

FYZIKA

Vytváření názorných představ o jednotkách fyzikálních veličin v primě

KAREL BARTUŠKA

Gymnázium, Praha – Nad Štolou

Každý učitel fyziky ví, že při řešení úloh žáci často dospějí k naprosto nesmyslným výsledkům a přitom si jejich nesmyslnost neuvědomují. Tak např. primán (nebo žák šesté třídy ZŠ), který má při kontrolní písemné prověrce zaměřené na převody jednotek převést 120 tun na kilogramy, použije omylem místo správného vztahu $1 \text{ t} = 1\,000 \text{ kg}$ nesprávný vztah $1 \text{ kg} = 1\,000 \text{ t}$ a dospěje tak k výsledku $120 \text{ t} = 0,12 \text{ kg}$. Přitom si vůbec neuvědomí, že podle jeho výpočtu by se hmotnost několika tramvají rovnala hmotnosti deseti dekagramů salámu. Výsledek svého výpočtu dvakrát podtrhne a s vědomím dobře vykonané práce hrdě odevzdá.

Tento jev má dvě příčiny. První spočívá v tom, že žáci často jen mechanicky (i když s velkým nasazením) něco počítají a přitom si nutnost srovnání výsledků svých výpočtů s realitou vůbec neuvědomují; proto je nesmyslný výsledek nezarazí. Druhá příčina spočívá v nedostatečně názorné představě žáků o velikostech jednotek některých fyzikálních veličin. Jestliže se např. žáků vyšších ročníků zeptáme, jak velký proud prochází řádově žárovkou kapesní svítilny, často nemají ani představu, zda se jedná o několik desetin nebo o několik desítek ampérů. Ještě obtížněji budou žáci na vyšším stupni gymnázia odhadnout, jak velká je magnetická indukce v okolí pólů permanentního magnetu, jak jsou přibližně velké relativní permitivity některých běžných látek, v jakém rozmezí se pohybují relativní indexy lomu pevných látek a kapalin apod.

Aby žáci v konkrétních případech dovedli pochopit názorný fyzikální význam číselných hodnot fyzikálních veličin, je nutné již v primě cílevědomě vytvářet představu o velikostech fyzikálních jednotek. V následujících řádcích uvedu několik příkladů, jak lze tohoto cíle dosáhnout. Přitom je třeba vycházet z převažující dětské mentality primánů a pokusit se dosáhnout tohoto cíle pomocí hry nebo soutěže. Pro vítěze soutěží je ovšem vhodné přichystat vždy malý dárek (např. jedničku z orientačního zkoušení, balíček cukrovinek ze školního automatu, Kinder vejce apod.). Mnozí učitelé budou překvapeni, jak velký zájem primání o tyto soutěže projevují. Vše, co se týká primánů, platí samozřejmě také pro žáky šestých ročníků ZŠ.

Uvedme nyní postupně, jak lze získat správnou představu o některých jednotkách fyzikálních veličin, se kterými se žáci setkávají v primě.

Jednotka délky. Vyvoláme postupně několik žáků a vyzveme je, aby se pokusili nakreslit na tabuli vodorovnou úsečku o délce 1 m. Žáci kreslí tyto úsečky pod sebou a nad každou z nich se podepíší. Učitel pak použije tyčový metr, každou úsečku proměří a na jejím pravém konci udělá barevnou křídou značku vymezující správnou délku 1 m. Žáci přitom s napětím sledují, kdo se nejvíce přiblížil k požadované délce 1 m a stal se tak vítězem soutěže. Při této soutěži zjišťujeme, že představy žáků o délce 1 m jsou někdy velmi zkreslené.

Jednotky objemu. Žáci obvykle nemají správnou představu o jednotce objemu krychlový metr. Většina žáků velikost této jednotky podceňuje. V učebnici [1] je proto uvedena úloha, v níž se požaduje, aby žáci v rohu místnosti rukama ukázali, jak velký je objem jednoho krychlového metru.

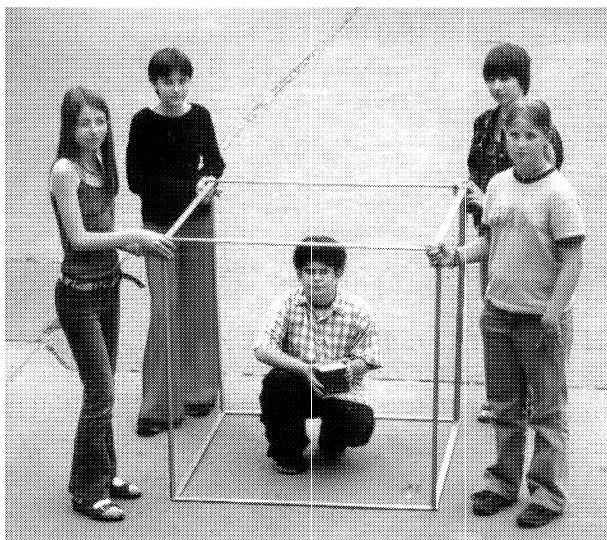
Mnohem přesnější představu o tomto objemu umožňuje však model, který žáci vytvoří přímo v hodině fyziky z tyčových metrů. Dvanáct dřevěných tyčových metrů, které pro tento účel potřebujeme, získáme např. ze starších žákovských souprav pro optiku. Pokud je nemáme, zakoupíme v truhlářství dvanáct laťek čtvercového nebo obdélníkového průřezu o délce jednoho metru, které můžeme natřít bílou barvou.

