

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Urychlovače částic

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.

Autor: Lenka Záleská

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou urychlování elektricky nabitých částic. Nejprve jsou představeny základní technické koncepce, které lze považovat za předchůdce dnešních urychlovačů. Následuje přehledová kapitola, ve které jsou urychlovače rozděleny do skupin dle vybraných charakteristik (dráha, režim práce, druh srážky atp.). Hlavní část textu je věnována přehledu nejvýznamnějších urychlovačů používaných v současné vědecké praxi. Detailněji se pak práce zabývá laboratoří CERN a přílehlým urychlovačem LHC. Ten stojí v současnosti v centru zájmu jak odborné, tak i laické veřejnosti, neboť by měl umožnit simulovat podmínky, které panovaly při vzniku vesmíru. Poslední kapitola přináší stručný přehled nejvýznamnějších osobností z tohoto oboru.

ABSTRACT

This bachelor work is dealing with questions of particle accelerators. Firstly, the basic technical concepts are shown. These are also said to be a predecessor of today accelerators. Following with chapter where the accelerators are divided into groups based on chosen characterization (trajectory, operating mode, types of collisions etc.). The main part of the text is devoted to the outline of the most important accelerators which are used in temporal science practice. This task is concerned with CERN laboratory and contiguous LHC accelerator in more detail. The LHC accelerator stands in centre of interests including expert public and general public. It should be able to simulate conditions identical to conditions during the creation of the Universe. The last chapter contains a brief outline of the most important figures in this field.

Prohlašuji, že předloženou práci jsem vypracovala samostatně, pouze s použitím uvedené (citované) literatury.

V Prachaticích 23.4.2010

Lenka Záleská

Touto formou děkuji svému konzultantovi RNDr. Petru Bartošovi, Ph.D.,
za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce...

Obsah

Úvod	6
1. Základní struktura urychlovačů	7
1.1. Přírodní zdroje rychlých částic	8
1.2. Iontová trubice – nejjednodušší urychlovač	10
1.3. Iontový zdroj.....	11
1.4. Terčík a vstřícné svazky	12
2. Druhy urychlovačů.....	14
3. Lineární urychlovače.....	15
4. Kruhové urychlovače	19
4.1. Cyklotron	20
4.2. Synchrontron	24
4.3. Betatron	30
4.4. Mikrotron.....	33
5. Elektrické napájení urychlovačů.....	35
6. Výzkumné laboratoře	39
6.1. CERN.....	39
6.2. SLAC	46
6.3. CESR	47
6.4. KEK.....	48
7. Velké urychlovače.....	49
7.1. Large Hadron Collider (LHC)	50
7.2. Koncepční perspektivy velkých urychlovačů:.....	62
8. Kosmické urychlovače	65
9. Konstrukteři urychlovačů.....	66
10. Využití urychlovačů	72
11. Model znázorňující funkci urychlovače.....	73
Použitá literatura	74
Příloha 1	77
Příloha 2.....	80

Úvod

Na začátku bychom si měli říct, co to vlastně je urychlovač a co pro nás znamená. Odborně se dá definovat jako zařízení k urychlení elektricky nabitých částic působením vnějšího elektrického či proměnného elektromagnetického pole. Pro mě je to hlavně zařízení, které ničí nádory. To byl taky důvod, proč jsem si toto téma vybrala jako mojí bakalářskou práci. Před dvěma lety lékaři diagnostikovali mojí babičce rakovinu. Po chemoterapii absolvovala ozařování, na které jsem jí doprovázela. Tam jsem si všimla, že pro ozařování se používají lineární urychlovače. Proto jsem se o téma urychlovačů elektricky nabitých částic začala více zajímat. Po přečtení pár článků, jsem zjistila, že urychlovače nejsou jen velké urychlovače, na kterých vědci zkoumají částicovou fyziku. Objevují se kolem nás, tak například CRT monitor, tzv. „klasický televizor“, obsahuje část trubice, kde jsou částice urychlovány.

Proč se vědci tak zabývají urychlovači částic a konstruktéři je staví větší a výkonnější? Nejlepší odpověď na tuto otázku je asi ta nejjednodušší, člověk je zvědavý a chce vědět, jak vznikl vesmír. Počítačové simulace sice mohou napodobit tyto děje, ale vědci už mají k dispozici přístroje, kde to mohou vyzkoušet prakticky, čemuž se nic nevyrovná. A tak se nyní vědci snaží na urychlovači LHC v CERNu napodobit vznik vesmíru a tzv. Velký třesk. Na jejich výsledky si musíme teprve počkat, protože při dokončování této práce tento pokus teprve započal. Takže nyní nevíme, jakých výsledků se vlastně dočkáme, ale snad nedojde k tomu, čeho se bojí odpůrci tohoto urychlovače, k vzniku černé díry, která by vše pohltila.

Nyní si představíme, co tato práce obsahuje. Je to přehled v oblasti urychlovačů částic. To znamená, že jsou tu představeny předchůdci dnešních urychlovačů, jako je iontová trubice. Dále jsou urychlovače rozděleny podle různých charakteristik, jako je dráha, po které jsou elektricky nabitě částice urychlovány. Dalšími hledisky jsou režim práce, druh srážky atp. Hlavní část textu je věnována přehledu nejvýznamnějších urychlovačů používaných v současné vědecké praxi. Detailněji se pak práce zabývá laboratoří CERN a přilehlým urychlovačem LHC. Jedna kapitola je zaměřena na vynálezece a konstruktéry, bez kterých by tyto urychlovače nebyly.

V příloze k této práci jsou také přidány články zabývající se již zmíněným pokusem o vzniku vesmíru.

1. Základní struktura urychlovačů

Urychlovač částic, zkráceně jen **urychlovač**, je technické zařízení, používané pro dodání kinetické energie elektricky nabitým částicím. Nabité částice (iony nebo elektrony či pozitrony) jsou v urychlovači jednou nebo opakovaně urychleny rozdílem potenciálů elektrického pole. Urychlovače slouží k výzkumu elementárních částic, ale i v technické praxi. Existují dva základní typy urychlovačů: lineární a kruhový. Urychlovač částic způsobuje zvýšení kinetické energie elektricky nabité částice. Tu je možné posléze využít na příklad při čelní srážce mezi dvěma svazky částic stejného druhu, buď protony, nebo různými typy iontů, především iontů olova. Při srážce se tyto částice rozptýlí, a když mají dostatečnou energii, vznikají přitom další částice (produkty srážky). Na zaznamenání toho, co se děje při srážce částic slouží částicové detektory. Částicové urychlovače se využívají ke zkoumání složení hmoty okolo nás - atomů, elementárních částic, kvarků.

Za typ urychlovače lze do jisté míry považovat i klasickou (CRT) televizní obrazovku. První urychlovače začaly být vyvíjeny na sklonku 20. let 20. století. Během následujícího desetiletí (zhruba do roku 1940) byly objeveny základní principy a postaveny podle nich první urychlovače.

1.1. Přírodní zdroje rychlých částic

K výzkumu mikrosvěta potřebujeme intenzivní zdroje rychle letících částic, protože hlavním prostředkem studia je srážka těchto částic. Takovým zdrojem jsou například radioaktivní atomová jádra, která vysílají všemi směry částice, podle své povahy buď alfa (=jádra helia), beta (=elektrony, pozitrony) nebo gama (=fotony). Těchto střel můžeme použít k ostřelování zkoumaného materiálu. Tak postupoval Ernest Rutherford, když částicemi alfa ostřeloval tenkou folii těžkého kovu. Objevil v atomu neuvěřitelně malé tvrdé jádro. V dnešní době jsou však tyto radioaktivní zdroje částic málo zajímavé, protože vysílají částice všemi směry, v poměrně malém počtu (intenzitě) a především s pevně danou, nízkou energií, kterou nemůžeme měnit podle potřeby. Významnějším přírodním zdrojem částic je kosmické záření.

Z vesmíru přilétají na Zem částice ve velkých proudech. Jejich zdroje nejsou známy, ale jistě to jsou aspoň zčásti svědkové vesmírných „katastrof“ (kolaps hvězd). Hodně částic k nám přilétá ze Slunce, kde jsou jaderné reakce provázeny vysíláním energie, jak ve formě elektromagnetického záření nejrůznějších vlnových délek, tak ve formě korpuskulárního záření. Podobné záření vysílají i ostatní hvězdy. Zvlášť významným zdrojem částic jsou výbuchy supernov – gigantické vesmírné katastrofy.

Dalekou pouť vesmírem přežijí jen stabilní částice; protony, elektrony, fotony, neutrina a jejich antičástice. O tom, v jakém poměru se kosmickém záření vyskytují jednotlivé druhy, se však studiem na Zemi mnoho nedozvíme: jakmile totiž proniknou do atmosféry, narážejí prudce do atomů a molekul vzduchu (kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého, vodních par a dalších plynů), rozbíjejí je a přitom ovšem i produkují množství krátce žijících částic: π -mezonů a K, hyperonů a antihyperonů, leptonů a antileptonů. Tak pro účinkem primárních kosmických částic, srážejících se s atomy vzduchu, vznikají sekundární částice, které dopadají na zem. Přesné informace o složení primární, atmosférou neovlivněné složky nám poskytují umělé družice, které létají nad atmosférou.

Částice přilétají nejrůznějšími rychlostmi od nejnižších až téměř k rychlosti světla. Jejich intenzita a pronikavost je nebezpečná lidskému zdraví: zhoubně působí na buňku. Naštěstí jsou škodlivé účinky tlumeny zemskou atmosférou, která částice

brzdí a spotřebovává jejich energii. Nebezpečné může však být, zvláště při trvalejším působení, kosmické záření mimo zemskou atmosféru, v družicích, na Měsíci a na některých planetách. To je jeden z důležitých praktických problémů kosmonautiky.

Pro fyziku mikrosvěta je kosmické záření významné tím, že poskytuje zdroj prudce letících částic, schopných vyvolávat subnukleární procesy.

Důvod výzkumu

Pro tyto účely máme naopak zájem využívat i záření primární, neztlumené a neoslabené průchodem atmosférou. Proto se laboratoře zaměřené na výzkum a využití kosmického záření budují v horách, na Slovensku například na Lomnickém štítě. V době nástupu tryskových letadel byly bloky fotografických emulzí dokonce ukládány do úložných prostorů letadel, představovaly tedy jakési stálé zavazadlo, aby ve stratosféře nasbírali co nejvíce prudkých srážek s primárním zářením. Pro nalétání mnoha tisíc kilometrů byly emulze přeneseny do laboratoří a vzniklé subnukleární reakce byly prozkoumány. Později se totéž začalo realizovat mnohem účinněji v umělých družicích Země.

1.2. Iontová trubice – nejjednodušší urychlovač

Iontová trubice je jedním z prvních druhů urychlovačů částic. Pracovala na elektrostatickém principu.

Jednalo se o dlouhou (od desítek centimetrů až přes 10 m) trubici z dobrého izolantu, uvnitř níž byl vyčerpán vzduch. Každý konec trubice měl jiný elektrostatický potenciál, a nabité částice (ionty) získávaly rychlost pohybem v takto vzniklém elektrostatickém poli. Iontové trubice se vyráběly nejprve ze skla, s rostoucím napětím pak z porcelánu. Uvnitř i vně trubice byl povrch větších trubic vytvarován do tvaru žeber, aby se zabránilo povrchovým přeskokům náboje.

Velké iontové trubice se staly součástí některých fyzikálních laboratoří během 30. let 20. století. Napětí pro ně dodával Van de Graafův generátor, nebo kaskádový generátor, což jsou zařízení schopná vyvinout elektrické napětí v řádu několika milionů voltů. Energie iontů na konci trubice udaná v elektronvoltech odpovídá napětí mezi konci trubice.

