

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

A. A. Kolomenskij; N. B. Rubin
Urychlovače nabitých částic

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 1, 25--32

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137265>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

doba vůči době »bloudění« částice v prostoru Galaxie. Ukazuje se, že takové expanse supernov jsou dostatečně mohutnými zdroji energie, přenášené kosmickým zářením.

Z pozorování víme, že kromě supernov expanduje v Galaxii během jednoho roku průměrně 100 nových hvězd. Ačkoli množství energie, uvolněné při expanzích nov, je značně menší, je plně vyváženo tím, že expanse jsou častější, takže není vyloučena možnost, že i novy mají pro tvoření kosmického záření podstatný význam. Kromě toho je možno vysvětlit maximální známé energie urychlováním částic podle mechanismu Fermiho v rozšiřujících se obálkách supernov a nov.

Závěrem můžeme říci, že problém původu kosmického záření nelze v dnešní době považovat za uzavřený. Použití radioastronomických údajů znamená v řešení tohoto úkolu novou, plodnou etapu. Jsme však přesvědčeni, že další zkoumání této otázky s použitím radioastronomických a astrofyzických údajů umožní již v brzké době zpřesnit mechanismus postupného urychlování primárních částic kosmického záření a tím řešit jednu z nejzajímavějších otázek současné vědy.

Volně zpracoval Jan Kafr

Literatura:

- (1) Alfvén H., Phys. Rev 75, 1732, 1949; 77, 375, 1950;
- (1) Alfvén H., Phys. Rev., 75, 1732, 1949; 77, 375, 1950;
- (2) Kiepenheuer K., Phys. Rev., 78, 809, 1950;
- (3) Těrleckij Ja. P., Vestnik M. univ., 1, 75, 1948; 2, 75, 1949;
- (4) Kolpakov P. E., Těrleckij Ja. P., DAN SSSR 76, 185, 1951;
- (5) Babcock, Astrofyzický sborník II, 1948, str. 208;
- (6) Fermi E., Phys. Rev., 75, 1169, 1949;
- (7) Lopunov, Těrleckij, Izv. AN SSSR, ser. fys., 17, 119, 1953;
- (8) Šklovskij I. S., DAN SSSR 91, 475, 1953;
- (9) Ginzburg V. L., DAN SSSR 92, 1133, 1953;
- (10) Ginzburg V. L., UFN 51, 343, 1953.

A. A. KOLOMENSKIJ, N. B. RUBIN

URYCHLOVAČE NABITÝCH ČÁSTIC УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

(Priroda, 1955, č. 11, str. 3—12.)

Atomistika dosáhla v posledních desetiletích neobyčejných úspěchů nejen v poznání stavby látky, ale zejména také ve využití nesmírných energetických zásob, uložených v atomových jádrech.

Jednou z nejmocnějších pomůcek v nukleárních bádáních jsou tak zvané urychlovače nabitých částic, nebo prostěji urychlovače: cyklotrony, betatrony, synchrotrony, lineární urychlovače atd.

Než pohovoříme o otázce, jak se nabitě částice urychlují, přesněji řečeno, jak se zvětšuje jejich energie, uvedeme několik faktů z nukleární fyziky.

Základem dnešní nukleární fyziky byl objev radioaktivity, to jest schopnosti atomových jader některých prvků vydávat záření. Toto záření může sestávat z atomů helia — částic alfa, a z elektronů — částic beta (často se používá také

termínů »záření alfa« a »záření beta«), které velmi rychle vyletují z atomových jader. Kromě toho mohou z atomového jádra vyletovat tak zvané paprsky gamma, které jsou též povahy jako roentgenové paprsky, avšak mnohem pronikavější (tvrdší).

Novou fází v rozvoji atomové fyziky zahájil anglický fyzik E. Rutherford, který v roce 1919 uskutečnil první přeměnu prvků (transmutaci prvků). Rutherfordovi se podařilo přeměnit ostřelováním částicemi alfa dusíkové jádro v jádro kyslíkové, při čemž vyletovala vodíková jádra — protony. Takovéto vzájemné přeměny atomových jader dostaly později název nukleární reakce.

Rozvoj moderní nukleární fyziky je úzce spjat se studiem interakcí (vzájemných působení) různých elementárních částic s velkými energiemi vzájemně a s atomovými jádry. A právě k tomuto studiu je třeba především urychlovačů, zvláštěních to zařízení, jimiž se urychlují nabitě částice, elektrony, protony, deuterony, částice alfa a j.