Na vytvoření modelu krychlového metru se musí podílet větší počet žáků, kterým předem rozdělíme úlohy. Jeho výslednou stabilitu zajišťují však pouze čtyři žáci, z nichž každý drží v rozích horní podstavy tři laťky (viz obr. 1). Sestavení modelu krychlového metru v průběhu vyučovací hodiny (nejlépe na chodbě) je dokonce výhodnější, než použití pevného rozkladného modelu, neboť žáci zde dospívají k představě o velikosti objemu 1 m^3 vlastní činností. Do modelu krychlového metru můžeme také umístit

model krychlového decimetru (nebo i krychlového centimetru), aby žáci mohli tyto jednotky porovnat. Po skončení demonstrace necháme model rozpadnout.

Jednotky hmotnosti. Do neprůhledné igelitové tašky vložíme několik zvolených závaží (např. o celkové hmotnosti čtyři a půl kilogramu). Aby nebyly vidět jejich obrysy, tašku vycpeme zmuchlaným novinovým papírem. Jednotliví žáci pak tašku postupně potěžkají a odhadnutou celkovou hmotnost v tašce ukrytých závaží zapíší společně se svým jménem na tabuli. Žák, který tuto hmotnost odhadne nejlépe, se stane vítězem soutěže.

Jednotky času. V učebnici [1] je uvedena úloha, ve které má žák tlesknout dvakrát po sobě tak, aby mezi prvním a druhým tlesknutím uplynula doba jedné minuty. Správnost jeho odhadu ověřuje spolužák pomocí stopky. Úlohu však můžeme uspořádat také tak, aby se odhadu doby jedné minuty zúčastnili formou soutěže všichni žáci.



Obr. 1

Učitel nejprve řekne žákům, že za chvíli oznámí začátek časového intervalu jedné minuty. Dále žáky vyzve, aby se postavili za dobu, za kterou podle jejich názoru uplynula jedna minuta. Přitom by se neměli orientovat podle ostatních žáků, ale vycházet jen ze svého vlastního odhadu doby

jedné minuty. Učitel dále upozorní, že konec časového intervalu jedné minuty neoznámí a počká, až se všichni žáci postupně postaví. Sledováním hodiněk přitom zjišťuje, který žák svým povstáním odhadl dobu jedné minuty nejlépe a ten se stává vítězem soutěže. Zároveň také oznámí, za jakou dobu se postavil první a poslední žák a v jakém rozmezí se tedy vyskytovaly jejich odhady.

Jednotky hustoty. Jednotky hustoty nelze realizovat, ale lze vytvořit představu o jejich velikosti a o rozmezí, v němž se hustoty látek vyskytují. K tomuto účelu je vhodné zadat domácí úkol, ve kterém žáci podle tabulek zjistí hustoty plexiskla, mědi, másla, hliníku, olova, vody, rtuti, benzínu, zlata, ledu a železa. K těmto látkám přidají ještě látku, která má podle tabulek největší hustotu (osmium o hustotě $22\,600\text{ kg/m}^3$). Všechny hustoty pak seřadí podle rostoucí velikosti a znázorní je různě dlouhými rovnoběžnými úsečkami nakreslenými barevnou tužkou. Přitom volíme měřítko, v němž hustota vody $1\,000\text{ kg/m}^3$ je znázorněna úsečkou o délce 1 cm. Žákům doporučíme, aby požadovaný graf kreslili na papír formátu A4 postavený na výšku. K jednotlivým úsečkám je třeba připsat druh látky a její hustotu.

Velmi zajímavý je také druh úloh, v nichž učitel přečte žákům jím vymyšlený úryvek fyzikálního textu, do kterého úmyslně vloží fyzikální chybu. Úkolem žáků je tuto chybu nalézt a popř. ji opravit.

Uvedu příklad takového textu: Učitel v jedné třídě vyzval žáky, aby řekli, co je jednotkou hustoty a na konkrétním případě vysvětlili, jaký má tato jednotka fyzikální význam. Žák, který se přihlásil, řekl: „Nejdůležitějšími jednotkami hustoty jsou g/cm^3 a kg/m^3 . Jestliže má nějaká látka hustotu 40 g/cm^3 , znamená to, že krychlička o objemu 1 cm^3 , kterou vyrobíme z této látky, bude mít hmotnost 40 g “. Kde udělal žák chybu?

Text této úlohy čteme pomalu a v případě potřeby četbu opakujeme. Chyba spočívá samozřejmě v tom, že na Zemi neexistuje látka o tak velké hustotě. Jinými slovy nelze vyrobit krychličku o objemu 1 cm^3 , která by měla hmotnost 40 g . Že taková látka neexistuje by žáci měli vědět z vyhledání a grafického znázornění hustot, které před tím dostali za domácí úkol.