Tento typ jednoduchého urychlovače však začal být už na konci 30. let zatlačován do pozadí urychlovači, které pro dodání energie částicím nepotřebují pracovat s tak obrovskými napětími – například cyklotronem.

Iontová trubice, urychlující elektrony, je jednou ze základních částí klasické televizní obrazovky CRT.

[13]

1.3. Iontový zdroj

Než se budeme zabývat jednotlivými typy urychlovačů, zmíníme se o součásti, kterou mají všechny urychlovače: zdroj urychlovaných částic.

Zdroj urychlovaných částic (iontový zdroj) emituje do "startovacího" místa urychlovacího systému požadovaný druh částic, jako jsou elektrony, protony či ionty. V nejjednodušším případě se jedná o ionizační **trubici** obsahující příslušný zředěný plyn (např. vodík H), kde v doutnavém výboji mezi katodou a anodou (při napětí cca stovky voltů až desítky kV) vznikají ionty (u vodíku jsou to **protony** p^+) a ty jsou pomocí tenké kapiláry vedeny "odsávací" elektrodou do urychlovacího systému.

Pro získání **iontů** se používá výboj ve zředěném plynu (obsahujícím příslušný prvek) při dostatečně vysokém napětí, aby docházelo k ionizaci i na K slupce. Vznikají přitom ionty s různým stupněm ionizace, z nichž je potřeba požadovaná jádra (ionty s nejvyšším stupněm ionizace) **odseparovat** pomocí elektrického a magnetického pole a zavést je do urychlovacího systému.

Pro urychlovače **elektronů** je zdrojem prostá **žhavená katoda** (termoemise elektronů) opatřená vhodnými urychlujícími a fokusujícími anodami - "elektronovým dělem" - podobně jako u obrazovky. Popř. může být katoda opatřena *mřížkou* pro elektronickou regulaci toku elektronů.

V poslední době se vyvíjejí i **laserové zdroje**, v nichž je emise částic generována vysokou koncentrací energie z krátkých a velmi intenzivních laserových pulzů, dopadajících na vhodný terč. Složitěji se pro urychlení získávají antičástice. **Pozitrony** se získávají ostřelováním terčů z materiálu s vysokým protonovým číslem Z (např. wolframu) urychlenými elektrony, přičemž elektromagnetickou interakcí v poli jader vznikají mj. pozitrony e^+ . Podobně **antiprotony** p' je nutno získávat ostřelováním vhodného terčů protony urychlenými na energie vyšší než 3 GeV, kdy dochází mj. k reakcím $p + p \rightarrow 2p + p + p'$.

U velkých urychlovačů vysokých energií se jako zdroje částic k urychlení někdy používají **injektory** - do hlavní komory jsou "předurychlené" částice vstříkovány

pomocným lineárním či kruhovým urychlovačem (s energií jednotky až desítky MeV, popř. GeV) a následně urychlovány na požadovanou vysokou energii (GeV či TeV).

[1]

1.4. Terčík a vstřícné svazky

Už víme, že pomocí iontového zdroje získáme proud nabitých částic. Tyto proudy se využívají při pokusech v urychlovačích k pokusům, ke kterým dochází ke srážkám. Rozlišujeme dva druhy srážek, buď na pevný terčík, který je umístěn v urychlovači nebo dochází ke vzájemným srážkám mezi proudy elektricky nabitých částic – collidery.

Terčík, na nějž dopadá svazek urychlených částic, je buď **vnitřní** - je umístěn uvnitř urychlovacího systému, nebo **vnější** - svazek částic je vyveden ven z urychlovací trubice. Rovněž sekundární částice, produkované na vnitřním terčiku (jako jsou π nebo K mesony), se působením magnetického a elektrického pole vyvádějí ve formě svazku do prostoru laboratoře, kde jsou umístěny měřicí aparatury (detekční přístroje, bublinové komory atd.). Při dopadu urychlených částic na terčík se většina kinetické energie částic mění na teplo - ostřelovaný **terčík se zahřívá**. Aby nedošlo k jeho tepelnému poškození či odpaření terčíkové látky, je nutno toto ztrátové teplo (výkon takového terčíku může činit i stovky wattů) odvádět - terčík se fixuje na masivní kovovou podložku s dutinou, chlazenou protékající vodou (podobně jako anody výkonových rentgenových trubic).

Terčík či obecně místo, kde dochází k interakcím urychlených částic, bývá opatřen **detektorem sekundárních částic**. V jednodušších případech slouží k **monitorování** vznikajících jaderných reakcí. U velkých urychlovačů pro výzkum interakcí částic je tvořený často celým složitým **detekčním systémem**, umožňujícím podrobnou analýzu drah, energií, hybností a dalších charakteristik sekundárních částic vznikajících při vysokoenergetických interakcích.

[1]

Vstřícné svazky – collidery

Dopadá-li urychlená částice na (pevný, nepohyblivý) terčík a tam se srazí s další částicí nebo jádrem, spotřebuje se na vlastní interakci ve skutečnosti jen část energie nalétající částice, neboť podle zákona akce a reakce se část energie dopadající částice se využije na kinetickou energii odražené částice. Pro výsledek interakce je důležitá kinetická energie v **těžišťové soustavě** obou částic. Podstatného zvýšení efektivní energie interakce můžeme dosáhnout tím, že nalétající a terčíková částice se budou pohybovat **proti sobě** se srovnatelně vysokými kinetickými energiemi. V tom spočívá metoda **vstřícných svazků** bez použití klasického terčíku: obě částice, jejichž interakce chceme zkoumat, se urychlí na vysoké energie a ve vstřícných svazcích se pouštějí proti sobě tak, aby se vzájemně čelně srážely a interagovaly. Oba svazky se urychlují buď v jedné trubici (např. elektron-pozitronové svazky), nebo ve dvou různých trubicích. V daném místě urychlovacího prstence se oba svazky urychlených částic, letících opačným směrem proti sobě, působením magnetického pole fokusují a navedou se tak, aby se čelně srážely. Přístroje tohoto druhu se nazývají **collidery** a umožňují studovat interakce částic při podstatně vyšších efektivních energiích než je tomu u klasických urychlovačů s terčíky - v současné době se dosahuje srážek až energii několika TeV. Místo, kde dochází k interakcím vstřícných svazků, je obklopeno složitým detekčním systémem pro detailní studium sekundárních částic.

Aby vstřícné srážky byly dostatečně časté, je třeba zajistit značně vysokou intenzitu obou svazků. Proto se na některých urychlovačích používají speciální **akumulační prstence**, v nichž se v silném magnetickém poli hromadí urychlené částice (např. protony a antiprotony) z několika dávek a teprve po dosažení dostatečné intenzity se realizuje srážka ve vstřícných svazcích.

[1]

2. Druhy urychlovačů

Urychlovače elektricky nabitých částic můžeme rozdělit do několika skupin podle různých hledisek. Mezi nejčastější patří dělení podle druhu částic, tvaru dráhy, režimu a podle druhu srážky (viz kapitola 1.4.).

a) Dělení podle toho, jaký **druh částic** urychlují:

1. Urychlovače elektronů
2. Urychlovače protonů a lehkých iontů
3. Urychlovače těžkých iontů

b) Dělení podle **tvaru dráhy**:

1. Lineární
2. Kruhové (cyklické) – urychlované částice se pohybují po kruhové dráze

c) Podle **režimu**:

1. Spojité
2. Pulzní

d) Podle druhu srážky:

1. Vstřícné svazky
2. Terčík

3. Lineární urychlovače

Lineární urychlovače urychlují nabité částice působením elektrického pole během jejich pohybu po lineární **přímkové dráze**. Lineární urychlovač se často zkráceně nazývá **Linac** (*Linear accelerator*).

Můžeme je rozdělit na:

- **Elektrostatické (vysokonapětové)**

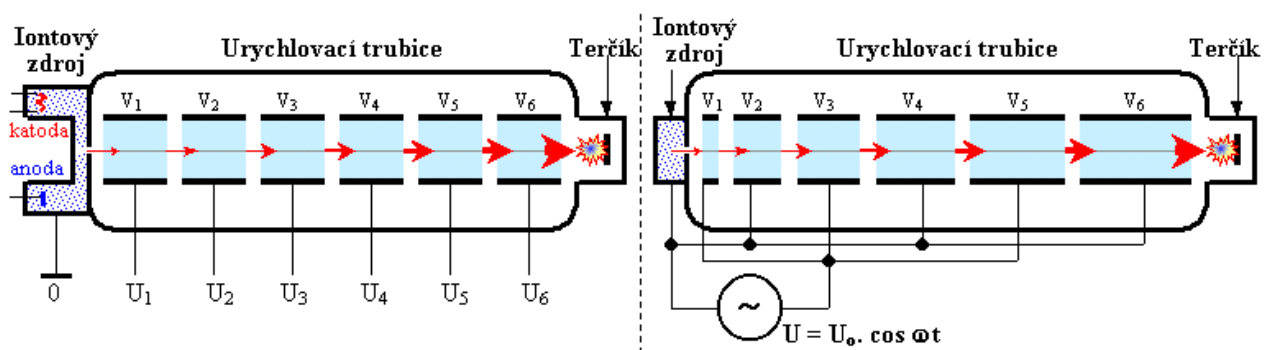
Elektrostatické lineární urychlovače se skládají se ze zdroje vysokého napětí a urychlovací trubice. Existují dva typy zdroje napětí:

a) Cockroftův-Waltonův generátor

b) Van de Graaffův generátor

- **Vysokofrekvenční**

Vysokofrekvenční lineární urychlovače jsou tvořeny urychlovací trubicí s řadou válcových elektrod připojených ke zdroji VF napětí.



Obr. 3.1: Zjednodušené schéma lineárního urychlovače elektrostatického (vlevo) a vysokofrekvenčního (vpravo). [1]

Základní schéma **elektrostatického** lineárního urychlovače je na obr. 3.1 vlevo. Z iontového zdroje vstupují požadované částice (elektrony, protony, deuterony apod.)

do urychlovacího systému, tvořeného několika sousými kovovými válcovými elektrodami V_1, V_2, \dots, V_n , mezi nimiž je rozloženo postupně vzrůstající **vysoké napětí** $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$. Elektrostatickým polem jsou nabitě částice s nábojem q na lineární dráze urychlovány na energii $E = q \cdot (U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n)$ danou součtem napětí na jednotlivých elektrodách. Mezera mezi dvěma po sobě následujícími válcovými elektrodami působí na letící částice jako "elektrická čočka" (je to podobné jako v obrazovce), fokusující proud částic do úzkého svazku, který nakonec dopadá na terčík. Urychlovací elektrody jsou napájeny vysokým napětím buď z elektronického *kaskádního násobiče* (soustava vhodně zapojených diod a kondenzátorů), nebo z elektrostaticko-mechanického *Van de Graaffova generátoru*. Používá se napětí od několika stovek kilovoltů až asi do 5 MV (vyšších napětí je obtížné dosáhnout pro vznik korónových a jiskrových výbojů).

Efektivnější způsob, jak na lineární dráze urychlit nabitě částice na značně vysokou energii bez použití extrémně vysokého napětí, je realizován ve **vysokofrekvenčním lineárním urychlovači**, jehož nejjednodušší schéma je na obr. 3.1 (vpravo). Nabitě částice z iontového zdroje Z vstupují do urychlovacího systému válcových elektrod $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, které jsou připojeny ke **střídavému elektrickému napětí** $U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t) = U_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$ o amplitudě U_0 a frekvenci f . Liché válce jsou připojeny k jednomu pólu, sudé válce k druhému pólu vysokofrekvenčního zdroje vysokého elektrického napětí. Přejde-li elektricky kladně nabitá částice s nábojem q a hmotností m ze zdroje Z ve fázi, kdy první válcová elektroda V_1 má záporný potenciál $-U_0$, pak získá energii $E_1 = q \cdot U_0$ a rychlost $v_1 = \sqrt{2qU_0/m}$, takže délku l_1 uvnitř válce V_1 proletí za čas $t_1 = l_1/v_1$. Je-li frekvence f střídavého napětí volena tak, aby urychlená částice vstoupila do mezery mezi válci V_1 a V_2 v čase, kdy se polarita obrátí a válec V_1 má kladný a V_2 záporný potenciál, je částice znovu urychlena o energii $q \cdot U_0$, tj. má již energii $2 \cdot q \cdot U_0$. Je-li **synchronizace** mezi frekvencí f , napětím U_0 a délkami elektrod l_k *) volena tak, aby se vždy během průchodu mezi jednotlivými válcovými elektrodami V_k obrátila polarita střídavého napětí, budou se tyto "synchronní" částice při průchodu každou elektrodou znovu a znovu urychlovat.