Vzájemným působením urychlených nabitých částic s látkou lze využít i neutrálních (nenabitých) částic, neutronů a záření podobného záření gamma. Vzájemným působením urychlených částic a velmi tvrdých paprsků gamma s látkou mohou kromě toho vznikat tak zvané mesony, částice s velmi krátkou životní dobou, jimž theorie dává významné místo ve výkladu povahy nukleárních sil.

Soudobé urychlovače jsou velmi velká a složitá zařízení, jež tvoří sama o sobě předmět studia fyziků a inženýrů. První konstrukce urychlovačů byly velmi prosté. Částice, které se měly urychlit, byly vyvedeny do vakuové trubice, kde byly urychlovány účinkem napětí generátoru. Je-li urychlovač napětí 1 V a měla-li částice náboj rovný co do absolutní hodnoty náboji elektronu, nabude energie 1 elektronvoltu (zkratka eV). Částice vyzařované radioaktivními látkami mají energie zpravidla několik MeV (megaelektronvolt = milion eV). Princip takového urychlování je tedy velmi jednoduchý, získat však napětí několika milionů voltů je technicky velmi složité. Jedním z nejpoužívanějších zařízení pro tak vysoká napětí je tak zvaný Van de Graafův elektrostatický generátor, jímž lze dodat částicím energie několika milionů eV.

Jednorázové urychlení částic se však ukázalo prakticky nevýhodným, zejména šlo-li o urychlení na energie desítek nebo set MeV. Dnes má tato metoda urychlování částic význam jen pomocný. Používá se jí jen pro předběžné urychlování částic, které se pak dále urychlují mohutnějšími zařízeními, založenými na jiných principech. V těchto zařízeních se částice urychlují elektrickým polem poměrně malého napětí, za to mnohokrát po sobě.

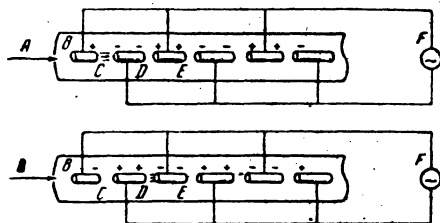
Prvním zařízením, pracujícím na tomto principu, byl tak zvaný lineární resonanční urychlovač, zkonstruovaný na počátku třicátých let tohoto století. Částice v něm procházely postupně serii kovových trubic, k nimž bylo připojeno proměnné elektrické napětí (obr. 1). Energie částic se tu zvyšuje vždy, když částice prochází mezi dvěma sousedními trubicemi. Délky trubic, perioda změny napětí a jeho amplituda byly propočítány tak, aby částice prošla prostorem mezi dvěma sousedními trubicemi za dobu rovnou půlperiodě změny elektrického napětí. Takovým »resonančním« pohybem částic se dosáhlo, že částice procházela mezi trubicemi urychlujícím polem, čímž její energie rostla.

Takové lineární urychlovače byly velmi dlouhé. Používalo se jich proto jen k urychlování »těžkých« částic, na příklad iontů rtuťi, na energii několika MeV.

Myšlenka resonančního urychlovače byla velmi plodnou, a přivedla v třicátých letech tohoto století amerického fyzika L a w r e n c e ke konstrukci prvního cyk-

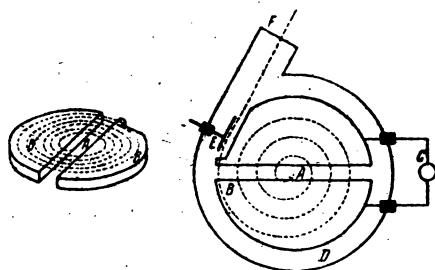
lického resonančního urychlovače, tak zvaného cyklotronu, který je »praotcem« dnešních urychlovacích zařízení. Hlavní rozdíl mezi cyklotronem a dnešními urychlovači a mezi původním lineárním urychlovačem je v tom, že se v cyklotronu používá magnetického pole k řízení pohybu částic po zakřivené dráze.

V cyklotronu probíhají částice rovinnou spirálovou dráhu, při čemž po každé, když oběhnou jednou kolem, projdou urychlovacím prostorem, k němuž je připojeno proměnné elektrické napětí. Spirálového zakřivení dráhy částic se dosahuje magnetickým polem. V homogenním magnetickém poli se totiž částice pohybuje po kružnici v rovině kolmé k siločarám pole, pokud v této rovině pohyb částice



Obr. 1. Schema lineárního urychlovače.