Výhodou podobných úloh je, že vzbudí vždy zájem a pozornost žáků a jejich koncentraci na řešení daného problému. Tyto úlohy jsou také velmi cenné pro rozvíjení kritického myšlení. Je zajímavé, že žáci za chybné označují někdy poznatky, které jsou ve skutečnosti správné. To umožňuje učitelům hlouběji vniknout do jejich myšlení, objevit některé nedostatky v jejich

znalostech a po diskusi se žáky je odstranit. Podobné úlohy lze používat ve všech ročnících základní školy i na vyšším stupni gymnázia. Chyby vložené do fyzikálních textů se mohou dotýkat libovolné látky.

Chceme-li řešit problémy, které byly uvedeny v úvodu tohoto článku, je také nutné, aby žáci ve všech ročnících základní školy a gymnázia neřešili převážně úlohy, v nichž číselná hodnota hledané veličiny je pro žáky nezajímavým abstraktním číslem. Vhodnější jsou spíše úlohy, ve kterých je patrný jejich vztah k reálným situacím a ve kterých je žák nucen se zamyslet nad konkrétním fyzikálním nebo praktickým významem výsledku. Jako příklad uvedu úlohu určenou pro primány (autorkou této úlohy je *Mgr. Petra Kotrbová*).

Předpokládejme, že žák večer v koupelně špatně uzavřel vodovodní kohoutek, takže z vodovodu celou noc tekla slabší proud vody. Jaká je cena vody, která přes noc z vodovodního kohoutku vytekla?

Při řešení této úlohy žák nejprve pomocí odměrného válce a hodinek zjistí, jak velký je objem vody, která z nedotaženého kohoutku vyteče např. za půl minuty. Dále odhadne dobu, po kterou voda přes noc vytékala (např. od 10. hodiny večer do 7. hodiny ráno, tj. celkem 9 hodin). Žáci také zjistí, kolik stojí odběr jednoho krychlového metru vody (tento údaj jim mohou sdělit rodiče nebo učitel). Nakonec vypočtou objem přes noc vyteklé vody v krychlových metrech a tím také zjistí její celkovou cenu. Úlohu je vhodné řešit pro studenou i teplou vodu. Žáci přitom nepracují podle návodu, který jim předem sdělí učitel, ale podle vlastního postupu, který s učitelem vypracují společně. Při řešení úlohy poznávají, že převod jednotek objemu není jen nezáživným cvičením, ale i úlohou, která má také praktický význam. Cenný je i výchovný význam úlohy.

Závěrem je třeba zdůraznit, že úlohy, návody a postupy uvedené v tomto článku nemají význam jen při vytváření názorných představ o konkrétních fyzikálních jednotkách probíraných v primě. Je také důležité, že při soutěžích a řešení úloh uvedených v tomto článku si žáci začnou tuto problematiku uvědomovat a společně s učitelem ji pak cílevědomě sledovat v průběhu celé školní docházky.

Literatura

- [1] *Kolářová, R. a kol.:* Fyzika pro 6. ročník základní školy. Prometheus, Praha 1998.

Teoretické úlohy celostátního kola 46. ročníku FO

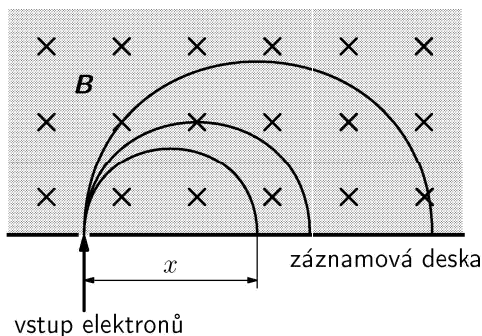
(Dokončení)

3. Měření rychlosti a energie relativistických elektronů

K měření energie elektronů můžeme využít zakřivení jejich trajektorie v magnetickém poli (obr. 4). Urychlené elektrony vstupují štěrbinou do homogenního magnetického pole analyzátoru kolmo k indukčním čarám a kolmo k záznamové desce s filmem, na kterém vznikají při dopadu jejich stopy. Při testování analyzátoru dopadají elektrony urychlené napětím $U_1 = 500 \text{ kV}$ do vzdálenosti $x_1 = 50 \text{ mm}$ od štěrbiny.

- Určete velikost B magnetické indukce v analyzátoru.
- Určete největší kinetickou energii $E_{k \max}$ elektronu měřitelnou analyzátozem, jestliže maximální vzdálenost stopy od štěrbiny je $x_{\max} = 400 \text{ mm}$.
- Určete velikost $v_{\max}$ rychlosti elektronu s kinetickou energií $E_{k \max}$.

Klidová hmotnost elektronu je $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, elementární náboj $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, rychlost světla ve vakuu $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 4

Řešení:

3. a) Na elektron působí v magnetickém poli dostředivá magnetická síla.

