. Hasonló elvek érvényesek a többi elemre is. Neon, kadmium, higany színképének bemutatása. A fénycső működése, gyújtása.
Számítási feladat.

Milyen hullámhosszú fény keletkezik, ha a hidrogénatom elektronja n = 5-ről n = 1-re alakul vissza? (0,093 μm)

32. óra. A periódusos rendszer. A Pauli-féle törvény: egy atomban nem lehet két olyan elektron, amely valamennyi kvantumszámában egyezik.

A tanulók megvonalzott üres táblázatot kapnak, amelybe együtt jelöljük be az elektronokat. A táblázat a titánig tart, első sorai így kezdődnek:

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">$n = 1$</td><td colspan="2">$n = 2$</td><td colspan="3">$n = 3$</td></tr>
<tr><td>$l = 0$</td><td>$l = 1$</td><td>$l = 0$</td><td>$l = 1$</td><td>$l = 2$</td></tr>
<tr><td>1 H</td><td>×</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2 He</td><td>× ×</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3 Li</td><td>× ×</td><td>×</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>4 Be</td><td>× ×</td><td>× ×</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">5 B</td><td rowspan="3">× ×</td><td rowspan="3">× ×</td><td>×</td><td>$m = 0$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>$m = +1$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>$m = -1$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">6 C</td><td rowspan="3">× ×</td><td rowspan="3">× ×</td><td>×</td><td>$m = 0$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>×</td><td>$m = +1$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>$m = -1$</td><td></td><td></td></tr>
</table>

33. óra. Röntgen-sugárzás. Nagy rendszámú elem atomjában az elektron átállása alacsonyabb főkvantumszámú állapotba sokkal nagyobb energiakülönbséget jelent, nagyobb energiájú foton, rövidebb hullámú elektromágneses hullám keletkezik. Ez a Röntgen-sugár. A Röntgen-lámpa. A Röntgen-sugarak tulajdonságai. Alkalmazásuk többek között kristályrácsok, molekulaszerkezetek vizsgálatára.

[A Röntgen-sugarak tárgyalása a karakterisztikus sugárzáson alapul, a fékezési sugárzásról megjegyzésként szót lehet ejteni.]

34. óra. Izzó szilárd testek és folyadékok fénykibocsátását vizsgáljuk. A nagy közelség miatt az elektronok energiáit a szomszédosak is befolyásolják, ezért igen sokféle energiájú foton keletkezik, a színkép folytonos. A kisugárzott teljesítmény függ a hőmérséklettől és a hullámhossztól. Erre vonatkozóan a Planck által levezett törvény:

$$P = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}.$$

E függvény menetét ábrázoló grafikonokról is látszik, hogy a maximumhoz tartozó hullámhossz magasabb hőmérsékleten fordított arány szerint kisebb. Wien törvénye:

$$\lambda_m \cdot T = 2900,$$

ha λ μm-ben van adva. Az összes kisugárzott teljesítményt a görbe alatti terület adja, a Stefan–Boltzmann-féle törvény:

$$P_{össz} = 5{,}77 \cdot 10^{-12} T^4,$$

ha $P_{össz}$ wattban veendő és 1 cm^2-ről van szó.

Kvalitatív kísérleti bemutatás: izzószállal folytonos színképet állítunk elő és változtatjuk az izzító áram erősségét.

Hivatkozás alkalmazásokra: izzólámpa hatásfokát nagyon javítja a hőmérséklet emelése, hőmérsékletmérés pirométerrel, csillag felszíni hőmérsékletének meghatározása.

[Következik az anyag további felépítése az atomokból. Sorra vesszük a négy főesetet.]

35. óra. A heteropoláros kristály. Ellentétes töltésű ionok kristályrácsot alkotnak, amelyet az elektromos vonzóerő tart össze. Az ionok mint golyók szorosan összeérnek. A vegyérték egy skaláris szám, amely a töltések számát jelenti. A szabályos belső szerkezet eredménye a kristályalak. A lapszögek állandóságának a törvénye. A kristály elektromosan szigetel, mert az ionok helyhez vannak kötve; megolvasztva vagy vízben oldva jól vezetik az áramot.

Kristályok és rácsmodellek bemutatása.

A nátriumklorid (felületen centrált kockarács) egyik síkjának méretarányos rajza.

A céziumklorid (köbösen centrált kockarács) egyik átlós síkjának méretarányos rajza. Számítási feladat.

Mennyi a nátriumklorid sűrűsége? (Egy elemi kockát számítunk, amelyben összesen 1/2 Na^+ és 1/2 Cl^- van; 2,23 g/cm^3.)

36. óra. Számítási feladatok.

Mikor fér el pontosan egy kation 8 anion-golyó között? (Ha a rádiuszok aránya $1/2+\sqrt{3}/2 = 1,366$.)