Ve fázi znázorněné v horním schématu procházejí částice právě mezi trubkami C a D, kde se urychlují. V dolním schématu je další fáze. Částice tu procházejí mezi trubkami D a E. Mezitím se však změnil směr proudu z generátoru F (jak ukazují také znaménka na koncích trubic), takže částice se zase urychlují. Šipky ukazují směr, v němž jsou částice do urychlovače zaváděny.



Obr. 2. Schema cyklotronu.

A — iontový zdroj, B — duanty, C — generátor střídavého napětí, D — vakuová komora, F — destička s pomocným napětím pro lepší vyvedení částic z urychlovače, F — okénko pokryté tenkou folií, kterým částice vycházejí z urychlovače.

začal. Poloměr této kružnice je přitom tím větší, čím větší je energie částic a čím slabší je magnetické pole. Doba jednoho oběhu částice závisí na její masse, na jejím náboji a na intenzitě pole; za jistých podmínek pak nezávisí na poloměru kružnice, kterou částice probíhá.

Schema cyklotronu je na obraze 2. Ke dvěma polovinám plochého kovového válce — duantům, umístěným ve vakuové komoře, se připojí proměnné elektrické napětí. Mezera mezi duantami je urychlovacím prostorem. Duanty jsou umístěny mezi póly mohutného elektromagnetu, který vytváří stálé magnetické pole. Nabitě částice — ionty — se tvoří při výboji plynů uprostřed magnetu, v tak zvaném iontovém zdroji. Dráha urychlovaných částic má tvar rovinné spirály vzhledem k tomu, že po každém průchodu urychlovacím prostorem (mezerou mezi duanty), to jest dvakrát za jeden oběh, se částice urychlí, to jest zvětší svou energii, čímž se také zvětší poloměr kruhové dráhy v magnetickém poli.

Jak se v takové soustavě dosahuje resonančních urychlení?

Perioda proměnného urychlovacího elektrického napětí se volí rovna době jednoho oběhu částice v magnetickém poli. Tato doba je stálá, neboť s rostoucí energií částice roste současně poloměr její dráhy a její rychlost.

V cyklických urychlovacích probíhají částice dlouhé dráhy a jsou proto podrobeny vlivu různých činitelů, které narušují hladký průběh urychlování. Tak na příklad nevyletí-li svazek iontů ze zdroje přesně ve střední rovině duantů, nebo dojde-li k srážkám iontů s atomy a s molekulami plynů, které zůstávají v komoře, a z mnoha jiných příčin se může stát, že částice dříve nebo později narazí na dolní nebo horní stěnu duantu, čímž se z dalšího urychlování vyřadí. Je proto

třeba nějakým způsobem chod urychlování stabilisovat, neboli částice »fokusovat«, to znamená odchylky od střední roviny duantů trvale vyrovnávat a částice udržovat na spirálové oběžné dráze.

Jistou schopnost »fokusace« má samo elektrické pole duantů. Z počátku je tato fokusace dosti významná, s růstem energie iontů však slábne.

Hlavní fokusační účinek má magnetické pole, jehož intenzita směrem od středu komory k jejím okrajům, to jest podle poloměru oběžné dráhy částice, poněkud klesá.

Cyklotron je velmi dokonalý stroj, avšak energie, na něž lze v cyklotronu částice urychlit, mají horní hranici. Z theorie relativity totiž plyne, a pokus to plně potvrzuje, že massa částice roste s její rychlostí (tak zvané relativistické zvětšení massy). Dosahují-li částice rychlostí blízkých rychlosti světla (která činí 300 000 km/sec), může tento jev být tak výrazný, že se poruší synchronnost pohybu částic se změnami elektrického pole. To pak může vést k tomu, že částice dochází do urychlujícího prostoru se zpožděním a urychlování se tak může změnit přímo v brzdění částic. Aby k tomu nedošlo, je třeba urychlené částice z cyklotronu vyvést. Tím je také dána horní mez pro urychlování částic v cyklotronu.