Platí

$$\frac{mv^2}{r} = Bev, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Z toho vyjádříme velikost hybnosti elektronu

$$p = mv = Ber = \frac{Bex}{2}.$$

Ze vztahu mezi celkovou energií elektronu, klidovou energií elektronu a jeho hybností

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2 = m_0^2 c^4 + \left(\frac{Bex}{2} \right)^2$$

plyne pro kinetickou energii elektronu vztah

$$E_k = E - E_0 = \sqrt{m_0^2 c^4 + \left(\frac{Bex}{2} \right)^2} - m_0 c^2.$$

Z toho

$$\frac{Bex}{2} = \sqrt{E_k^2 + 2m_0 c^2 E_k}. \quad (1)$$

Při testování platí $E_k = U_1 e$, $x = x_1$. Pak

$$B = \frac{2\sqrt{U_1^2 e^2 + 2m_0 c^2 U_1 e}}{ex_1} = 0,116 \text{ T}.$$

4 body

b) Ze vztahu (1) plyne

$$\left(\frac{x_{\max}}{x_1} \right)^2 = \frac{E_{k\max}^2 + 2m_0 c^2 E_{k\max}}{E_{k1}^2 + 2m_0 c^2 E_{k1}},$$

$$E_{k\max}^2 + 2m_0 c^2 E_{k\max} - \left(\frac{x_{\max}}{x_1} \right)^2 (E_{k1}^2 + 2m_0 c^2 E_{k1}) = 0.$$

Úloze vyhovuje kladný kořen této kvadratické rovnice

$$E_{k\max} = -m_0 c^2 + \sqrt{m_0^2 c^4 + \left(\frac{x_{\max}}{x_1} \right)^2 (E_{k1}^2 + 2m_0 c^2 E_{k1})} =$$

$$= -m_0 c^2 + \sqrt{m_0^2 c^4 + \left(\frac{x_{\max}}{x_1}\right)^2 (U_1^2 e^2 + 2m_0 c^2 U_1 e)}.$$

Po dosazení $E_{k \max} = 1,04 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 6,5 \text{ MeV}$.

4 body

c) Ze vztahu

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

odvodíme

$$v = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2}{m^2}} = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2}{\left(m_0 + \frac{E_k}{c^2}\right)^2}} = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{(m_0 c^2 + E_k)^2}},$$

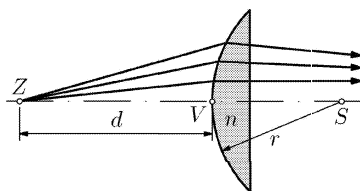
$$v_{\max} = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{(m_0 c^2 + E_{k \max})^2}} = 0,9973c = c - 8,0 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2 body

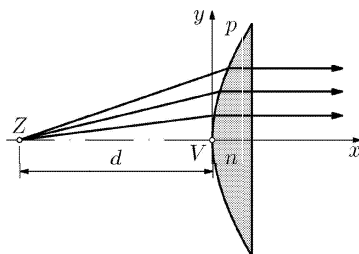
4. Kondenzor

Ploskovypuklá čočka vyrobená ze skla o indexu lomu n je ohraničena rovinou a kulovou plochou. Bodový zdroj světla Z umístíme na její optickou osu do vzdálenosti d od jejího vrcholu (obr. 5).

- a) Jaký poloměr musí mít kulová plocha čočky, aby paprsky vycházející ze zdroje a dopadající na čočku v blízkosti optické osy se lámaly rovnoběžně s optickou osou?



Obr. 5

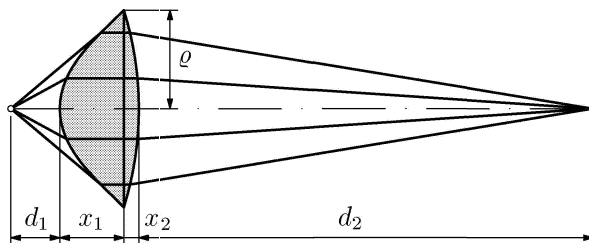


Obr. 6

- b) V důsledku kulové vady se nebudou paprsky dopadající na čočku ve větší vzdálenosti od optické osy lámat rovnoběžně s optickou osou, ale o něco více. Abychom tuto závadu odstranili, musíme kulovou plochu čočky nahradit rotační plochou, kterou vytvoříme rotací křivky p (meridiánu plochy) okolo optické osy (obr. 6). Nalezněte rovnici křivky p a vyšetřete její geometrické vlastnosti. Souřadnicovou soustavu volte podle obr. 6.

Návod: Uvědomte si, že působením čočky se původně kulová vlnoplocha světla změní na rovinnou vlnoplochu kolmou k optické ose a mezi jednotlivými rovnoběžnými paprsky není dráhový rozdíl.

- c) Jednočočkový kondenzor pro promítací přístroj podle obr. 7 je vyroben ze skla o indexu lomu $n = 1,52$. Vláknó žárovky je ve vzdálenosti $d_1 = 12$ mm od kondenzoru, paprsky vystupující z kondenzoru se sbíhají ve vzdálenosti $d_2 = 120$ mm, kde se nachází střed objektivu. Uvnitř kondenzoru jdou paprsky světla rovnoběžně s optickou osou. Objímka kondenzoru má poloměr $\varrho = 25$ mm. Určete rozměry x_1 a x_2 .