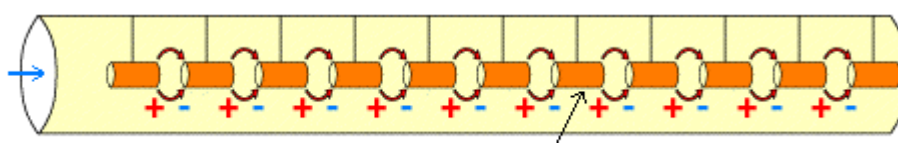
*) Jak je vidět z obr. 3.1 (vpravo), k dosažení synchronizace se musí délka válcových elektrod V_k postupně zvyšovat, jak narůstá rychlost částic. Toto již neplatí při dosažení rychlosti blízké rychlosti světla, kdy se při urychlování již rychlost částice prakticky nezvyšuje; s kinetickou energií roste jen *relativistická hmotnost* částice.

Stojí též za zmínku, že k vlastnímu elektrickému urychlení částice dochází v **mezerách** mezi elektrodami, zatímco uvnitř kovového válce, kde je gradient elektrického pole blízký nule (elektrické pole je odstíněno), prolétají částice setrvačností (to platí i u elektrostatického urychlovače v levé části obrázku). Vývoj těchto urychlovačů postupoval tak, že **frekvence f se zvyšovala**, přičemž místo válcových elektrod se používají **dutinové rezonátory**. Novější lineární urychlovače užívají pro vytvoření urychlujícího pole **vlnovodu**, rozděleného vhodnými diskovými výběžky na řadu rezonančních dutin a napájeného frekvencí několika GHz (nejčastěji kolem 3GHz) z *klystronového* nebo *magnetronového generátoru* (stručně popsaných níže). Ve vlnovodu se vytváří vysokofrekvenční střídavé elektromagnetické pole ve formě postupné nebo stojaté **elektromagnetické vlny**. Pokud se v poli této **nosné vlny** urychlovaná nabitá částice pohybuje **synchronizovaně**, na částici působí stálá urychlující síla daná elektrickou složkou E elektromagnetické vlny. Částice k urychlení se do urychlovacího systému dutinových rezonátorů či vlnovodů vstříkují z iontového zdroje, či elektronové trysky v případě elektronů, ve formě "shluků" (*bunch*) v **pulzním režimu**, v přesné elektronické synchronizaci **) s urychlujícím vysokofrekvenčním polem.

) Aby ve vysokofrekvenčním poli na částici působila stálá urychlující elektrická síla, musí do vlnovodného urychlovacího systému vstoupit ve vhodné fázi a s rychlostí blízkou fázové rychlosti vlny - musí být splněna **synchronizační podmínka. Pulzní režim iontového zdroje (resp. elektronové trysky) a vysokofrekvenčního generátoru je řízen elektronickým obvodem osazeným speciálními výkonovými spínacími součástkami - je to buď speciální elektronka *tyatron*, nebo polovodičový *tyristor*. Urychlovací vlnovodný systém je tvořen několika speciálně tvarovanými kovovými (měděnými) **rezonančními dutinami**, řazenými za sebou. Elektrony jsou v pulzních dávkách do urychlovacího systému vstříkovány z elektronové trysky ("děla") s energií cca 30-50 keV, protony z iontového zdroje s energií podstatně vyšší. Rezonanční dutiny na počátku urychlovacího systému mají kratší délku a vzdálenosti mezi sebou, další se prodlužují tak, aby se fázová rychlost elektrického pole shodovala s narůstající rychlostí částice. Celý systém je trochu podobný obr. 3.1 (vpravo), avšak místo válcových elektrod je větší počet rezonančních dutin a místo vodičů, přivádějících střídavé napětí, vede do počáteční části trubice vlnovod z magnetronu nebo klystronu.

Malé lineární urychlovače elektronů jsou nyní velmi často používány v **radioterapii** (kde postupně vytlačily dříve používané betatrony), především jako zdroj tvrdého **brzdného záření gama** o energiích cca 5 - 40 MeV. Záření o takovéto vysoké energii dobře proniká i k hlouběji uloženým zhoubným nádorům a méně poškozuje okolní tkáň.

Velké vysokofrekvenční lineární urychlovače s nosnou vlnou se používají pro energie až desítky GeV, projektovány jsou i pro oblast několika TeV. Používají se buď jako samostatné základní přístroje, nebo mohou sloužit k „předurychlení“ částic - jako *injektory* pro velké synchrotrony. Na rozdíl od kruhových urychlovačů, kde jedním urychlovacím systémem jsou částice opakovaně mnohokrát urychlovány, v lineárním urychlovači dochází k postupnému urychlování v mnoha urychlovacích systémech řazených přímkově za sebou. I při použití vysokých gradientů (až 100 MV/m) a vysokých frekvencí (až 30 GHz) pro dosažení vysokých energií (řádově až TeV) činí délka největších lineárních urychlovačů i několik kilometrů! [1]



Obr. 3.2: Schéma vysokofrekvenčního lineárního urychlovače. [16]

Popis obrázku:

šipka vlevo – letící částice ze zdroje částic

černá šipka – válcové elektrody

Největší lineární urychlovač (3 km) je Linac ve SLACu (USA) – urychluje elektrony na 50 GeV.



Obr. 3.3: Letecký záběr Stanfordského lineárního urychlovače SLAC. [4]

4. Kruhové urychlovače

Velmi efektivním způsobem, jak urychlit nabité částice na vysoké energie, je jejich **mnohonásobné urychlení** v elektrickém poli, kam jsou částice opakovaně vraceny po **kruhové dráze** působením **magnetického pole**. Na částici s nábojem q je zde aplikována nejen elektrická urychlující síla $F_e = q \cdot E$, ale i Lorentzova síla $F_m = q \cdot [v \times B]$ působící v magnetickém poli intenzity B kolmo ke směru pohybu nabitě částice rychlostí v . Tato magnetická síla způsobuje, že nabitá částice se bude pohybovat po **kruhové dráze** o poloměru $R = m \cdot v \cdot c / (q \cdot B)$. Je-li ve vhodných místech této kruhové dráhy synchronně aplikováno elektrické urychlující pole (v tečném směru), budou částice **periodicky urychlovány** při každém svém oběhu. [1]

Pohyb po zakřivené dráze není jen technickou komplikací. Problém spočívá zejména v tom, že částice pohybující se po kruhové dráze mají velké zrychlení. Podle teorie relativity a teorie elektromagnetického pole částice, která má nějaké zrychlení kolmé na směr jeho pohybu vyzařuje elektromagnetické záření.

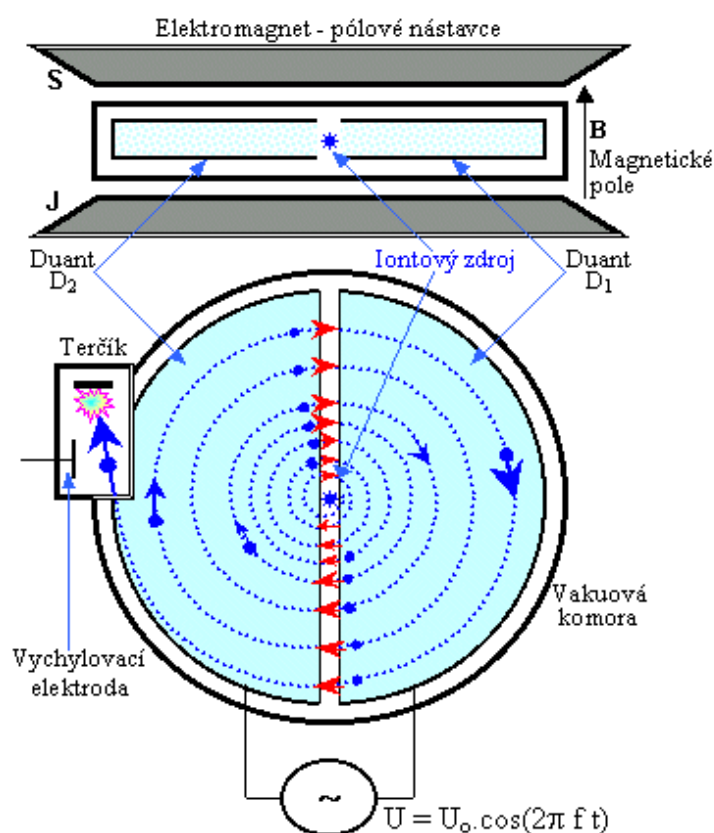
V kruhovém urychlovači je proto energie dodávaná částicím elektrickým polem snižovaná vlastním vyzařováním těchto částic. Toto vyzařování se dá omezit zvětšením poloměru dráhy (dostředivá síla je nepřímo úměrná poloměru dráhy). To je důvodem, proč potřebujeme na dosahování vyšších energií kruhové urychlovače stále větších rozměrů, největší je v CERNu.

Jednotlivé druhy kruhových urychlovačů:

- a) Cyklotron
- b) Synchrotron
- c) Betatron
- d) Mikrotron

4.1. Cyklotron

Cyklotron, jinak též cyklický vysokofrekvenční urychlovač slouží k urychlování těžkých nabitých částic pomocí vysokofrekvenčního elektrického pole. Je základní typem kruhového urychlovače, princip tohoto urychlovače je schematicky znázorněn na obr.4.1 Používá se od roku 1930, kdy Ernest Orlando Lawrence postavil první funkční prototyp.



Obr. 4.1: Schematické znázornění cyklotronu. [1]

Konstrukce a princip

Konstrukce cyklotronu není tak masivní, jako u lineárních urychlovačů částic, je však obvykle složitější. Cyklotron se skládá ze tří hlavních částí a to:

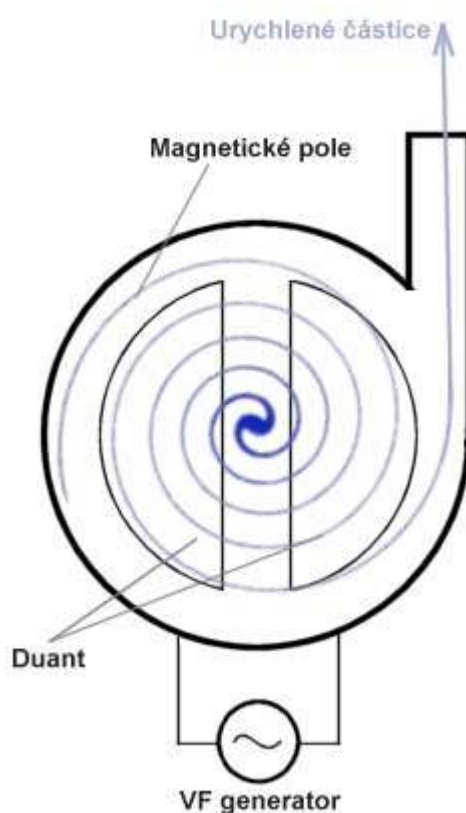
- Velmi silný elektromagnet.
- Zdroj napětí o vysoké frekvenci
- Urychlovací komora s párem dutých urychlovacích elektrod (duantů).