Mikor fér el pontosan egy kation 6 anion-golyó között? (Ha a rádiuszok aránya $1 + \sqrt{2} = 2,414$.)

Mikor fér el pontosan egy kation 4 anion-golyó között ? (Ha a rádiuszok aránya $2 + \sqrt{6} = 4,449$.)

Ezért kristályosodik a céziumklorid köbösen centrált kockarácsban (a rádiuszarány 1,10), a nátriumklorid felületen centrált kockarácsban (a rádiuszarány 1,85) és a lítiumjodid tetraéderes gyémántrácsban (rádiuszarány 4,44).

Mindez pontos rajzok és modellek alapján.

Goldschmiedt törvénye: az ionok a legszorosabb csomagolásra törekszenek.

37. óra. Homopoláros molekulák. A legegyszerűbb eset a hidrogénmolekula. A két elektron ψ-hullámait összegezzük. Hullámok esetében az amplitúdókat kell összegezni:

$$\psi_0 = \psi_1 + \psi_2.$$

Az előfordulás valószínűségének a mértéke:

$$\psi_0^2 = (\psi_1 + \psi_2)^2 = \psi_1^2 + 2\psi_1\psi_2 + \psi_2^2.$$

Ez más, mint a külön vett két hullám intenzitásainak az összege. Interferenciáról van szó. Az atommagok közötti részen az eredmény erősítés, itt az elektron előfordulásának a valószínűsége igen nagy.

A homopoláros molekulában az atomokat közös elektronhéj fogja össze, amely mindegyik benne levő mag számára lezárt héj. A már lezárt elektronhéjak változatlanok maradnak. Atomtörzs = mag + lezárt héjak. A vegyértéket két, ellentétes spinű, főként a magok összekötő egyenesében található elektronból álló pár jelenti. A vegyértéknek térbeli iránya van.

További vázlatosan megrajzolt példák: H_2O, Cl_2, H_2S, CO_2, CO a távolságok és szögek megadásával.

A homopoláros molekulákból kristály képződhet, amelyet a molekulák környezetében megmaradó, viszonylag gyengébb elektrosztatikus erők tartanak össze. Ilyen például: jód, cukor, naftalin.

38. óra. További molekulavázlatok: NH_3, NH_4^+. Ez utóbbi példa az összetett ionra: az atomtörzseket közös elektronhéj fogja össze, amely mindegyik mag számára lezárt, de az egész képződmény elektromosan nem semleges. Az összetett ionok azután heteropoláros kristályokban szerepelnek.

További molekulák: metán, etilén. Ez utóbbinál az első vegyérték (σ-kötés) és második vegyérték (π-kötés) különbsége.

Megrajzolandók még: SO_4^{--}, OH^-, H_2O_2.

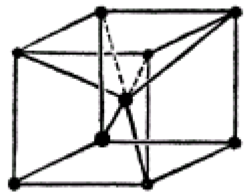
39. óra. A fémek. A fémkristály rácspontjaiban a fém ionjai foglalnak helyet, a közöttük levő teret az elektronok egyenletes sűrűségben töltik be (ún. elektrongáz). Az egész kristály kifelé elektromosan semleges. A sok, mozgásra képes elektron következtében jól vezetik az áramot.

Előforduló kristályrácsok: felületen centrált rács (mintha a nátriumklorid rácsából a kloridokat elhagynánk), például ezüst, vörösréz; köbösen centrált kockarács, például vas; hatszöges rács, például magnézium.

Számítási feladatok.

Hány elektron van 1 cm^3 ezüstben és mennyi ezeknek a töltése? ($0{,}6 \cdot 10^{23}$ darab, 9400 coulomb).

Ha 1 cm^2 keresztmetszet területű ezüstrúdon 1 amperes áram folyik át, akkor mennyi az elektronok sebessége? (1 μm/s)



40. óra. A homopoláros kristály. Példa a gyémánt kristályrácsa. Összefüggése a kockaráccsal. A kristályrácsot atomtörzsek alkotják, közöttük a vegyértékvonalak mentén ± 1/2 spinű elektronpár jelenti az összeköttetést. A C-atomokból úgy indul el a négy vegyérték, mint a metánban. Az atomtörzsek közötti tér üres. Az egész gyémántkristály egyetlen molekula.

Számítási feladat.

A gyémántban az atomok távolsága 1,54 Å. Mennyi a gyémánt sűrűsége? (3,6 g/cm^3)

Geometriailag figyelemre méltók azok a hatszögek, amelyeket hat 1,54 Å hosszú oldal alkot és a szögek 109°-osak. (Nem síkban fekvő idom.)