Obr. 7

Řešení:

4. a) Vydeme ze zákona lomu a z obr. R3. Pro paprsek, který se láme v malé vzdálenosti m/r od optické osy můžeme psát

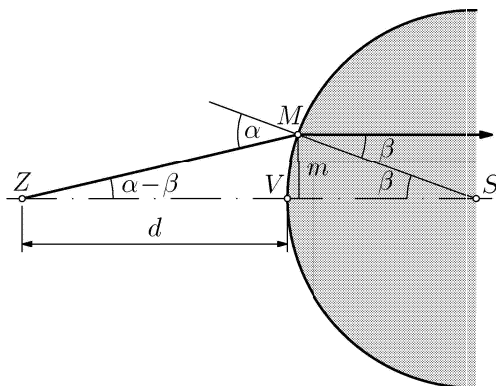
$$\alpha - \beta \approx \frac{m}{d}, \quad \beta \approx \frac{m}{r},$$

$$\alpha = \frac{m}{d} + \frac{m}{r} \approx n\beta = n \frac{m}{r},$$

Z toho

$$\frac{1}{d} = (n-1)\frac{1}{r}, \quad r = (n-1)d.$$

3 body



Obr. R3

- b) Vyjdeme z obr. R4. Světlo, které se láme v bodě $M = [x, y]$ má v tomto místě stejnou fázi jako světlo, které současně dorazilo do bodu $M_1 = [x, 0]$ na optické ose. Z rovnosti optických drah ZM a ZVM_1 plyne

$$\sqrt{(x+d)^2 + y^2} = d + nx.$$

Úpravami dostaneme

$$(n^2 - 1)x^2 + 2d(n-1)x - y^2 = 0, \quad (1)$$

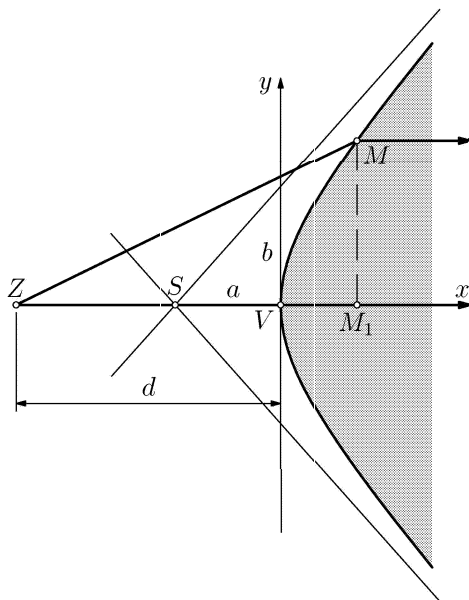
$$x^2 + \frac{2d}{n+1}x + \frac{d^2}{(n+1)^2} - \frac{y^2}{n^2 - 1} = \frac{d^2}{(n+1)^2},$$

$$\frac{\left(x + \frac{d}{n+1}\right)^2}{\left(\frac{d}{n+1}\right)^2} - \frac{y^2}{\frac{d^2(n-1)}{n+1}} = 1. \quad (2)$$

Jedná se o rovnici hyperboly se středem $S = \left[-\frac{d}{n+1}, 0\right]$, délkou hlavní poloosy $a = \frac{d}{n+1}$ a délkou vedlejší poloosy $b = d\sqrt{\frac{n-1}{n+1}}$.

Poloměr křivosti v hlavním vrcholu $r = \frac{b^2}{a} = d(n-1)$ je stejný jako poloměr kulové plochy v úloze a).

4 body



Obr. R4

c) Dosazením $y = \varrho$ do (1) dostaneme kvadratickou rovnici

$$(n^2 - 1)x^2 + 2d(n-1)x - \varrho^2 = 0,$$

ze které můžeme vypočítat výšky vrchlíků ohraničujících kondenzor. Vyhovuje kořen

$$x = \frac{-d(n-1) + \sqrt{d^2(n-1)^2 + (n^2-1)\varrho^2}}{n^2-1}.$$

Pro $d_1 = 12$ mm vychází $x_1 = 17,6$ mm, pro $d_2 = 120$ mm vychází $x_2 = 4,8$ mm.

3 body

Bublinové komory vo vyučovaní fyziky

VLADIMÍR GREJTÁK

Prírodovedecká fakulta UPJŠ, Košice, SLOVENSKO

1. Úvod

Ľudí odpradáva zaujímal, čo tvorí hmotu, svet v ktorom žijú. Odpoveď na túto otázku sa snaží spresňovať fyzika vysokých energií. Jej hlavným predmetom sú nielen základné stavebné elementy, ale aj interakcie medzi nimi. Meno tento častí fyziky súvisí s jej najrozšírenejším experimentálnym postupom výskumu. Tým je „ostreľovanie“ terča vysoko energetickým zväzkom častíc z urýchľovača a následné vyhodnotenie výsledkov udalostí zaznamenaných v detektore.

Fyzikálnej komunite v tejto oblasti 40 rokov dobre slúžili tzv. bublinové komory. Dnes sú nahradené komplexnejšími detektormi poskytujúcimi oveľa presnejšie výsledky. Tento príspevok ponúka možnosť, ako využiť poznatky vedcov pohybujúcich sa okolo bublinových komôr vo vyučovaní fyziky elementárnych častíc.

2. Krátko z histórie

Prvú bublinovú komoru skonštruoval v roku 1952 Američan *Donald Glaser*. V roku 1960 obdržal Nobelovu cenu za jej vývoj. Rok predtým, získali Nobelovu cenu páni *Emilio Segre* a *Owen Chamberlain* za dôkaz existencie antiprotónu. Dôkaz poskytla bublinová komora. S týmto detektorom súvisia aj Nobelove ceny za fyziku z rokov 1968 (*Luis Walter Alvarez*) a 1969 (*Murray Gell-Mann*). Pomocou bublinových komôr bolo identifikovaných niekoľko z historického hľadiska veľmi významných častíc, napr. roku 1964 – omega mínus, ktorá zohrala dôležitú úlohu pri vytváraní štandardného modelu častíc.