Mezi póly silného elektromagnetu jsou v ploché vakuové komoře upevněny dva duté kovové poloválce D_1 a D_2 , tzv. **duanty**, mezi nimiž je **urychlovací mezeře**. Duanty jsou připojeny ke zdroji střídavého napětí $U = U_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$ o frekvenci f (bývá kolem 20 MHz), takže v mezeře mezi deskami je střídavé elektrické pole. Nabité částice vstupují do středu urychlovací mezery z iontového zdroje. V důsledku působení síly, elektrického pole na částici s nábojem q a hmotností m , je částice vtažena do jednoho z duantů (který má právě opačnou polaritu) s určitou rychlostí v_1 . Uvnitř duantu, kde je elektrické pole odstíněno, působením silného magnetického pole B opíše částice půlkružnici o poloměru $R_1 = m \cdot v_1 / (q \cdot B)$ (tento poloměr je dán rovnováhou mezi odstředivou silou a Lorentzovou magnetickou silou: $m \cdot v_1^2 / R_1 = q \cdot B \cdot v_1$). Doba, za kterou projde částice tuto půlkružnici, je $T = \pi R_1 / v_1 = \pi m / (q \cdot B)$ - vidíme, že tato doba (půl-perioda) oběhu částice nezávisí na její rychlosti ani na jejím poloměru dráhy; frekvence kruhového oběhu částice tedy je $f = q \cdot B / (2\pi m)$ a je **konstantní**, protože m , q a B jsou v daném uspořádání konstanty. Jestliže jsou duanty napájeny střídavým napětím právě o této frekvenci f (je splněna podmínka **rezonance** či **synchronizace**), pak v okamžiku kdy částice opíše půlkružnici v prvním duantu a ocitne se opět v urychlovací mezeře, je polarita duantů již opačná a částice bude opět urychlena elektrickým polem, takže do druhého duantu vletí s větší rychlostí $v_2 > v_1$. V druhém duantu se bude pohybovat opět po kružnici, nyní však o poloměru $R_2 = m \cdot v_2 / (q \cdot B)$, který je větší než byl R_1 , ale se stejnou periodou a frekvencí kruhového pohybu. Stejným způsobem je pak částice při každém svém průchodu mezerou mezi duanty znovu a znovu urychlována, přičemž se pohybuje po kružnicích s rostoucím poloměrem, tedy po **spirále** (obr. 4.1). Z poslední své dráhy o maximálním poloměru (blízkém poloměru duantů) je urychlená částice elektrostaticky nebo magneticky vychýlena a **vyvedena** do prostoru **terčíku**, na nějž narazí a vyvolá tam patřičné jaderné procesy.

Nastíněný princip činnosti cyklotronu bude při konstantní frekvenci fungovat jen do té doby, kdy hmotnost urychlované částice můžeme považovat za konstantní, tj. pouze v **nerelativistické oblasti**. Chceme-li použít cyklotronu k urychlování částic na vyšší energie, kdy rychlost částic je již srovnatelná s rychlostí světla, přestává být setrvačná hmotnost částice m konstantní, ale zvyšuje se s rostoucí rychlostí: $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Ve stejném tempu se snižuje frekvence oběhu částic v konstantním

magnetickém poli: $R = m_0 \cdot v / (q \cdot B \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2})$). Aby mohla být částice dále urychlována i v této **relativistické oblasti**, je potřeba **modulovat frekvenci** urychlovacího napětí tak, aby byla stále v rezonanci s frekvencí oběhu částice; nebo zesílovat magnetické pole. Takto upravený cyklotron se "synchronizací" se nazývá **synchrocyklotron** nebo relativistický cyklotron (ve starší literatuře se vyskytuje i název "fázotron"). [1]

Synchrocyklotron funguje na počátku urychlování podobně jako klasický cyklotron. Později dochází k relativistickému vzrůstu hmotnosti urychlované částice → snižování (modulace) frekvence VF generátoru. Pracuje v pulsním režimu, přičemž kmitočet urychlovacího napětí na duantech je modulován a mění se cca 50-krát za vteřinu z hodnot cca 25 MHz na cca 12 MHz. Tento urychlovač je omezen velikostí magnetu. Jeden z největších synchrocyklotronů je v SÚJV Dubna; dodávaná energie je 680 MeV pro protony. Magnet má hmotnost 7000 tun a objem odčerpaného prostoru je 35 m³.



Obr. 4.2: Schematické znázornění pohybu částic v cyklotronu.

Kinetická energie urychlené částice může po mnoha obězích dosáhnout hodnoty až 50 MeV.

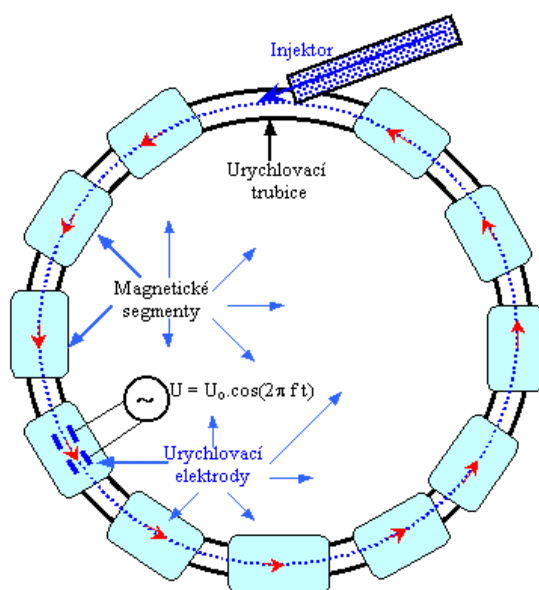
U cyklotronu je magnetické pole využíváno pouze k vedení svazku částic a nikoliv k jejich urychlování. Pole je orientováno kolmo na dráhu částic (ve schématu kolmo na rovinu kresby). Způsobuje zakřivování dráhy do kruhu. Při rostoucí rychlosti částic se poloměr tohoto kruhu zvětšuje, takže částice se pohybují po přibližně spirálové dráze. Doba průchodu jednotlivými smyčkami spirály je ale konstantní (rychlejší částice se pohybují po kruhu o větším poloměru). Ve zkratce by se princip zařízení dal popsat: „*Opakovaným průchodem svazku částic urychlovacím zařízením.*“

4.2. Synchrotron

Synchrotron je konkrétní druh kruhového urychlovače částic, ve kterém je magnetické pole a elektrické pole určitým způsobem zesynchronizováno s "prolétajícími" částicemi. Byl původně vyvinut Luisem Walterem Alvarezem pro studium vysokoenergetické jaderné fyziky. Jeden z nejvýkonnějších je například Large Hadron Collider.

Charakteristika

Synchrotron je zařízení přibližně kruhového tvaru, ve kterém je především uzavřená vakuová trubice, v níž se s obrovskou rychlostí pohybují elektrony. Udržovány uprostřed trubice jsou pomocí magnetů, které současně zajišťují jejich pohyb. Pokud dojde ke změně směru pohybu elektronů, vzniká vysoce intenzivní elektromagnetické záření s velkým rozsahem vlnových délek, mimo jiného i viditelné světlo. Světlo má i další unikátní vlastnosti. Může mít přesnou vlnovou délku v širokém rozmezí a požadovanou polarizaci. Toto světlo lze přijmout v podobě krátkých impulsů (záblesků) s přesným časováním a to formou tenkého mikrosvazku.



Obr. 4.3: Schematické znázornění synchrotronu.

Pro urychlování částic na velmi vysoké energie vychází v kruhovém urychlovači velký poloměr jejich orbit, takže cyklotronový způsob se spirálovým pohybem částic v ploché vakuové komoře již není prakticky použitelný. Aby dokonale vakuový prostor nebyl enormně velký, stejně jako elektromagnety, je nutno použít kruhové urychlovače s pevnou kruhovou dráhou. Aby se nabitá částice urychlovala a udržela se na pevné kruhové dráze o poloměru R , je potřeba aby s rostoucí rychlostí $v(t)$ urychlovaných částic se s časem synchronně zvyšovala jak frekvence $f(t)$ urychlovacího napětí, tak intenzita magnetického pole $B(t)$, která již nemůže být konstantní, ale je rovněž funkcí času. Takto synchronně pracující urychlovač s pevnou kruhovou dráhou se nazývá synchrotron (ve starší literatuře se vyskytoval i název "synchrofázotron", "bevatron", "kosmotron").

Schematické znázornění jeho principu je na obr. 4.3. Částice jsou urychlovány ve vakuové trubici o průměru cca 3-8 cm (většinou eliptického průřezu), stočené do kruhu o průměru stovek metrů až několika kilometrů (!). Trubice je obklopená velkým množstvím segmentů elektromagnetu (i více než 1000 segmentů), který budí magnetické pole udržující částice na kruhové orbitě. Synchrotron urychluje již předběžně urychlené částice, které se do urychlovací komory vstříkují z vhodného injektoru, kterým bývá nejčastěji lineární urychlovač s energií cca 20-100 MeV. U velkých přístrojů může být předurychlení i víceúrovňové - nejdříve lineární urychlovač, pak menší synchrotron, který injektuje částice do hlavního urychlovače (synchrotronu). Spolu s magnety jsou ve vhodných místech kruhové dráhy umístěny urychlovací elektrody napájené střídavým vysokým napětím, jehož frekvence f je synchronně modulována tak, aby částice mezi elektrody přišla v době, kdy polarita zajistí vždy další a další urychlení částice. Současně s frekvencí je zvyšována i intenzita B (z historických důvodů nazývaná magnetickou indukcí) magnetického pole.

Synchrotron pracuje v pulsním režimu, kdy protony vstupující v pravidelných dávkách z injektoru do urychlovací trubice při energiích řádově 100 MeV, vykonají během urychlovacího cyklu, trvajících cca 3-5 sekund, několik milionů oběhů, přičemž se urychlí na řádově 100 GeV až na několik jednotek TeV; magnetické pole v průběhu urychlovacího cyklu vzroste z hodnoty desetin Tesla na několik jednotek T. Urychlovací cyklus se periodicky opakuje cca 5 až 10-krát za minutu.

Po skončení urychlovacího cyklu dopadají částice buď na vnitřní terčik, nebo jsou vyvedeny elektromagnetickým polem na vnější terčik, popř. jsou vedeny do akumulárního prstence pro realizaci interakcí částic ve vstřícných svazcích. Při nárazu svazku např. protonů na terčik vzniká množství částic nejrůznějších druhů, z nichž můžeme soustavou elektrických a magnetických polí "odseparovat" částice požadovaného druhu, fokusací je zformovat ve svazek a zamířit je na další terčik. Získáváme tak sekundární svazky např. antiprotonů, pionů, mionů, kaonů, hyperonů. K separaci částic se používá proměnných elektrických a magnetických polí, k fokusaci svazků se používá magnetických čoček, většinou v kvadrupólovém uspořádání, kde se kříží dvě magnetická pole, jejichž gradienty postupně fokusují svazek ve vertikálním i horizontálním směru.

Při velkých hodnotách poloměru R , který pro dosažení vysokých energií řádově stovky GeV musí dosahovat několika kilometrů, je potřeba, aby průřez urychlovací trubice byl co nejmenší - aby bylo možno dosáhnout potřebného vysokého vakua ($<10^6$ mmHg) a aby náklady na výrobu elektromagnetů, jakož i nároky na jejich elektrický příkon, nebyly enormně vysoké. Částice po vstřiku do urychlovací trubice konají radiální a vertikální kmity kolem své základní kruhové dráhy. Kromě toho mají částice ve svazku tendenci rozbíhat se do všech stran, neboť jsou souhlasně nabitě a proto se odpuzují. Nemá-li dojít k dopadu částic na stěny trubice, je třeba udržet urychlované částice na jejich orbitě s vysokou přesností, takže je třeba udržet amplitudu radiálních a vertikálních kmitů co nejnížší, stejně jako rozptyl částic. Jinými slovy, je potřeba provádět silnou fokusaci, při níž se shluk vstříknutých částic během urychlování koncentruje a formuje do intenzivního úzkého svazku prudce letících částic. Tato silná magnetická fokusace je realizována tak, že elektromagnet synchrotronu je sestaven z velkého počtu vhodně tvarovaných segmentů, které mají střídavě kladný a záporný gradient intenzity magnetického pole. Tyto gradienty magnetického pole působí v radiálním a vertikálním směru střídavě jako spojné a rozptylné magnetické čočky, které v konečném důsledku vedou k dvojité fokusaci svazku v obou směrech.