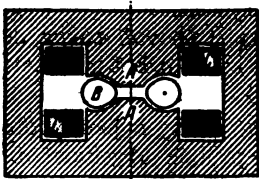
Cyklotronem lze urychlit protony na energie 10—15 MeV, částice alfa na 25—30 MeV. Pro ilustraci uveďme, že rychlost protonu s energií 10 MeV je 45 000 km/sec, to jest asi 11 % rychlosti světla, přírůstek massy při této rychlosti činí při tom jen 1 %. Avšak i tento malý přírůstek massy se projevuje citelně v chodu cyklotronu.

Nemožnost urychlovat částice cyklotronem na velmi vysoké energie je tak jedním z praktických důkazů správnosti pouček theorie relativity.

Je jasné, že pro urychlování lehkých částic — elektronů — na větší energie se cyklotron nehodí. Elektron dosahuje již při energiích 10—15 keV rychlosti srovnatelných s rychlostí světla, čímž podstatně roste jeho massa (při energii 10 keV činí přírůstek massy 2 %). Pro urychlování elektronů bylo proto třeba nalézt jinou metodu. Po dobu několika let po postavení prvního cyklotronu se navrhovalo urychlovat elektrony v tak zvaném vírovém elektrickém poli (indukční metoda urychlování). První zařízení, založené na tomto principu, bylo však postaveno až v roce 1940 a dostalo název betatron (podle názvu částice beta, jak se někdy nazývá elektron).

V betatronu se částice pohybují po drahách blízkých kruhovým s konstantním poloměrem. Proměnný magnetický tok vytváří vírové elektrické pole usměrněné ve směru tečny dráhy. Toto pole pak elektrony urychluje. Vakuová komora tvaru eliptického prstence je jako u cyklotronu uložena mezi póly elektromagnetu (obr. 3). Vinutím elektromagnetu neprochází však jako u cyklotronu stejnosměrný proud, nýbrž proud střídavý. Elektrony, které obíhají účinkem magnetického

pole po dráze v určitém směru, budou stále urychlovány, a to dotud, pokud poroste magnetický tok procházející drahou, a pokud poroste intenzita magnetického pole v oblasti dráhy. Ukazuje se pak, že urychlené elektrony se mohou pohybovat po kruhové dráze stálého poloměru jen tehdy, je-li intenzita pole na dráze dvakrát menší než je průměrná intenzita pole na ploše ohraničené drahou. Dosahuje se toho speciál-



Obr. 3. Schema betatronu

A — póly elektromagnetu, B — vakuové komora betatronu, C — vinutí elektromagnetu.

ními pólovými nástavci. Stabilitu pohybu elektronů ve vertikálním směru (vertikální fokusace) se dosahuje, podobně jako u cyklotronu, jistým oslabením magnetického pole podle poloměru v blízkosti dráhy částice. Tímto oslabením lze dosáhnout za jistých podmínek i stability pohybu v radiálním směru (radiální fokusace), to jest stability vzhledem k odchylkám pohybu elektronů od kruhové dráhy.

Zdroj elektronů, tak zvané elektronové dělo, jehož jádrem je rozžhavené vlákno, z něhož vyletují elektrony, je umístěn blízko kruhové dráhy. Urychlování elektronů trvá dokud magnetické pole nedosáhne maxima. Urychlené elektrony se zpravidla pouští na terč, umístěný na okraji vakuové komory. Nárazem na terč se elektrony prudce zabrzdí, čímž vzniká záření velké energie podobné záření gamma. Toto záření se pak používá při nukleárních pokusech, k prosvěcování kovů (defektoskopie), k lékařským účelům a p.

Betatronem se elektrony urychlují na energie kolem 100 MeV až 300 MeV. Betatron, jímž lze elektrony urychlit na 100 MeV, váží asi 130 tun. Při energiích od 100 do 200 MeV přestává betatron plynule pracovat, neboť při těchto energiích začínají elektrony ztrácet značnou část své energie ve formě elektromagnetického záření. Toto záření, vznikající tím, že dráha elektronu je zakřivená, s dalším zvyšováním energie rychle sílí. Při energiích 100 MeV a větších připadá značná část tohoto záření na viditelné světlo. U cyklických urychlovačů »těžkých« částic jsou energetické ztráty tohoto druhu tak malé, že se v chodu urychlovačů nijak neprojeví.

V roce 1944 došlo k dalšímu podstatnému pokroku v rozvoji urychlovací techniky. V tomto roce objevil sovětský fyzik V. I. V e k s l e r a krátce po něm americký fyzik M c M i l l a n j e v, nazvaný »autofázování« částic. Na tomto jevu jsou založeny všechny dnešní rezonanční urychlovače — synchrotrony, fázotrony, synchrotrony, jimiž lze dosáhnout urychlení částic na energie až miliard eV.