3. Konštrukcia

Základom bublinovej komory je nádrž naplnená priehľadnou kvapalinou. Celá komora je uložená vo vonkajšom magnetickom poli so známym gradientom. Kvapalina v nádrži je pri tlaku cca $5 \cdot 10^5$ Pa zohriata až takmer na bod varu. Tesne pred priletom zväzku častíc do komory sa tlak v komore zníži na cca $2 \cdot 10^5$ Pa. Tým sa médium stáva veľmi citlivým na

najmenšie energetické vzruchy. Ak do prehriatej kvapaliny vletí elektricky nabitá častica, interaguje s jej molekulami a ionizuje prostredie, ktorým prechádza. Ionizovaná kvapalina sa dostáva do varu a častica tak za sebou „zanecháva“ bublinovú stopu. Zviditeľnené trajektórie elektricky nabitých častíc sa nakoniec odfotia z troch strán.

4. Vyhodnocovanie – fyzikálne princípy

Pri vyhodnocovaní snímkov, tj. pri identifikácii častíc a udalostí vedci využívajú dôvtipne základné fyzikálne zákony:

– zákon zachovania elektrického náboja

Celkový súhrnný elektrický náboj častíc pred udalosťou je ten istý ako po udalosti. Napr. ak sa pri náraze jednej častice do druhej uvoľní dostatočné množstvo energie na to, aby vznikli nové častice, potom celkový náboj všetkých častíc vystupujúcich z udalosti je zhodný s celkovým nábojom dvoch „vstupných“ častíc.

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{c} \text{Celkový elektrický} \\ \text{náboj pred} \\ \text{udalosťou} \end{array} \right) &= \left(\begin{array}{c} \text{Elektrický} \\ \text{náboj častice} \\ \text{A} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Elektrický} \\ \text{náboj častice} \\ \text{B} \end{array} \right) = \\ &= \left(\begin{array}{c} \text{Elektrický} \\ \text{náboj častice} \\ \text{A'} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Elektrický} \\ \text{náboj častice} \\ \text{B'} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Celkový elektrický} \\ \text{náboj po} \\ \text{udalosti} \end{array} \right) \end{aligned}$$

– elektrický náboj v magnetickom poli

Magnetické pole s indukciou $\mathbf{B}$ pôsobí na časticu s elektrickým nábojom q , ktorá sa v ňom pohybuje rýchlosťou $\mathbf{v}$, Lorentzovou silou $\mathbf{F}_L = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$. Lorentzova sila je maximálna v prípade, keď častica vlieta do poľa kolmo na smer magnetických siločiar a minimálna (nulová) v prípade, keď častica vletí do poľa v smere magnetických siločiar. Definičný vzťah tiež vyjadruje fakt, že táto sila pôsobí v smere kolmom na smer okamžitej rýchlosti, tj. nespôsobí zmenu veľkosti rýchlosti, ale zmenu smeru vektora rýchlosti (zakrivenie trajektórie).

V klasickej fyzike sa pri opise pohybov po zakrivenej trajektórii zavádza dostredivá sila. V prípade elektricky nabitých častíc pohybujúcich sa v magnetickom poli kolmo na smer jeho siločiar sú Lorentzova a dostredivá sila to isté. Možno teda písať $\mathbf{F}_L = \mathbf{F}_D$ a pre ich veľkosti potom platí rovnosť:

$$qvB = m \frac{v^2}{r},$$

kde m je hmotnosť častice a r je polomer zakrivenia trajektórie, ktorú opisuje častica. Jednoduchou úpravou predchádzajúceho vzťahu dostávame vzťah

$$r = \frac{qB}{mv},$$

z ktorého vyplýva, že polomer zakrivenia trajektórie elektricky nabitkej častice je nepriamo úmerný veľkosti jej hybnosti. Krátka úvaha riešila nerelativistický prípad, no v prípade relativistického prístupu získame obdobný vzťah*)

$$r = \frac{qB}{m_0\gamma v},$$

kde

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

a c je rýchlosť svetla vo vákuu.

Magnetické pole je tak jednoduchým filtrom pre rozlíšenie polarít a hybnosti častíc.

– *urýchľovaný elektrický náboj vyžaruje elektromagnetickú energiu*

Ak je trajektória častice zakrivovaná silovým pôsobením vonkajšieho magnetického poľa, tak zmeny smeru (hybnosti) kompenzuje vyžarovaním fotónov. Výkon elektromagnetického žiarenia častice pohybujúcej sa so zrýchlením a závisí priamo úmerne od druhej mocniny jej zrýchlenia a^2 . Túto skutočnosť kvantitatívne vyjadruje tzv. Lamorov vzťah

$$P = \frac{2}{3} \frac{a^2 e^2}{c^3},$$

kde $e^2 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0}$, ϵ_0 je permitivita vákuu.

V prípade častice s vysokou energiou (v porovnaní s pokojovou energiou), ktorá je zabrzdená na veľmi krátkej vzdialenosti, hovoríme o tzv. brzdnom žiarení. Brzdne žiarenie má charakteristický spojitý priebeh s ostrým dolným ohraničením vlnovej dĺžky (súvisí so začiatočnou energiou častice). Zvyčajne je pozorované pri ľahkých časticiach, ako sú elektróny.