Velké synchrotrony jsou velmi nákladná unikátní zařízení, budovaná ve velkých světových centrech výzkumu v oblasti jaderné fyziky a elementárních částic, většinou v široké mezinárodní spolupráci (náklady na vybudování dosahují několika miliard dolarů). Na vlastní urychlovač navazují velmi komplikované a precizní detekční

aparatury a systémy, které analyzují sekundární částice a záření, vzniklé při ultrarelativistických interakcích vysokoenergetických primárních částic s materiálem terčíku či vzájemně ve vstřícných svazcích. Analýzou druhu, náboje a hmotnosti těchto částic, jejich energií, hybností a úhlů emise z místa interakce, lze rekonstruovat řadu parametrů interakcí, k nimž dochází. Z toho lze usuzovat na strukturu elementárních částic, vlastnosti působících polí a interakcí, na existenci nových dosud neznámých kvant a částic.

[1]



Obr. 4.4: Synchrotrony jsou nyní většinou užívané pro produkování vysokoenergetických rentgenových paprsků; zde je synchrotronová kruhová dráha. [3]



Obr. 4.5: Moderní průmyslové synchrotrony mohou být velmi rozměrné (na obrázku Soleil blízko Paříže). [3]

Využití

Mají své využití v různých vědních oborech, například ve vědách o živé přírodě, vědách o materiálech, při výzkumu životního prostředí i pro společenské vědy. Uplatnění mají také v průmyslu (mikroelektronice, nanotechnologiích, mikrostrojírenství, spektroskopii a ve farmaceutickém průmyslu apod.)

Tabulka 4.1 – přehled největších synchrotronových urychlovačů. [16]

Protonové:

Urychlovač	Laboratoř	Energie
TEVATRON	FERMILAB (USA)	1000 GeV
HERA	DESY (Hamburg)	820 GeV
SPS	CERN (Švýcarsko)	450 GeV
LHC	CERN (Švýcarsko)	7 000 GeV

Elektronové:

Urychlovač	Laboratoř	Energie
SLC	SLAC (USA)	50 GeV
HERA	DESY (Hamburg)	82 GeV
LEP	CERN (Švýcarsko)	92 GeV

Tevatron

Obr. 4.6: Letecký záběr Tevatronu ve Fermilabu (prsteneč urychlovače má průměr 6,3 kilometru). [4]

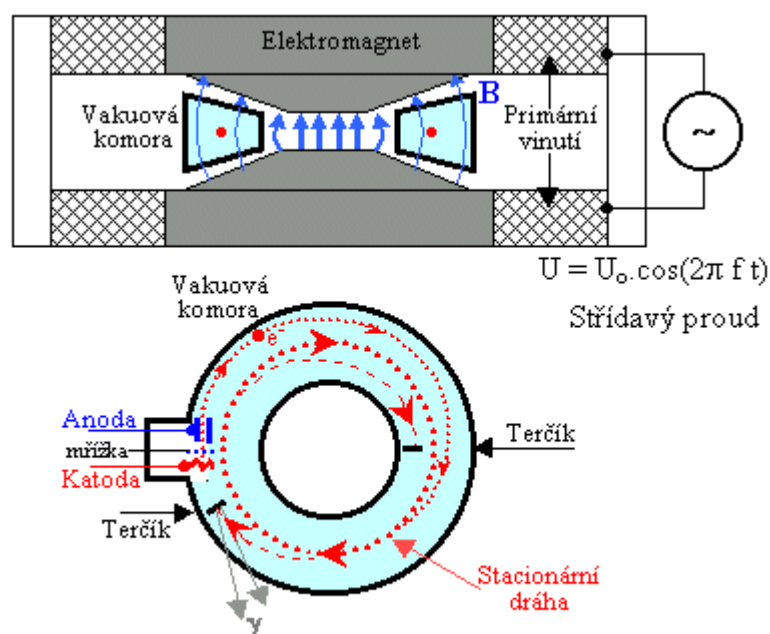
Tevatron je v současnosti nejvýkonnější americký urychlovač částic, který funguje už od roku 1983. V celosvětovém měřítku je dnes druhý po evropském urychlovači LHC v CERNu. Tevatron je součástí vládní laboratoře Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) ve státě Illinois. Obvod kruhového tunelu, v němž je urychlovač umístěn, je 6,3 kilometru. Jeho název odkazuje na fakt, že urychluje protony a antiprotony na energie až 1 TeV (bilion elektronvoltů). V roce 2007 na něm byla naměřena hmota top kvarku s přesností 1%. [5]

Bevatron

Bevatron byl synchrotron v kalifornské vládní laboratoři Lawrence Berkeley National Laboratory. Jeho název odkazuje na fakt, že dokázal urychlovat protony na energie až 1 miliarda elektronvoltů (1 GeV, dříve označován BeV od anglického *billion*). Při vysokoenergetických srážkách urychlených protonů s pevným terčem byl na tomto urychlovači v roce 1955 objeven antiproton, za což byla udělena Nobelova cena za fyziku pro rok 1959. Urychlovač pracoval v letech 1954 až 1993. Jeho budova je v současné době v demolici. [6]

4.3. Betatron

Kruhový indukční urychlovač elektronů se nazývá **betatron** (vyrábí totiž "umělé záření β^- ", což jsou rychlé elektrony). Princip betatronu je schematicky znázorněn na obr. 4.7.



Obr. 4.7: Schematické znázornění betatronu. [1]

Urychlovací trubice betatronu má tvar prstence (toroidu) zhotoveného z elektricky nevodivého materiálu (sklo, porcelán) s vysokým vakuem uvnitř. Trubice je umístěna („navléknuta“) mezi pólovými nástavci elektromagnetu, napájeného **střídavým proudem**. Elektrony jsou ve vhodném okamžiku (vhodné fázi periody střídavého proudu) vstřikovány do urychlovací trubice **elektronovou tryškou**, tvořenou žhavenou **katodou**, mřížkou a urychlující a fokusující anodou – je to podobné „elektronové dělo“ jako je u obrazovky. Časově proměnné magnetické pole **indukuje** v trubici **vířivé elektrické pole**, jehož **elektromotorická síla**, směřující podél kruhové dráhy, tyto elektrony **urychluje**.

Z elektronického hlediska je betatron vlastně „transformátorem“, jehož primární vinutí je napájeno střídavým proudem a jehož „sekundárním vinutím“ (o jednom

„závitu“) je urychlovací trubice, v níž se ve vakuu (místo v drátech vinutí) pohybují elektrony urychlované indukovanou elektromotorickou silou. Na kruhové dráze jsou elektrony udržovány magnetickým polem. K urychlování elektronů dochází jen v **první čtvrtině** sinusového průběhu střídavého napětí v elektromagnetu. Ve vhodném okamžiku vzestupné části sinusovky jsou injektovány elektrony, které jsou urychlovány, magnetické pole narůstá, elektrony se po spirále stáčíjí dovnitř a po určitou dobu obíhají po stacionární dráze, na níž jsou neustále urychlovány. Po dosažení vrcholu čtvrt periody slábne vířivé elektrické pole, obrací svůj směr a elektrony by posléze byly naopak brzděny. Zároveň však dochází k zeslabení magnetického pole a elektrony se začnou pohybovat po spirále k zevnímu okraji trubice, kde narazí na terčík nebo jsou vyvedeny k zevnímu použití. Některé typy betatronů mají radiální gradient magnetického pole a urychlovací fázi nastaveny tak, že pohyb elektronů na konci urychlovacího cyklu probíhá po spirále směrem dovnitř a terčík je umístěn při vnitřním okraji urychlovací trubice.

Elektro-mechanický rozbor trajektorie elektronu při urychlování indukovaným elektrickým polem E po kruhové dráze poloměru R (při němž se kombinuje Faradayův zákon elektromagnetické indukce $u = -d\Phi/dt = 2\pi R \cdot c \cdot E$ s urychlující elektrickou silou podél kruhové dráhy $q \cdot E$, kolmou Lorentzovou magnetickou silou $q \cdot [v \times B] = q \cdot v \cdot B$ a odstředivou silou $m \cdot v^2/R$) vede k podmínce rovnovážného urychlování elektronu na dráze poloměru R : $2\pi R^2 \cdot B = \Phi$, neboli magnetický tok Φ plochou πR^2 dráhy elektronu se musí rovnat dvojnásobku toku, který by dráhou protékal, kdyby na celé ploše bylo homogenní magnetické pole s intenzitou B . Tato „betatronová podmínka“ je zajištěna vhodným tvarováním pólových nástavců elektromagnetu.

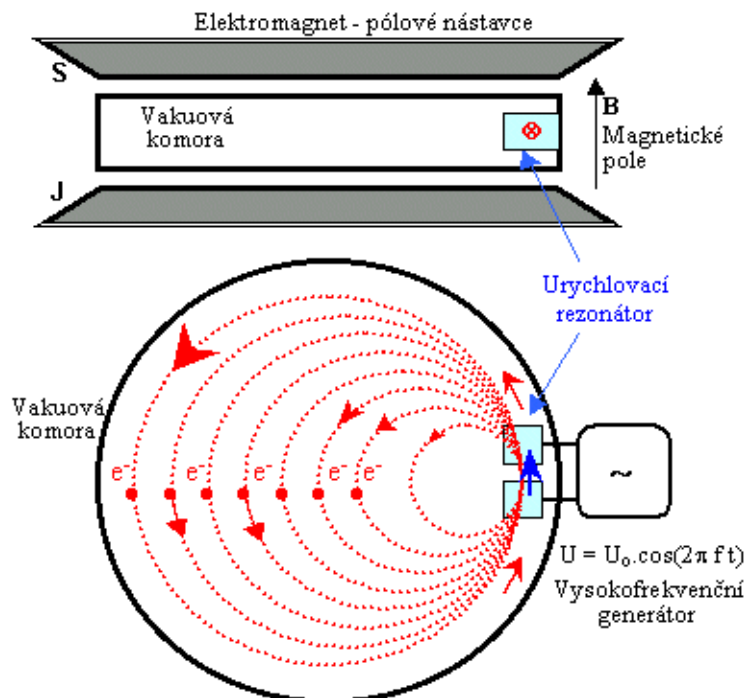
Elektromagnet menších betatronů bývá často napájen střídavým proudem z normální elektrické sítě 220 V s frekvencí 50 Hz, *příkon* činí jednotky až desítky kW. Poloměr kruhové dráhy bývá desítky centimetrů. Během urychlovacího cyklu, který trvá cca 5 milisekund, vykonají elektrony cca 2 miliony oběhů, přičemž se indukovanou elektromotorickou silou urychlí na cca desítky MeV. Pak dopadají buď na **vnitřní terčík** (přičemž budí brzdné záření gama), nebo jsou ve svazku vyvedeny ven – slouží pak k elektronovému ozařování, např. pro technické či lékařské účely. Stejně využití má i tvrdé **brzdné záření gama**.

