

## Large Hadron Collider (10 bodov)

Najprv si pozorne prečítajte pokyny v osobitnej zložke.

V tejto úlohe ide o fyziku Veľkého hadrónového urýchľovača LHC (Large Hadron Collider) v CERN. CERN je najväčšie časticové fyzikálne laboratórium. Jeho poslaním je prenikať do základných zákonov prírody. Dva zväzky častíc urýchlených na vysoké energie a udržiavané v dvoch protismerných kružnicových slučkách urýchľovača magnetickým poľom sa privedú k vzájomnej zrážke. Protóny nie sú rozdelené po obvode slučiek urýchľovača rovnomerne ale pohybujú sa v akýchsi skupinách - zhlukoch. Pomocou veľkých detektorov sa pozorujú častice vznikajúce pri zrážke. Niektoré parametre LHC sú v tabuľke 1.

LHC kružnica	
Obvod kružnice	26659 m
Počet zhlukov v jednom protónovom zväzku	2808
Počet protónov v jednom zhluku	$1.15 \times 10^{11}$
Protónové zväzky	
Energia protónov	7.00 TeV
Energia v sústave hmotného stredu	14.0 TeV

Tabuľka 1: Typické numerické hodnoty vybraných parametrov LHC

Časticová fyzika používa osobitné jednotky pre energiu, hybnosť a hmotnosť: Energia sa meria v elektrón-voltoch eV. Podľa definície ide o energiu častice s elementárnym nábojom,  $e$ , ktorú získa pri prechode cez potenciálny rozdiel 1 volt ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ ).

Hybnosť sa meria v jednotkách  $\text{eV}/c$  a hmotnosť v jednotkách  $\text{eV}/c^2$ ,  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu. Keďže 1 eV je veľmi malá jednotka energie, v časticovej fyzike sa častejšie používajú jednotky MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) alebo TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

Časť A sa venuje urýchľovaniu protónov a elektrónov, časť B identifikácii častíc vznikajúcich pri zrážkach v CERN.

### Časť A. LHC urýchľovač (6 bodov)

#### Zrýchlenie:

Predpokladajte, že protóny boli urýchlené napätím  $V$  tak, že ich rýchlosť je veľmi blízka rýchlosti svetla a neuvažujte stratu energie vyžarovaním alebo zrážkami s inými časticami.

<p><b>A.1</b> Odvodte presný vzťah pre výslednú rýchlosť <math>v</math> protónov ako funkciu urýchľovacieho napätia <math>V</math> a s použitím fyzikálnych konštánt.</p>	0.7pt
---	-------

Návrh budúceho experimentu v CERN počíta s použitím protónov z LHC a ich zrážaním s elektrónmi, ktoré majú energiu 60,0 GeV.

- A.2** Pre častice s veľkou energiou a malou hmotnosťou je relatívna odchýlka  $\Delta = (c - v)/c$  výslednej rýchlosti  $v$  od rýchlosti svetla veľmi malá. Odvodte aproximáciu prvého rádu pre  $\Delta$  pomocou urýchľovacieho napätia  $V$  a fyzikálnych konštánt a vypočítajte hodnotu  $\Delta$  pre elektróny s energiou 60.0 GeV. 0.8pt

Teraz sa vrátíme k protónom v LHC. Predpokladajte, že zväzok protónov má kruhový prierez.

- A.3** Odvodte vzťah pre magnetickú indukciu  $B$  magnetického poľa potrebného na udržanie protónového zväzku na kružnicovej trajektórii. Vzťah môže obsahovať iba kinetickú energiu  $E$  protónov, obvod  $L$  kružnice, fundamentálne konštanty a číselné hodnoty. Môžete použiť vhodné aproximácie, ak ich vplyv na výsledok je menší ako presnosť poslednej platnej číslice výsledku. Určte magnetickú indukciu  $B$  pre protóny s energiou  $E = 7,00$  TeV, ak neuvažujete vzájomné pôsobenie medzi protónmi. 1.0pt

### Vyžarovaný výkon:

Pri zrýchlení častica vyžaruje energiu vo forme elektromagnetického vlnenia. Vzťah pre vyžarovaný výkon  $P_{\text{rad}}$  častice na kružnici s konštantnou uhlovou rýchlosťou obsahuje: zrýchlenie  $a$  a náboj  $q$  častice, rýchlosť svetla  $c$  a permitivitu vákuu  $\varepsilon_0$ .