*) Upozornenie: Jednoduché nahradenie klasickej hmotnosti m relativistickou hmotnosťou $m = m_0\gamma$ nie je korektný postup. V prípade $v \ll c$ „prejde“ relativistický vzťah do nerelativistického – klasickeho vzťahu.

Vyžiarenie energie znamená pokles kinetickej energie častice, tj. častica sa spomalí a z predchádzajúceho bodu vyplýva, že sa zmení (zmenší) polomer zakrivenia jej trajektórie.

– *zákon zachovania hybnosti*

Zákon zachovania hybnosti pomáha pri klasifikácii udalostí. Tie sú často na snímku reprezentované dvoma spôsobmi: zlom alebo véčko. Pri zlome (obr. 4f)) sa náhle zmení zakrivenie trajektórie častice. Väčšie zakrivenie signalizuje menšiu hybnosť (rozpad častice na sekundárnu časticu s menšou hybnosťou a nejakú elektricky neutrálnu časticu, ktorá „nesie“ zvyšok hybnosti pôvodnej častice). Véčko získalo svoje meno na základe podobnosti s tvarom písmena V a je dôsledkom rozpadu elektricky neutrálnej častice na dve častice s opačnou polaritou. Ich trajektórie vytvárajú už spomenuté písmeno V (obr. 4a) b) d)). Zákon zachovania hybnosti umožňuje zistiť, odkiaľ prichádzala neutrálna častica (predĺženie spojnice priesečníkov), ktorá sa „rozpadla“. Následne možno povedať, či je neutrálna častica produktom relevantného rozpadu, alebo so „zaujímavými“ udalosťami nesúvisí.

– *zákon zachovania energie*

Každá udalosť „podlieha“ zákonu zachovania energie. Pomocou bodov vytvárajúcich trajektórie častíc sa rekonštruje každá z priestorových zložiek hybnosti p_x , p_y a p_z , a tým aj celková hybnosť častice $p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$. Zo vzťahu

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4,$$

zákona zachovania energie a zákona zachovania hybnosti je potom možné napríklad zistiť, či akási častica v interpretácii „nechýba“.

Existujú ešte ďalšie vypočítateľné charakteristiky častíc, ktoré umožňujú rýchlo, ľahko a s veľkou pravdepodobnosťou identifikovať častice. Niektoré z nich možno nájsť na web stránkach uvedených v závere.

5. Vyhodnocovanie – praktický príklad

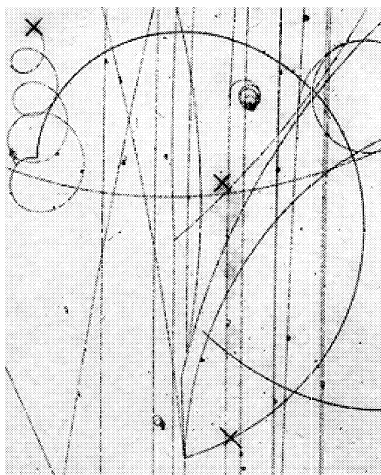
Nasledujúci postup ilustruje základné kroky pri vyhodnocovaní snímkov z bublinových komôr.

1. *Médium komory a dopadajúci zväzok častíc*

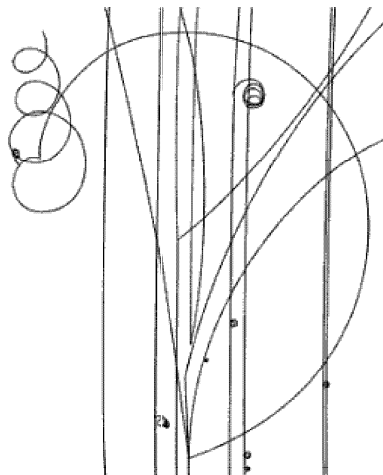
Obrázok, ktorý použijeme (obr. 1), bol urobený v roku 1956 v CERNe. Do komory naplnenej tekutým vodíkom prilieta zväzok častíc K^- s energiou 13 GeV.

Pri prvom pohľade na snímok je potrebné identifikovať dopadajúci zväzok častíc. Ten reprezentujú paralelné čiary prechádzajúce celým snímkom.

Čiary, ktoré prechádzajú bez akejkolvek zmeny, predstavujú trajektórie častíc, ktoré prešli médiom bez interakcie s ním. Zaujímavé udalosti sú práve čiary, ktoré súvisia s pôvodným zväzkom – rozpady (*pron*), zlomy (*kink*) a véčka (*vee*). Všetko ostatné je tzv. pozadie, resp. šum.



Obr. 1



Obr. 2

2. Kladný vs. záporný

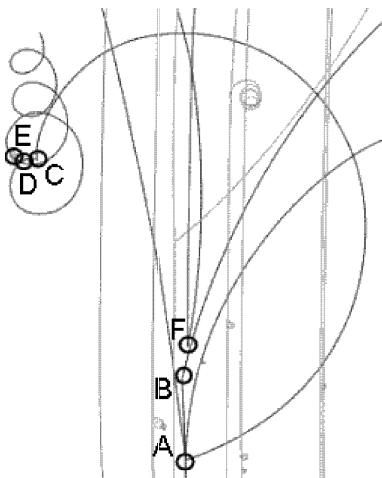
Po odstránení šumu z pôvodného obrázka získame obr. 2. Teraz možno rozdeliť častice podľa ich polarity. Záporne nabité zanechávajú za sebou trajektórie zakrivené rovnakým smerom ako sú trajektórie pôvodných K^- častíc. Ak je ťažké určiť zakrivenie pôvodného zväzku, použijú sa ako referenčné trajektórie trajektórie e^- . Tých je zvyčajne na každom snímku dosť – malé špirály (brzdné žiarenie).