Betatrony se používají pro energie elektronů do cca 300 MeV. Při velkých energiích je však potřeba (podobně jako u cyklotronu) provádět **synchronizaci** vzhledem k růstu hmotnosti elektronů s jejich energií. Spojením principu betatronu a synchrotronu vzniká **betasynchrotron**, který urychluje elektrony na kruhové orbitě uvnitř vakuovaného prstence nejprve na betatronovém principu pomocí elektromagnetů napájených střídavým proudem, načež takto předurychlené elektrony jsou dále urychlovány mezi elektrodami, na něž se zapojí vysokofrekvenční urychlovací napětí se synchronizovanou frekvencí, přičemž odpovídajícím způsobem vzrůstá magnetické pole.

Menší betatrony se v 60. až 80. letech hojně používaly v **radioterapii**, hlavně jako zdroj tvrdého brzděného záření gama o energiích do cca 40MeV. V posledních letech byly však prakticky vytlačeny lineárními urychlovači elektronů, které mají výhodu menších rozměrů, vyšší intenzity toku elektronů a snadnější možnosti modulace svazku.

[1]

4.4. Mikrotron



Obr. 4.8: Schematické znázornění mikrotronu. [1]

Speciálním typem kruhového urychlovače elektronů je **mikrotron**, označovaný též někdy jako "**elektronový cyklotron**". Jeho činnost je schematicky znázorněna v pravé části obr. 4.8. V magnetickém poli mezi pólovými nástavci silného elektromagnetu je umístěna **plochá válcová komora** s vysokým vakuem, podobně jako u cyklotronu, avšak místo duantů je u okraje komory namontován elektrický urychlovací systém - **duťový rezonátor**, napájený vysokofrekvenčním napětím z magnetronového či klystronového generátoru (frekvence f činí několik GHz). Elektrony prolétají mnohokrát tímto rezonátorem, kam jsou po kruhové dráze vraceny magnetickým polem, přičemž při každém průletu jsou urychlovány na vyšší a vyšší energii. Vzhledem ke zvýšené kinetické energii je poloměr dráhy elektronu po každém průletu rezonátorem vždy větší a větší. Aby elektron přišel mezi elektrody rezonátoru ve správné fázi periody vysokofrekvenčního napětí a mohl být znovu urychlen, je třeba splnit frekvenční podmínku **rezonance** $2\pi f = k \cdot e \cdot B / (m_0 \cdot c)$, podle níž kruhová

frekvence urychlovacího napětí musí být celočíselným k -násobkem uvedeného podílu, kde e je náboj elektronu, B magnetická indukce, m_0 klidová hmotnost elektronu.

Elektrony pro urychlování se vstříkují elektronovým dělem, popř. se získávají emisí ze stěn rezonátoru. Mikrotrony se občas používají pro urychlování elektronů na energie několika jednotek MeV, jejich předností je dosažení **vysokých intenzit** toku urychlených elektronů ve svazku. Z jednotlivých drah lze vyextrahovat monoenergetické svazky elektronů, z menších drah nižší energie, z největší dráhy při okraji urychlovací komory pak elektrony o maximální energii.

[1]

5. Elektrické napájení urychlovačů

Svou vysokou kinetickou energii získávají částice v urychlovačích působením elektromagnetických polí, tj. přeměnou části elektrické energie, kterou musí být urychlovače napájeny. Tak složité přístroje, jakými obecně urychlovače jsou, musejí být opatřeny složitou elektronickou aparaturou, obsahující několik typů a zdrojů elektrického napájení:

Napájení urychlovacích elektrod

Napájení urychlovacích elektrod je tím základním elektrickým napájením, dodávajícím vlastní elektrickou energii pro urychlování nabitých částic. U rentgenek a elektrostatických lineárních urychlovačů se jedná o **vysoké stejnosměrné napětí** - desítky kilovoltů, až několik megavoltů. U vysokofrekvenčních lineárních urychlovačů a kruhových urychlovačů jsou urychlovací elektrody napájeny **vysokofrekvenčním střídavým napětím** o frekvenci řádově MHz až několika GHz (vysokofrekvenční generátory jsou stručně popsány níže).

Napájení iontového zdroje

Vlastní částice k urychlení jsou v iontovém zdroji získávány rovněž elektricky. Nejjednodušší je to u elektronů, získávaných termoemisí ze žhavicí katody, která je napájena **žhavicím proudem** ze žhavicího transformátoru (220 V se transformuje na 6-24 V, žhavicí proud cca 2 A - 20 A). Protony a těžší ionty se získávají v **elektrickém výboji**, napájeném stejnosměrným napětím řádově stovky až několik tisíc voltů.

Napájení cívek elektromagnetů

Pro tvarování dráhy urychlených nabitých částic se používají silné elektromagnety. U starších a menších přístrojů se jedná o klasické elektromagnety tvořené cívkami napájenými elektrickým proudem mnoha desítek až několika tisíc ampér. Je to energeticky náročné, vzniká teplo, elektromagnety se musejí chladit. U novějších velkých urychlovačů se v elektromagnetech používají často **supravodivé cívky**, v nichž uzavřeném vinutí se elektrický proud vybudí a pak se samovolně trvale

udržuje, bez produkce tepla. Pro supravodivost je však vinutí nutno trvale udržovat na nízké teplotě cca 3 K pomocí kapalného hélia.

Napájení vakuového a chladicího systému

Pro zajištění **vysokého vakua** v urychlovacích trubicích se používá výkonných vývěv. K udržení vysokého vakua může přispět i chlazení trubice (spolu se supravodivými elektromagnety) na nízké teploty, při nichž případné zbytky vzduchu vymrzají na stěnách trubice. V řadě elektricky napájených součástí se značná část elektrické energie mění v **teplo**, které je potřeba odvádět pomocí vzduchotechniky či jiných **chladicích systémů**. U supravodivých elektromagnetů se sice teplo přímo nevyvíjí, avšak chladicí hélium je třeba recyklovat ve zkapalňovacích přístrojích. Všechno toto technické "zázemí" urychlovače obsahuje řadu elektromotorů, které jsou napájeny buď přímo ze střídavé sítě (220 V), nebo jsou řízeny elektronicky.

Napájení řídicí a regulační elektroniky

Činnost urychlovačů je zcela podmíněna **přesnou časovou a intenzitní souhrou** mezi elektrickými a magnetickými poli v různých částech urychlovacího systému. Toto musejí zajišťovat složité elektronické obvody, řízené v současné době digitální počítačovou technikou.

Vysokofrekvenční generátory elektrického napětí

Urychlovací elektrody některých typů urychlovačů (např. lineární vysokofrekvenční urychlovače, mikrotron apod.) jsou napájeny střídavým **vysokofrekvenčním napětím** či vlněním v elektromagnetickém vlněním. To vzniká ve vysokofrekvenčních generátorech, které jsou osazeny speciálními prvky - *magnetrony a klystrony*, které mohou pracovat jako **vysokofrekvenční oscilátory** o velmi vysokých frekvencích řádově GHz.

Magnetron

Magnetron je válcová **dioda**, jejímž středem vede žhavená katoda, kolem níž je koaxiální anoda. Mezi katodu a anodu je přivedeno elektrické napětí. Dioda je kromě

toho vložena do longitudinálního **magnetického pole**, jehož směr je rovnoběžný s katodou. Na elektrony emitované z katody tak působí kombinované **zkřížené pole** - radiální elektrické pole mezi katodou a anodou a podélné magnetické pole vnějšího magnetu. Elektrony emitované katodou jsou přitahovány k válcové anodě, avšak Lorentzovou magnetickou silou se dráhy elektronů **zakřivují** tak, že při určité hodnotě anodového napětí a intenzitě magnetického pole již elektrony nedopadají přímo na anodu, ale vytvoří **oblak** kroužící v prostoru mezi katodou a anodou. Anoda magnetronu není jednoduchý válec, ale je tvořena kovovým blokem obsahujícím několik (většinou 8) obvodových **dutinových rezonátorů**. Elektrony během svého kruhového pohybu při průletu kolem rezonančních dutin odevzdávají část své energie a vzbuzují **elektromagnetické oscilace** v dutinách. Nejúčinnější předávání energie elektromagnetickému poli v rezonátorech nastává při takové rychlosti pohybu elektronu, kdy se během jeho přechodu od jedné obvodové štěrbině k druhé změni polarita pole ve štěrbině na opačnou; pak je elektron u každé štěrbině brzděn a odevzdává energii poli v rezonátoru. Tato **synchronizace** (nazývaná π -mód) se dosahuje vhodnou volbou anodového napětí. Celkově je pohyb elektronů značně složitý. Kmitající elektromagnetické pole hustotně moduluje rotující elektronový oblak - dochází ke **shlukování elektronů** do ohnutých paprsků tvaru "kola s loukotěmi (počet loukotí je poloviční než počet obvodových rezonátorů anody), které se otáčejí kolem osy. Lze říci, že celý systém magnetronu je uveden do stavu **intenzivních vysokofrekvenčních oscilací** (jejichž frekvence je dána mechanickými rozměry rezonátorů), při nichž je elektrická energie protékajícího anodového proudu s **vysokou účinností** přeměňována na energii kmitajícího pole. Vzniklý vysokofrekvenční signál pak vlnovody vychází k vnějšímu použití. [1]

Klystron

Klystron je rovněž vakuová trubice, v níž elektrony emitované žhavenou katodou jsou urychlovány a fokusovány do úzkého svazku **dutou anodou** připojenou na kladné napětí. V tzv. **reflexním klystronu** *) po průchodu elektronů anodou jsou tyto elektrony navraceny zpět k anodě zápornou **reflexní elektrodou**. Rychlost elektronů uvnitř klystronu je **modulována** jejich interakcí s **dutinovým rezonátorem**,

v němž prolétající elektrony vzbuzují elektromagnetické oscilace. Každý elektron projde rezonátorem dvakrát. V přímém směru je rychlostně modulován, poblíž reflexní elektrody dochází ke **shlukování elektronů**, načež tyto shluky elektronů se zastaví a v opačně orientovaném poli se urychleně pohybují zpět k anodě a rezonátoru, do něhož tyto shluky elektronů vstupují a rezonátor budí. Při správné volbě napětí vzhledem ke geometrickým rozměrům vstupují shluky elektronů do rezonátoru vždy v okamžiku, kdy v pole má maximální hodnotu opačné polarity a odevzdávají mu energii - je dosaženo **rezonance** a oscilace se trvale udržují. Z dutinového rezonátoru je elektromagnetický vlnový signál odváděn vlnovodem.

*) Ojedinele se můžeme setkat i s tzv. **dvouokruhovým klystronem**, kde elektrony z katody na své cestě k anodě procházejí nejprve jedním rezonátorem, který je rychlostně moduluje, načež vzniklé shluky procházejí druhým dutinovým rezonátorem, v němž v případě dosažení rezonance vzbuzují oscilace. Napájíme-li první (vstupní) rezonátor vnějším vlnovým signálem, pak oscilace vzbuzené v druhém (výstupním) rezonátoru mají větší energii než energie přiváděná do vstupního rezonátoru. Tento druh klystronu slouží jako **zesilovač** vlnového výkonu. Zavedením **zpětné vazby** (spojením dutin obou rezonátorů dvouokruhového klystronu) je možno sestavit **generátor** samobuzených kmitů o vysokém výkonu, podobně jako u klystronu reflexního.

Magnetrony a klystrony mají široké použití ve **vysokofrekvenční technice** – v UHF televizním vysílání, satelitním spojení, radarové technice, mikrovlnném ohřevu (např. v mikrovlnných troubách jsou mikrovlny buzeny magnetrony), v urychlovačích částic. Pracují často v **pulzním režimu**, přičemž dosahují úctyhodných výkonů až stovky megawattů!

[1]

6. Výzkumné laboratoře

Laboratoří, které zkoumají fyziku částic pomocí urychlovačů, je po světě více. V této kapitole si jich pár představíme.

6.1. CERN

Evropská organizace pro jaderný výzkum

Evropská organizace pro jaderný výzkum je mezinárodní organizace se sídlem v Ženevě. Je známa též pod zkratkou CERN (z franc. *Conseil Européen pour la recherche nucléaire*).