- A.4** S použitím rozmerovej analýzy odvodte vzťah pre vyžarovaný výkon  $P_{\text{rad}}$ . 1.0pt

Skutočný vzťah pre vyžarovaný výkon obsahuje navyše faktor  $1/(6\pi)$ ; ďalej relativistické odvedenie pridá ďalší multiplikačný faktor  $\gamma^4$ , kde  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

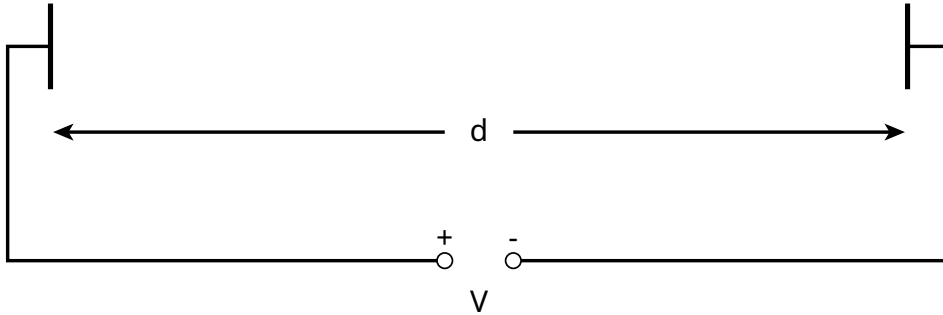
- A.5** Určte celkový vyžarovaný výkon  $P_{\text{tot}}$  dvojice slučiek urýchľovača LHC pre energiu protónov  $E = 7,00$  TeV (použite údaje z Tab.1). Môžete použiť vhodné aproximácie. 1.0pt

### Lineárne urýchlenie:

V CERN sú protóny urýchlené zo stavu pokoja lineárnym urýchľovačom s dĺžkou  $d = 30,0$  m a potenciálnym rozdielom  $V = 500$  MV. Predpokladajte, že elektrické pole v urýchľovači je homogénne. Lineárny urýchľovač pozostáva z dvoch platní, ako vidno na obr. 1.

**A.6** Určte čas  $T$ , za ktorý protón prejde cez toto pole.

1.5pt



Obr. 1: Nákres modulu akcelarátorá

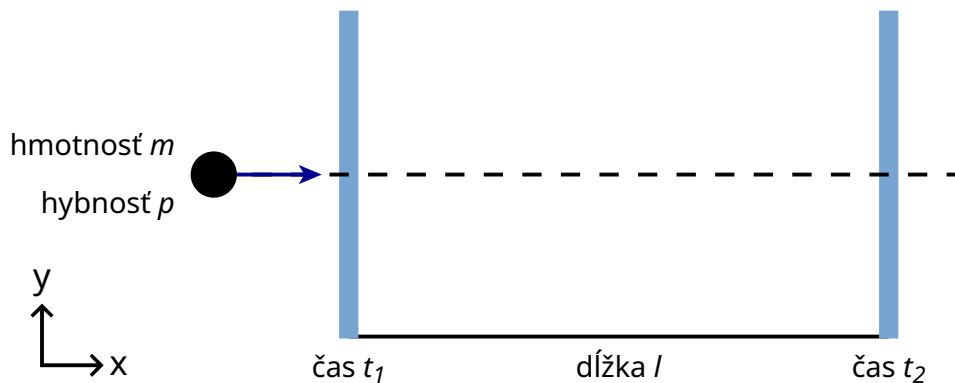
## Časť B. Identifikácia častíc (4 body)

### Čas letu:

Na vysvetlenie procesu interakcie je dôležité identifikovať častice, ktoré pri zrážkach vznikajú. Jednoduchá metóda spočíva v meraní času  $t$ , ktorý častica so známou hybnosťou potrebuje na prekonanie vzdialenosti  $l$  v tzv. ToF (Time-of-Flight) detektore. Typické častice, ktoré sa v detektore identifikujú spolu s ich hmotnosťami sú v tabuľke 2.