3. Klasifikácia udalostí

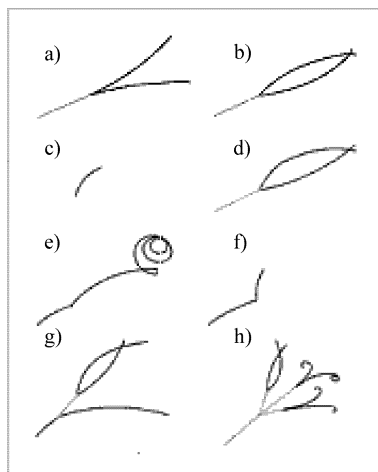
Na obr. 3 sú označené zaujímavé udalosti (A, B, C, D, E, F). Výsledkom udalosti A je viditeľná štvorica trajektórií. Dve z nich sú jednoznačne zakrivené doľava, jedna do prava a zakrivenie štvrtej je ťažké rozoznať. Vieme však, že udalosť A nastala nárazom K^- do p^+ (komora je naplnená vodíkom), t.j. celkový elektrický náboj je rovný nule. Z toho vyplýva, že posledná častica má trajektóriu zakrivenú jemne doprava. Táto záporne nabitá častica sa pri udalosti B rozpadne na inú záporne nabitú časticu s menšou hybnosťou a nejakú neutrálnu časticu. Obdobná situácia nastala

aj pri udalostiach C a D. Odpoveď na otázku odkiaľ pochádza neutrálna častica, ktorá sa rozpadne v udalosti F, nám dá zákon zachovania hybnosti.

Ak predĺžime spojnicu priesečníkov oboch trajektórií tvoriacich veľko, zistíme že smeruje do miesta udalosti A a nie zlomu B. Udalosť E je zrážka poslednej kladnej častice s elektrónom vodíkového atómu (slangovo povedané nakopnutý e^-). Udalosť A je zrážka; B, C, D, E a F sú rozpady.



Obr. 3



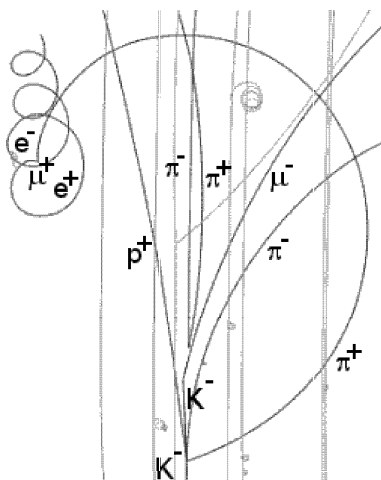
Obr. 4

4. Charakteristické trajektórie

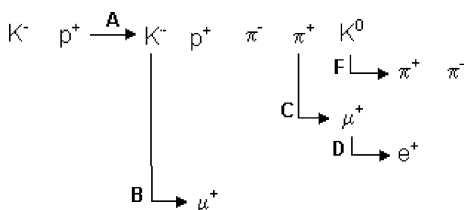
Z množstva vyhodnotených snímok vedci vytvorili zoznam, resp. „katalóg“ charakteristických trajektórií spolu s pravdepodobnosťami ich interpretácie. Časť „katalógu“ je obr. 4. Medzi charakteristickými trajektóriami známych častíc je možné nájsť časti, resp. úseky, ktoré sa podobajú na tie v ilustračnom snímku, napr. udalosť F z obr. 3 odpovedá prípadu d) z obr. 4, najdlhšia trajektória na snímku z obr. 3 začínajúca nárazom A odpovedá v „katalógu“ prípadu e) atď.

5. Spracovanie údajov

Cieľom spracovania údajov zo snímku je získať hodnoty energií a hybností každej častice „zainteresovanej“ do zaujímavých udalostí. Postup je naznačený v časti o zákone zachovanie energie. Výsledkom naznačeného postupu je nielen predpokladaný priebeh, ale aj pravdepodobnosť, s ktorou mohol nastať (obr. 5).



Obr. 5



6. Záver

Tento príspevok som vypracoval na základe materiálov, ktoré boli vytvorené komunitou stredoškolských učiteľov fyziky v priebehu programu *High School Teachers*, ktorý každoročne organizuje CERN. Pomocou naznačeného postupu môžu aj laici „zakúsiť“ čaro „dekódovania“ inak neviditeľného sveta mikročastíc. Má potenciál byť kvalitným sppestrením hodín fyziky. Postup odporúčam spojiť s demonštračným experimentom hmlovej komory (detektor založený na rovnakom princípe). Viac detailnejších informácií je možné nájsť na stránkach [1].

Literatura

- [1] High School Teachers – <http://teachers.cern.ch>
- [2] CERN – <http://www.cern.ch>