41. óra. Az átmeneti esetek példájaként felrajzoljuk a grafit kristályrácsát. 1,42 Å oldalhosszúságú szabályos hatszögekből rétegek alakulnak, amelyek homopoláros szerkezetűek. Ezek a rétegek 3,40 Å távolságban vannak egymástól és ezek között atomonként 2 elektron elektrongázként van jelen. Innen ered a grafit bizonyos mértékű fémes vezetése.

Számítási feladatok.

Mennyi a grafitban az elektrongáz sűrűsége? ($22{,}5 \cdot 10^{22}$ elektron/cm^3)

A szilícium gyémántrácsban kristályosodik, az atommagok távolsága 2,45 Å. Mennyi a szilícium sűrűsége? (2,06 g/cm^3)

A germánium gyémántrácsban kristályosodik, az atommagok távolsága 2,35 Å. Mennyi a germánium sűrűsége? (6,18 g/cm^3)

Mennyi szilícium-atom van 1 cm^3-ben ? ($5 \cdot 10^{22}$ darab, kb. annyi mint az ezüstben.)

[A gazdaságos időbeosztás céljából praktikus, ha a félvezetőkről szóló részt most tanítjuk. Róluk a kristályok szerkezetének ismerete nélkül úgysem szólhatnánk.]

42. óra. A szilícium elektromos vezetőképessége. A szilícium kristálya elektromosan szigetelő volna, mert eredetileg nincs benne szabadon mozgó töltéshordozó. Azonban a hőmozgás egy kevés elektront kiszabadít itt-ott a vegyértékkötésből. Szilícium esetében 1 elektron kiszabadításához $E = 1{,}12$ eV $= 1{,}8 \cdot 10^{-19}$ joule energia kell. Egy-egy részecske átlagos hőmozgási energiája $kT = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ T$, 30 °C-on $0{,}0418 \cdot 10^{-19}$ joule.

Az 1 cm^3-ben elszabadult elektronok száma:

$$n_e = 6 \cdot 10^{28} \cdot e^{-E/kT}.$$

Ezek az elektronok elektrongázként okoznak áramvezetést. Ugyanakkor a sérült vegyértékekbe a szomszédos vegyértékekből ugorhat be egy elektron (lyukvezetés). Természetesen a lyukak száma, n_l egyenlő az elektronok számával. Az elektronok és lyukak rekombinálódnak is, megfordítható reakcióként egyensúly áll be. Tiszta szilíciumban 30 °C-on a fajlagos ellenállás fordítva arányos a vezető részecskék $n = n_e + n_l$ sűrűségével, $\Omega cm^2/cm$-ben számolva, az elektronok és lyukak mozgékonyságát átlagolva

$$\rho = \frac{4{,}8 \cdot 10^{15}}{n}.$$

A hőmérséklettel a töltéshordozók száma rohamosan növekszik, a fajlagos ellenállás rohamosan csökken:

t	T	n_e	n_l	n	ρ
0 °C	273 K	$1{,}06 \cdot 10^8$	$1{,}06 \cdot 10^8$	$2{,}12 \cdot 10^8$	22 600 000
10 °C	283 K	$5{,}4 \cdot 10^8$	$5{,}4 \cdot 10^8$	$10{,}8 \cdot 10^8$	4 440 000
20 °C	293 K	$2{,}68 \cdot 10^9$	$2{,}68 \cdot 10^9$	$5{,}36 \cdot 10^9$	895 000
30 °C	303 K	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$2{,}4 \cdot 10^{10}$	200 000

30 °C-on a töltéshordozók sűrűsége $2 \cdot 10^6$-szor kisebb, mint az ezüstben, a fajlagos ellenállás megfelelően nagyobb.

43. óra. Tanulói kísérlet: termisztorok ellenállásának függése a hőmérséklettől. Az ellenállás logaritmusát mint a hőmérséklet függvényét ábrázolva egyenest kapunk. Az elektron kiszabadításához szükséges energiát számítva 0,3 eV adódik.

44. óra. Az elektron eltávozása a vegyértékkötésből és visszatérése oda megfordítható folyamat, ezért érvényes rá a tömeghatás törvénye, amely szerint az elektronok és lyukak koncentrációinak szorzata állandó: $n_e n_l = K$; szilícium esetében 30 °C-on $K = 1{,}44 \cdot 10^{20}$.

A vegytiszta szilíciumban egyezik n_e és n_l.

Ha 5 vegyértékű elemet adagolnak a szilíciumba, egy fölösleges elektront visznek be és a fajlagos ellenállás nagyon csökken; a vezetés elsősorban elektronvezetés (n-szilícium).