V synchrotronu se částice urychlují podobně jako v cyklotronu rezonančním účinkem proměnného elektrického pole s konstantní periodou. Pro zakřivení dráhy se však používá proměnného magnetického pole, a to proto, aby se kompenzovaly poruchy v synchronisací periody urychlovacího elektrického pole a doby oběhu elektronu v magnetickém poli, k nimž dochází relativistickým růstem hmotnosti elektronu při rostoucí jeho rychlosti. Avšak všechny částice neprojdou urychlovacím prostorem na dráze v téměř okamžiku; budou proto změny periody u různých částic různé, takže částice budou nabývat různých energií a tedy také různých hmotností (i když rozdíly budou nepatrné). Přesné kompenzace lze dosáhnout jen u »jedné« částice, kterou nazveme »rovnovážnou«. Ostatní částice nabudou energie o něco větší resp. o něco menší než částice rovnovážná. Lze ukázat, že tyto »nerovnovážné« částice »nevypadnou« ze synchrotronu, nýbrž že nabudou v průměru (po mnoha obězích) touž energii jako částice rovnovážná. Přitom okamžiky, ve kterých takové částice procházejí postupně urychlovacím prostorem, budou oscilovat kolem okamžiku, kdy tímto prostorem prochází rovnovážná částice. Lze tak v průměru dosáhnout synchronisace mezi dobou oběhu elektronů a periodou urychlovacího elektrického pole.

Pro cyklické urychlovače, určené k urychlování částic na velmi vysoké energie, je důležité, aby pohyb částic při urychlování se děl v prostoru prstence. V tom případě není nutný drahý permanentní magnet.

Poloměr dráhy »rovnovážné« částice se určí ze vztahu $r = \frac{Tv}{2}$, kde v je rychlost částice, T perioda urychlovacího napětí, které je v synchrotronu stálé. Urychlují-li

se v synchrotronu elektrony počínaje energií 2—2,5 MeV, bude se poloměr při dalším urychlování již měnit velmi nepatrně, neboť rychlost takových elektronů je již velmi blízká rychlosti světla a při zvyšování jejich energie se již jen málo mění (při energii 2 MeV se rychlost elektronu liší od rychlosti světla jen asi o 2 %). V takovém případě lze částice urychlovat v synchrotronu stejně jako v betatronu v prstencové komoře. Počáteční energie elektronů 2—2,5 MeV se získává na betatronovém principu. V synchrotronu se tohoto betatronového urychlení dosáhne pomocí speciálního nevelkého jádra v magnetu synchrotronu.

Vakuová komora synchrotronu se zhotovuje ze zvláštního skla nebo porcelánu. Urychlující zařízení se staví obvykle ve tvaru tak zvaného endovibratoru, který tvoří zvláštní část vakuové komory synchrotronu. Vnější a vnitřní povrch endovibratoru je pokryt elektricky vodivou vrstvou, která je na vnitřním povrchu přerušena. Tím vzniká prstencová mezera, která představuje po připojení proměnného napětí urychlovací prostor.

K vyzařování, které narušuje chod betatronu, dochází ovšem i u synchrotronu, avšak pozoruhodná schopnost synchrotronu kompenzovat energetické ztráty připadající na vyzařování (i když tato schopnost má své hranice) umožňuje urychlovat elektrony synchrotronem na značně vyšší energie než betatronem. Dnes je možné získat v synchrotronu elektrony s energiemi řádově jedné miliardy eV.

Rozvoj techniky ultrakrátkých vln umožnil urychlování protonů a elektronů i v lineárních urychlovačích, založených na použití vlnovodů a mohutných generátorů ultrakrátkých vln.

Jsou dva základní typy lineárních urychlovačů.

V urychlovačích prvního typu se částice urychlují elektrickým polem postupně elektromagnetické vlny, šířící se dutou kovovou trubicí, tak zvaným vlnovodem. Vhodným diafragmatem lze dosáhnout souhlasu v rychlostech šířící se vlny a pohybu částic, a tím resonančního urychlení.