Byla zřízena roku 1954. Cílem organizace je spolupráce evropských států v oblasti čistě vědeckého a základního výzkumu, jakož i výzkumu s ním do značné míry souvisejícího. Organizace se nezabývá činností pro vojenské účely, výsledky jejích experimentálních a teoretických prací se zveřejňují nebo jinak zpřístupňují veřejnosti. ČR se účastní její činnosti od roku 1993.



Členské státy

Legenda: ■ Zakládající státy

■ Státy, které se přidaly později

Zakládajícími členy byly Belgie, Dánsko, Francie, Itálie, Jugoslávie (do 1961), Německo, Nizozemsko, Norsko, Řecko, Spojené království, Švédsko a Švýcarsko.

Následovaly další státy: Rakousko (1959), Španělsko (1961-1968 a od 1983), Portugalsko (1986), Finsko (1991), Polsko (1991), Maďarsko (1992), Česko (1993), Slovensko (1993) a Bulharsko (1999).

EU má status pozorovatele.

Obr. 6.1: Členské státy CERN [15]

Charakteristika

Evropská laboratoř pro fyziku částic je nejrozsáhlejší výzkumné centrum částicové fyziky na světě. Byla založena v roce 1954 a od té doby se tato laboratoř, která byla prvním takovým evropským společným dílem, stala zářným příkladem úspěšné mezinárodní spolupráce. Z původních 12 signatářů dohody o založení CERN vzrostl počet členských zemí na 20. Laboratoř leží na francouzsko-švýcarské hranici západně od Ženevy na úpatí pohoří Jura. Se zdejšími zařízeními pracuje okolo 6500 vědců, což je polovina všech částicových fyziků na světě. Vědci reprezentují 500 univerzit či jiných odborných pracovišť a více než 80 národností.

Zabývá se čistou vědou a hledá odpovědi na nejpřirozenější otázky:

- Co je to hmota?
- Jak hmota vznikla?
- Jak jsou utvářeny složité hmotné objekty jako hvězdy, planety nebo lidská tvorové?

Tím, že laboratoř zkoumá složení hmoty, hraje i důležitou roli v rozvoji technologie budoucnosti. Měření prováděná zdejšími vědci jsou důležitým testovacím polem i pro průmysl, neboť právě částicová fyzika vyžaduje vysokou přesnost provedení všech přístrojů. Díky prvotřídní technické vybavenosti hraje laboratoř důležitou úlohu i ve zlepšování technické vzdělanosti. Současný rozsah programu odborné přípravy a kvalifikované vedení láká do laboratoře mnoho talentovaných mladých vědců a inženýrů. Většina z nich najde uplatnění v průmyslu, kde jsou vysoce ceněny jejich zkušenosti s prací v mnohonárodním prostředí.

Poslání

V současnosti stojí na samém čele lidského hledání, které je staré jako sám člověk. Úkolem laboratoře je porozumět tomu, z jakých součástí je hmota složena a jak tyto součásti spolu interagují. Jeho zařízení, urychlovače a detektory částic, patří mezi největší a nejsložitější vědecká zařízení na světě. V laboratoři se nachází jedno z nich.

Jedná se o částicový detektor nazývaný L3, protože byl třetím detektorem navrženým pro urychlovač LEP (Large Electron-Positron Collider, česky asi Velký srážecí elektronů a pozitronů). L3 je jeden ze čtyř detektorů na obvodu sedmadvacetikilometrového kruhu LEP. Každý z nich je velký jako třípatrový dům a je vybaven komplikovanou elektronikou. LEP a jeho detektory jsou postaveny uvnitř tunelu, který se nachází 50 až 150 m pod zemí.

Jejím úkolem je poskytovat svazky částic s vysokou energií fyzikům, kteří je používají při svých experimentech. Laboratoř vděčí za své výsadní postavení tomu, že využívá největší soustavu propojených urychlovačů na světě. Tyto urychlovače pracují s různými druhy částic potřebných pro všechny typy experimentů. V LEP jsou urychlovány elektrony a pozitrony, které se navzájem srážejí. Na jiném místě částice s vysokou energií nazývané miony otevírají protony a neutrony jako lovec perel perlorodku, když se chce podívat dovnitř. Komplex urychlovačů CERN dokáže dokonce urychlovat i jádra atomů olova, která se pak rozbíjejí na nepohyblivých terčích. Z vlastního centra srážky, v němž po kratičký okamžik panují poměry blízké stavu vesmíru těsně po velkém třesku, se vynoří stovky částic. Výzkumníci zde studují velké počty takových pozoruhodných událostí a snaží se porozumět tomu, jak se za 13 miliard let po velkém třesku vesmír stal takovým, jak jej vidíme dnes kolem sebe.

Částicová fyzika studuje věci, které jsou neuvěřitelně malé. Do šířky vlasu se vejde přibližně milion atomů, ale i něco tak malého jako atom je obrovské ve srovnání s částicemi, které se urychlují a studují zde. Kdybychom si představili atom zvětšený do velikosti fotbalového stadionu, jeho jádro by mělo velikost malého míčku či kuličky. Atomy jsou tedy z 99,99% prázdné. CERN se zabývá částicemi, které vyplňují zbývajících 0,01%. K poznávání tak malých věcí jsou potřeba extrémně silné „mikroskopy“. Těmi jsou pro tuto oblast fyziky urychlovače a detektory částic, jako ty používané zde.

Urychlovače částic

V CERNu jsou umístěny oba typy urychlovače částic, lineární a kruhový.



Obr. 6.2: Lineární urychlovač v CERNu. [16]

Částice se buď vzájemně srážejí (vstřícné svazky, např. jako v LEP) nebo narážejí na nepohyblivé terče vně urychlovače. Přitom vznikají nové částice. Tak se hmota mění v energii a obráceně podle Einsteinovy známé rovnice $E = m \cdot c^2$. E označuje energii, m hmotnost a c je rychlost světla. $E = m \cdot c^2$ nám říká, že 1 gram hmoty obsahuje úžasných $20 \cdot 10^{12}$ kalorií (tj. 20 miliard kilojoulů). Částice studované v CERN jsou ovšem tak maličké, že energie obsažená v jedné urychlené částici v LEP je jenom asi 10^{-9} kalorie. Důležité je, že při srážkách částic je energie soustředěna ve velmi malém prostoru. Při tak vysoké koncentraci energie se produkují další částice, které můžeme studovat a jež nám poskytují nový pohled na nejniternější tajemství přírody. V tunelu LEP byl po jeho demontáži (jež se uskutečnila v letech 2000-2001) instalován nový urychlovač LHC (Large Hadron Collider, česky Velký srážecí hadronů). Do zkušebního provozu byl uveden v roce 2008 (a po několika denním provozu byl z důvodů poruchy chlazení odstaven až do půlky roku 2009). Protože při srážkách v LHC je produkováno více energie než v LEP, i detektory budou muset být větší (jeden z nich, nazývaný

ATLAS je veliký asi jako šestipatrová budova). Zdá se paradoxní, že zkoumání něčeho tak neuvěřitelně malého vyžaduje tak velké detektory. Důvodem je to, že částice s vyšší energií vznikající při srážkách mohou pronikat silnější vrstvou hmoty. Proto detektory musí být tak ohromné.



Obr.6.3: Pohled na rozmístění urychlovačového komplexu v CERNu [16]

Detektory částic

Úkolem detektorů částic, jako jsou L3 nebo Atlas, je zaznamenat, co se stalo při srážce částic. Detektory se podobají ruským panenčím matryškám - skládají se z různých do sebe vložených vrstev. Ke srážkám dochází uprostřed, každá vrstva měří různé vlastnosti nově vzniklých částic. Jedním z detektorů na urychlovači LEP je DELPHI - detekční zařízení, která získávají podrobné údaje o drahách částic v oblasti, kde vyletují z místa srážky. Pak přicházejí zařízení na měření energie, kalorimetry, ve kterých většina částic ukončí svou cestu. Červené skvrnky odpovídají energii, kterou částice přinesly a kterou zde odevzdaly. Vnější vrstva celého „cibulového uspořádání“ je tvořena pásem detektorů zaznamenávajících částice, které dokázaly proniknout až tak daleko od středu. Úkolem magnetu uvnitř detektoru je zakřivovat dráhy nabitých částic ve vnitřních vrstvách, což pomáhá při identifikaci jednotlivých druhů částic.

Význam studia částic

Všechno ve vesmíru je vytvořeno z částic, včetně nás samotných. Díky zdejší práci i jiných laboratoří ve světě zabývajících se částicovou fyzikou nyní víme, že k tomu, abychom vysvětlili složení obyčejné hmoty, potřebujeme pouhé čtyři druhy částic - stavebních kamenů. Tyto částice se nazývají kvark u, kvark d, elektron a elektronové neutrino. Země a všechno na ní, planety i Slunce a všechny hvězdy na obloze jsou podle všeho vytvořeny za stejných čtyř základních součástí. Je to jako stavebnice. Z kvarků u a d se skládají protony a neutrony, které společně vytvářejí atomová jádra. Jádra spolu s elektrony v obalech tvoří atomy, které se dále různě spojují a vytvářejí složitější objekty. Čtvrtým členem rodiny je elektronové neutrino, které interaguje s ostatní hmotou tak slabě, že je dokážeme jen stěží pozorovat.

Základní částice hmoty představují jen polovinu celého příběhu. Na to, aby držely pohromadě, je třeba něco dalšího. „Lepidlo“ má podobu sil, které jsou samy tvořeny částicemi. Částice tvořící sílu se však velmi liší od částic hmoty. Jejich hlavním úkolem je přenášet interakce od jedné částice hmoty ke druhé. Gravitace, nejznámější síla, je ze všech nejslabší. Částice, o které se domníváme, že je jejím nosičem, graviton, nebyla v roce 2009 objevena. Na opačném konci měřítko síly je silná interakce, jejímž nositelem jsou gluony, které drží pohromadě kvarky a vytvářejí tak protony a neutrony v atomovém jádře. Silná interakce má kuriózní vlastnost: Čím jsou kvarky dále od sebe, tím je působení síly mezi nimi větší. To znamená, že kvarky jsou uvězněny uvnitř protonů či neutronů. Mezi oběma krajními póly co do intenzity se nacházejí další dva typy interakcí: elektromagnetická s nosiči fotony a slabá, jejímiž nosiči jsou částice W a Z. Elektromagnetická interakce udržuje elektrony na orbitách okolo jádra a drží pohromadě atomy v chemických či biochemických molekulách. Slabá interakce pomáhá hvězdám svítit a je také příčinou jednoho z typů radioaktivity (radioaktivity beta). Tyto dvě interakce jsou nyní vysvětlovány pomocí jedné společné teorie, nazývané elektroslabá teorie. To představuje důležitý krok na cestě, která vede k jednomu z hlavních cílů současné fyziky: Najít jednotnou teorii popisující všechny síly v přírodě.

Jednou z nejpřekvapivějších věcí v moderní částicové fyzice je existence dalších dvou rodin částic hmoty. Každá z nich je podobná čtveřici kvark u, kvark d, elektron a elektronové neutrino, až na to, že jsou těžší. Přírozeným způsobem se vyskytují jedině

na exotických místech, jako jsou horká centra hvězd, ale jsou také produkovány na urychlovačích v CERN a podobných laboratořích.

Sbírkou částic v přírodě doplňuje antihmota, něco jako „zrcadlový obraz“ obyčejné hmoty. Antihmotu předpověděl v roce 1928 britský fyzik Paul Dirac. Brzo poté Američan Carl David Anderson antihmotu skutečně objevil ve srážkách vysokoenergetických částic kosmického záření. Volná antihmota dnes ve vesmíru neexistuje. Těsně po velkém třesku, kdy vesmír vznikl, hmota a antihmota existovaly v rovnováze, tedy že bylo stejně antihmoty, jako hmoty.