Častica	Hmotnosť [MeV/c <sup>2</sup> ]
Deuteron	1876
Proton	938
Kaon s nábojom	494
Pion s nábojom	140
Elektrón	0.511

Tabuľka 2: Častice a ich hmotnosti

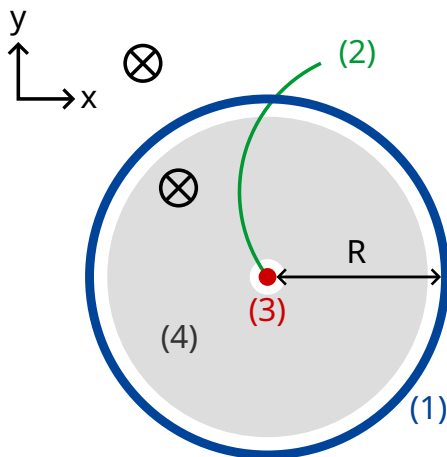


Obr. 2: Schéma ToF detektora

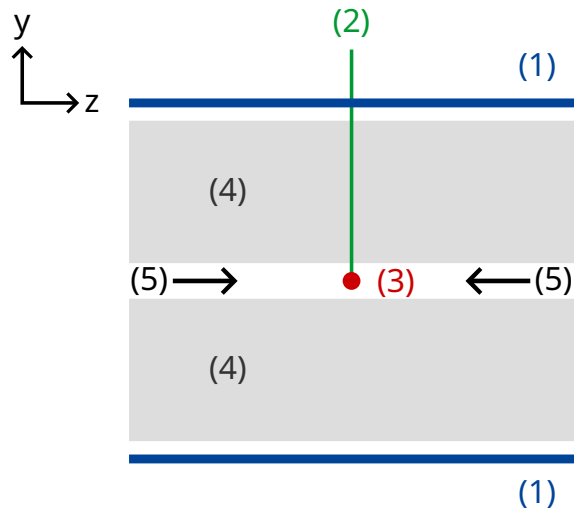
- B.1** Vyjadrite hmotnosť  $m$  častice pomocou hybnosti  $p$ , dĺžky  $l$  letu a času  $t$  letu za predpokladu, že častice majú elementárny náboj  $e$  a pohybujú sa cez ToF detektor priamočiario rýchlosťou blízkou  $c$  kolmo na dve detekčné roviny (pozrite obr. 2). 0.8pt

- B.2** Vypočítajte minimálnu dĺžku  $l$  ToF detektora, ktorá umožňuje bezpečne rozlíšiť kaon s nábojom od pionu s nábojom s rovnakou hybnosťou  $1,00 \text{ GeV}/c$ . Na dobré rozlíšenie sa požaduje rozdiel času preletu (ToF) väčší ako **trojnásobok** rozlišovacieho času detektora. Typický rozlišovací čas detektora je  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

V ďalšom sú častice vznikajúce v LHC identifikované v dvojstupňovom detektore, ktorý meria okrem času preletu (ToF) aj polomer  $r$  trajektórie. Obr. 3 ukazuje zostavu v rovine priečnej a pozdĺžnej vzhľadom na protónový lúč. Detektor je v trubici obklopujúcej interakčný priestor. Vzniknutá častica s nábojom prechádza cez magnetické pole, ktorého smer je rovnobežný so smerom protónového lúča. Polomer  $r$  oblúka trajektórie častice umožňuje určiť priečnu zložku hybnosti  $p_T$  častice. Keďže miesto a okamih vzniku častice sú známe, detektor ToF potrebuje na zmeranie času letu po oblúku kružnice iba jednu vonkajšiu trubicu. V tejto úlohe predpokladajte, že všetky častice vznikajúce pri zrážke sa pohybujú kolmo na protónový lúč, tzn. že vznikajúce častice majú nulovú zložku hybnosti v smere protónového zväzku.



priečny priemet



pozdĺžny priemet  
pohľad kolmo na lúč

- (1) - ToF trubica
- (2) - trajektória
- (3) - bod zrážky
- (4) - trubica sledovania trajektórie
- (5) - protónový zväzok
- ⊗ - magnetické pole

Obr. 3: Experimentálna zostava na identifikáciu častíc s detektorom trajektórie a ToF detektorom. Obidva detektory sú v trubici obklopujúcej bod zrážky uprostred. Vľavo: priečny priemet do roviny kolmej na protónový lúč. Vpravo: pozdĺžny priemet do roviny rovnobežnej s protónovým lúčom. Častica sa pohybuje kolmo na lúč.

**B.3** Vyjadrite hmotnosť  $m$  častice pomocou magnetickej indukcie  $B$ , polomeru  $R$  trubice ToF detektora, nameraných hodnôt veličín: polomer  $r$  a čas letu  $t$  a fyzikálnych konštánt. 1.7pt

Detegovali sme štyri častice a potrebujeme ich identifikovať. Magnetická indukcia  $B = 0,500$  T,  $R = 3,70$  m a namerané hodnoty sú ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ )

Častica	Polomer trajektórie $r$ [m]	Čas letu $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

**B.4** Identifikujte častice na základe výpočtu ich hmotnosti. 0.8pt