V lineárních urychlovačích druhého typu se v »resonanční dutině«, to jest v oblasti, kde dochází k urychlování částic, vzbudí stojatá elektromagnetická vlna, takže napětí elektrického pole má v celé dutině střídavě buď směr souhlasný se směrem pohybu částic, nebo směr k tomuto opačný. V těch časových intervalech, kdy je tento směr souhlasný se směrem pohybu částic, se tyto urychlují. V době, kdy je směr napětí elektrického pole opačný, jsou částice »odstíněny« před tímto zpomalujícím polem tím, že projdou setrvačností kovovými válci, umístěnými podél osy dutiny.

Pro urychlování elektronů se používá zpravidla urychlovačů prvního typu. Lineární urychlovače mají před cyklickými tu významnou přednost, že v nich prakticky nedochází k energetickým ztrátám vyzařováním. V lineárních urychlovačích se získaly elektrony urychlené až na 600 MeV. K urychlování protonů se používá urychlovačů druhého typu. Dosáhlo se jimi energie až 32 MeV.

Objev tak zvané fázové stability umožnil konstrukci cyklických urychlovačů pro urychlování »těžkých« částic na velmi vysoké energie. Řekli jsme již, že poruchy v synchronisaci v cyklotronu nedovolují urychlit částice přes jistou hranici. Bylo proto přirozené hledat způsob, jak měnit za chodu cyklotronu periodu urychlujícího elektrického pole tak, aby byla v souladu se změnou periody oběhu částice způsobenou relativistickým zvětšením její massy. Tuto myšlenku bylo však možno realizovat až po objevu fázové stability. Cyklotron s proměnnou periodou urychlujícího napětí byl nazván fázotronem.

Seřízení fázotronu je poměrně jednoduché. Jeho chod je stabilní. Stabilisace

magnetického pole se ve fázotronu dosahuje ~~snadněji~~ než v cyklotronu. Kromě toho je nutné urychlující napětí ve fázotronu ve srovnání s cyklotronem řádově asi desetkrát menší (10 kV ve fázotronu proti 100 kV v cyklotronu). Přitom se ve fázotronu získají částice s energiemi mnohem většími než v cyklotronu.

Je však třeba poznamenat, že tyto přednosti fázotronu jdou na úkor intenzity urychlených částic. Vzhledem k měnící se periodě urychlujícího elektrického pole se částice ve středu magnetu fázotronu začnou urychlovat až tehdy, když perioda jejich oběhu souhlasí s periodou vysokofrekventního napětí. Jakmile tato »dávka« částic dosáhne maximální energie a bude využita, cyklus se opakuje a začne se urychlovat nová »dávka« částic. Fázotron tedy pracuje na rozdíl od cyklotronu impulsně, podobně jako betatron a synchrotron, při čemž časové intervaly mezi jednotlivými impulsy jsou mnohem delší než trvání impulsu samého.

Nejvyšších energií urychlených částic v urychlovačích typu fázotronů dosahuje synchrotron ústavu nukleárních problémů Akademie věd SSSR, v němž se protony urychlují až na 680 MeV.

Horní hranice energií částic, jichž lze dosáhnout ve fázotronu, je dána konstrukčními a ekonomickými faktory. Fázotron na energie řádově miliardy eV by musel mít nesmírně velký a drahý magnet,

I když lze ve fázotronu dosáhnout velmi velkých energií urychlených částic, přece jen toto zařízení nestačí k řešení mnoha základních otázek nukleární fyziky, jako je na příklad plurální vznik mesonů, vznik těžkých mesonů a studium jejich vlastností, tvoření dvojic proton-antiproton a p. V theoretické fyzice trvá již dlouhou dobu názor, že vedle protonů musí existovat také částice těžké massy, avšak záporně nabitě — tak zvané antiprotony. (V poslední době byla jejich existence prokázána také experimentálně. *Pozn. překl.*)

Velmi důležitá je otázka působení nukleárních sil na velmi malé vzdálenosti. Mnoho problémů s touto otázkou spojených lze studovat na přirozeném kosmickém záření, jehož primární složka sestává z částic s průměrnými energiemi jdoucími do miliard eV. Kosmické záření je ovšem třeba zkoumat v přírodě za podmínek, na něž fyzik vcelku nemá vliv. Bylo by proto velmi žádoucí zkonstruovat urychlovače, které by dávaly částice přibližně týchž energií, což by dávalo možnost studia v laboratorních podmínkách předem připravených.

Takové možnosti dává tak zvaný synchrofázotron, v němž se využívá přednosti »kruhového« magnetu. V synchrofázotronu roste magnetické pole s časem, perioda urychlujícího elektrického pole se zmenšuje, poloměr »rovnovážné« oběžné dráhy je konstantní.