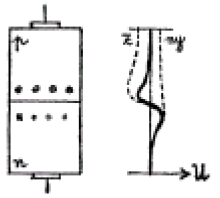
As^V/cm^3	As^V/Si	n_e	n_l	n	ρ
0	0	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$2{,}4 \cdot 10^{10}$	200 000
10^{13}	$2 \cdot 10^{-10}$	10^{13}	$1{,}44 \cdot 10^7$	10^{13}	480
10^{15}	$2 \cdot 10^{-8}$	10^{15}	$1{,}44 \cdot 10^5$	10^{15}	4,8

Ha 3 vegyértékű elemet adagolnak a szilíciumba, lyukat (elektronhiányt) visznek be és a fajlagos ellenállás nagyon csökken; a vezetés elsősorban lyukvezetés (p-szilícium).

B^{III}/cm^3	B^{III}/Si	n_e	n_l	n	ρ
0	0	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$2{,}4 \cdot 10^{10}$	200 000
10^{13}	$2 \cdot 10^{-10}$	$1{,}44 \cdot 10^7$	10^{13}	10^{13}	480
10^{15}	$2 \cdot 10^{-8}$	$1{,}44 \cdot 10^5$	10^{15}	10^{15}	4,8

Megfigyelhető annak a matematikai összefüggésnek a szerepe, ha két mennyiség szorzata állandó, akkor összegük akkor legkisebb, ha a két mennyiség egyenlő. Ez nyilvánul meg abban, hogy a vegytiszta szilícium fajlagos ellenállása a maximális.

45. óra. A félvezető dióda: részben p-, részben n-szilíciumból áll. A magára hagyott diódában elektronok diffundálnak a p-részbe, lyukak az n-részbe. Középen tiszta szilíciumból álló, 1 μm-nél vékonyabb határréteg alakul ki, amely tiszta szilíciumból áll, tehát nagy ellenállású. A diffúziót megállítja a potenciálkülönbség, mert a diffundáló részek töltöttek. A középső réteg szinte egy kondenzátor (potenciálkülönbség kb. 0,3 volt). A potenciál menetét a folytonos vonal tünteti fel.



Ha a diódára feszültséget kapcsolunk, akkor két eset lehetséges. Ha néhány tized voltos feszültségforrásunk pozitív végét a p-szilíciumra, negatív végét az n-szilíciumra kapcsoljuk, akkor kiküszöböljük a potenciálugrást (ny-görbe), a határrétegbe töltéshordozók áramlanak, a dióda kis ellenállású lesz, vezeti az áramot (nyitó irány). Ha a p-szilíciumra az elem negatív, az n-szilíciumra pozitív sarkát kapcsoljuk, akkor a leküzdendő feszültségkülönbség még nagyobb lesz, a záróréteg kiszélesedik, a dióda igen nagy ellenállású, mint a tiszta szilícium (záró irány , z-görbe).

46. óra. Tanulói kísérlet: félvezető dióda karakterisztikájának mérése nyitó és záró irányban.

47. óra. Diódák alkalmazásai. Jeldióda. Teljesítmény-dióda. Graetz-kapcsolás. Zener-dióda. Lumineszkáló dióda. Számkijelző dióda-csoport. Valamennyi bemutatással.

48. óra. A tranzisztor. Három rétegből áll: emitter–bázis–kollektor. A bázis igen vékony réteg, néhány μm. A bázis-emitterre néhány tized voltos feszültséget kapcsolunk nyitó irányban. A bázis-kollektorra néhány voltos feszültséget kapcsolunk záró irányban. Ha kisebb-nagyobb bázisáram folyik, ennek megfelelő mennyiségben diffundálnak töltéshordozók a bázis-kollektor közötti határrétegbe és megszüntetik azt. A kollektoráram felerősítve követi a bázisáram változásait. Erősítés, rezgéskeltő kapcsolások.

49. óra. Egy tranzisztornál mérőkísérletben vizsgáljuk meg a kollektoráram függését a bázisáramtól. Speciális tranzisztorok: fototranzisztor, tirisztor. Valamennyi bemutatással.

50. óra. Kapuk, integrált áramkörök. A tranzisztorok és integrált áramkörök gyártása.

5l. óra. Dolgozatírás.

[A teljes áttekintéshez hozzátartozik a tanévet lezáró csillagászati rész vázlata is.]

52. óra. A csillagos égbolt látszólagos mozgása a Földhöz viszonyítva.

53-54. óra. A Naprendszer valóságos elrendezése.

55. óra. A bolygók.

56. óra. A Hold.

57. óra. A csillagok adatai, ezek meghatározása l0 csillag példáján.

58. óra. A Russel-diagram a l0 csillag példáján.

59. óra. A Nap belseje, működése.

60-6l. óra. A csillagok fejlődése. Kialakulás. Stabilis állapot. Befejezés: fehér törpe, neutroncsillag vagy kollapszus a tömegtől függően.

62. óra. Galaktikák. Az egész világmindenség története az ősrobbanástól kezdődően.

Megjelent a Budapesti Nevelő 1975. évi 2. számában