Obsluha a využití synchrofázotronu jsou velmi složité a obtížné i při využití všech moderních technických vymožeností. Zvláště obtížné je udržet při normálním chodu příslušný souhlas mezi intenzitou magnetického pole a periodou urychlujícího elektrického napětí, a také zavedení částic do stroje před urychlováním a jejich vyvedení ze stroje po urychlení je nesnadné.

V poslední době se objevily zprávy o stavbě tří velkých synchrofázotronů, a to dvou v USA a jednoho v Anglii. První dva — zvané kosmotron a bevatron — urychlí protony až na tři resp. šest miliard eV, anglický synchrofázotron urychlí rovněž protony na jednu miliardu eV.

Pro ilustraci rozměrů moderních urychlovacích zařízení uvedme některá data o kosmotronu. Elektromagnet váží asi 2000 tun (u bevatronu asi 10 000 tun). K napájení elektromagnetu je zapotřebí elektrárny, která by stačila zásobovat elektrickou energií krajské město. Poloměr »rovnovážné« dráhy je asi 9 m.

Částice provedou při urychlování asi 4 000 000 oběhů a proletí při tom dráhu dlouhou asi 250 000 km. Celý proces urychlení potrvá asi jednu vteřinu. Frekvence těchto urychlovacích procesů je jedno urychlení každých pět vteřin. Každým urychlením se urychlí asi 10 miliard částic, což odpovídá proudu asi 10^{-9} A. Pro předběžné urychlení protonů na energii 4 MeV se v kosmotronu používá Van de Graafova generátoru. Vakuová komora kosmotronu má tvar prstence s pravoúhelníkovým profilem, je z nerezavějící oceli a je vyčerpávána dvanácti velkými difusními vývěvami.

V SSSR je před dohotovením stavba největšího synchrofázotronu na světě. V tomto urychlovači bude možno získat protony s energií až 10 000 MeV. Magnet tohoto urychlovače váží 36 000 tun.

Jaké jsou perspektivy dalšího zvyšování energie urychlených částic?

Pro všechny cyklické urychlovače platí především, že čím větší je poloměr oběžné dráhy částice a čím větší je maximální intenzita magnetického pole, tím větší je energie urychlených částic. Hranice pro intenzitu magnetického pole je řádově 15 000 gaussů; pro další zvyšování energie částic je proto nutno zvětšovat poloměr oběžné dráhy, to jest rozměry urychlovače. S rozměry urychlovačů však rostou neúměrně náklady na jejich stavbu. Nehospodárnost velkých urychlovacích zařízení je způsobena zejména malou účinností fokusace částic. V posledních letech se proto usilovně zkoumá možnost tak zvané »silné fokusace« částic v urychlovačích.

V obyčejných urychlovačích se fokusace zajišťuje jistým zmenšováním intenzity magnetického pole ve směru poloměru (radiálním). V kosmotronu na příklad je magnetické pole na okraji o 2 % slabší než na střední dráze. Při zvětšení spádu magnetického pole se zlepší vertikální fokusace, objeví se však radiální defokusace. Nechá-li se naopak magnetické pole ve směru poloměru růst, zlepší se radiální fokusace, objeví se však zase vertikální defokusace.

V urychlovačích se silnou fokusací se využívá obou těchto jevů. Prstencový magnet takového urychlovače sestává z článků s magnetickým polem rostoucím a magnetickým polem slábnoucím ve směru poloměru. Články s různými poli jdou střídavě za sebou. Za jistých podmínek zajišťuje takové zařízení fokusaci radiální i vertikální, při čemž fokusace je »silná«, to jest výchylka kmitání částic kolem »střední« dráhy je mnohem menší než u obyčejných urychlovačů. Urychlovače se silnou fokusací jsou však mnohem citlivější na všechny nepřesnosti v konstrukci urychlovače než urychlovače obyčejné.

Obtíže v konstrukci urychlovačů se silnou fokusací jsou značné. Budou však nepochybně překonány, tím spíše, že tato cesta je dnes pravděpodobně jediná, po níž lze získat částice s energiemi 10—30 miliard eV, a takových částic je zase třeba pro další atomový výzkum, neboť každým podstatným zvětšením energie částic se dostáváme k novým poznatkům o zákonitostech, které vládou v atomovém jádru.

Volně přeložil Josef Veselka