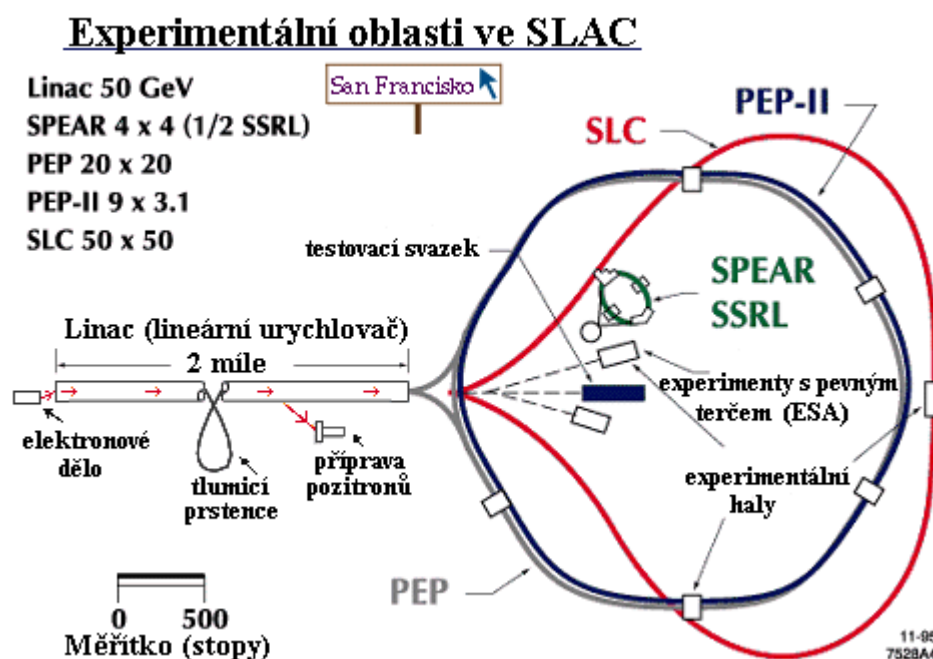
Teorie popisu částic hmoty a částic - nosičů síly se nazývá standardní model. Ačkoli už po více než 20 let úspěšně prochází všemi experimentálními testy, není standardní model úplným popisem přírody. Fyzikové v CERN přispívají svou prací k vytvoření dokonalejší představy, jak vesmír funguje.

Standardní model zanechává stále příliš mnoho nezodpovězených otázek, aby mohl být konečnou teorií částic a sil. Proč mají částice hmotnost? Jsou různé síly v přírodě jenom jiným pohledem na stejnou věc? Skutečně není ve vesmíru žádná antihmota? To standardní model neříká. Nový urychlovač LHC umožní pustit se do hledání odpovědí na tyto a podobné důležité otázky. Výstavba LHC byla započata v roce 2005 a připravovaný program svádí dohromady tisíce vědců z celého světa. Byl uveden do provozu v roce 2008. Pro udržení protonových svazků na dráze v LHC byl vyvinut nový silný supravodivý magnet. Na vývoji detektorů, které budou studovat srážky na LHC a které jsou větší a komplexnější než kdykoli předtím, se už pracuje. I týmy spolupracujících fyziků, kteří tyto detektory konstruují, jsou největší, jaké kdy částicová fyzika poznala. Na tomto projektu spolupracuje více než 4400 vědců z celého světa. Když v 50. letech CERN vznikl, vytvořil se tím standard pro evropskou spolupráci ve vědě. S LHC se CERN stává první skutečně komplexní světovou laboratoří.

[15]

6.2. SLAC

Ve Stanfordském středisku lineárního urychlovače (Stanford Linear Accelerator Center), které se rozkládá jižně od San Franciska, pracuje největší lineární urychlovač na světě. Je dlouhý přes 3 kilometry a urychluje elektrony a pozitrony, které po jeho opuštění pokračují k různým terčům či detektorům nebo do dalších urychlovacích prstenců. Prstenec PEP, který vidíme na obrázku, se přestavuje na tzv. továrnu na B (B factory), kde se bude pátrat po tajemstvích hmoty a antihmoty pomocí mezonů B. Podobný fyzikální program se chystá na urychlovači CESR na Cornellově univerzitě ve státě New York a na urychlovači KEK v Japonsku. [17]



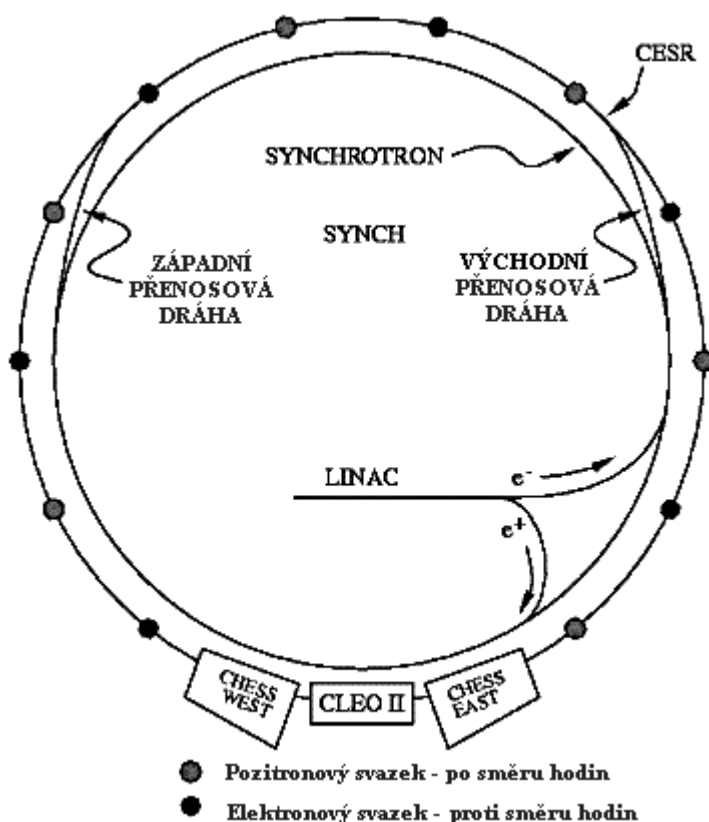
Obr.6.2: Oblast laboratoře SLAC. [17]

(1 míle = 1,609 km, 1 stopa = 0,305 m)

6.3. CESR

CESR (Cornell Electron-positron Storage Ring - Cornellský elektron-pozitronový shromažďovací prsteneč) je srážecí elektronů a pozitronů o obvodu 768 metrů, umístěný 12 metrů pod povrchem v areálu Cornellovy univerzity. Umožňuje srážet elektrony s jejich antičásticemi, pozitrony, při těžišťových energiích mezi 9 a 12 GeV. Produkty těchto srážek se studují pomocí detekční aparatury nazývané CLEO.

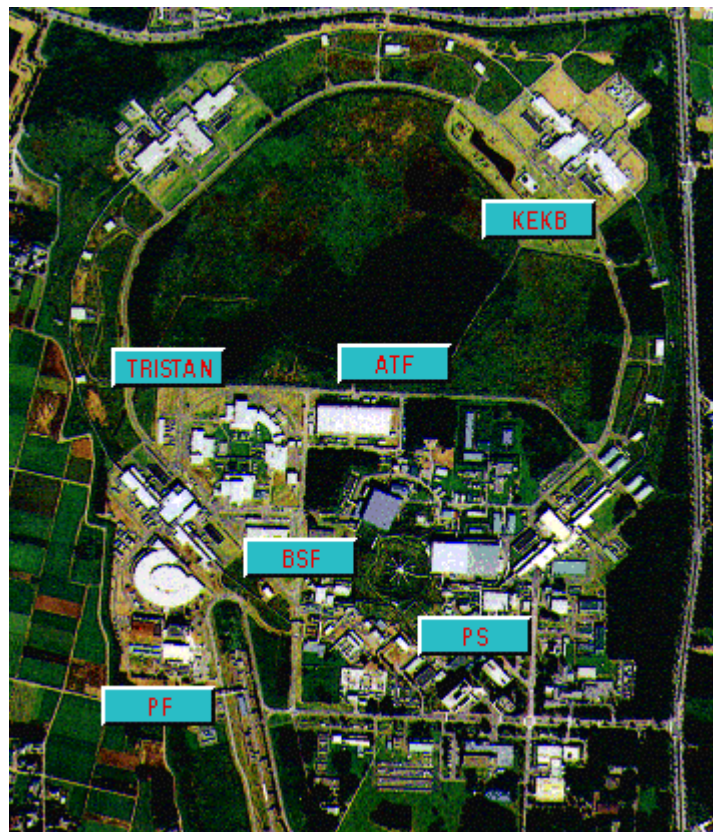
[18]



Obr. 6.3: Schéma rozložení synchrotronu a umístění detektoru CLEO. [18]

6.4. KEK

Laboratoř KEK v Japonsku byla zřízena pro podporu rozvoje experimentálních studií elementárních částic. Jako první její významné zařízení byl postaven protonový synchrotron o energii 12 GeV. Od počátku experimentální činnosti v roce 1976 sehrál protonový synchrotron významnou úlohu při rozvoji experimentálních aktivit v Japonsku a položil základy k další etapě programu KEK v oblasti vysokých energií - konstrukci urychlovače elektron-pozitronových vstřícných svazků o energii 30 GeV, který dostal jméno TRISTAN. [19]



Obr. 6.4: Umístění jednotlivých částí v laboratoři KEK [19]

7. Velké urychlovače

Pro výzkum v oblasti fyziky (elementárních) částic jsou budovány velké unikátní urychlovače se snahou dosáhnout **co nejvyšších energií** urychlených částic. Jejich úkolem je detailní zkoumání vlastností interakcí částic - upřesňování mechanismů interakcí již známých částic a **hledání částic nových**. Velké urychlovače (především synchrotrony) byly vybudovány např. ve Fermilabu u Chicaga, v Brookhavenu u New Yorku, v CERNU, v Dubně či Serpuchovu. Na každém z těchto urychlovačů byly získány nové objevné výsledky, nebo se takové výsledky očekávají. V poslední době se používají většinou interakce urychlených částic ve vstřícných svazcích (*collidery*).

[1]

Tab. 7.1: Uvedeme zde v tabulce jen heslovitě několik největších urychlovačů z posledních let: [1]

Název urychlovače	Laboratoř	Částice	Energie [GeV]	Rok
SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)	Stanford	$e^- - e^+$	50	1966
Tevatron	Fermilab	$p^+ - p^-$	980	1987
LEP (Large Electron-Positron collider)	CERN	$e^- - e^+$	100	1989
RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)	Brookhaven	$p-p, Au-Au, \dots$	200	2000
LHC (Large Hadron Collider)	CERN	$p-p, Pb-Pb, \dots$	7000	2008
VLHC (Very Large Hadron Collider) - budoucnost ??		$p-p, \dots$? >>LHC ?	? >2030 ?
CLIC (Compact Linear Collider) - budoucnost ??		$e^- - e^+$	3000	??

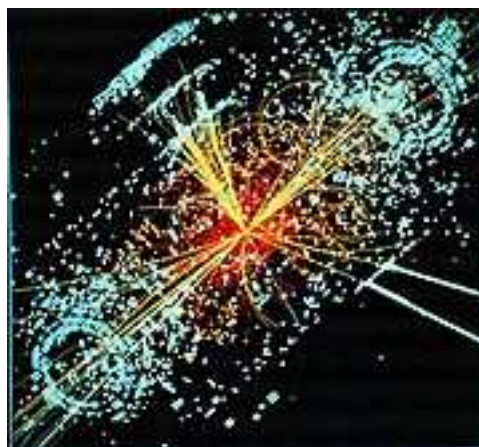
7.1. Large Hadron Collider (LHC)

Je největší urychlovač částic na světě, začal pracovat 10. Zářím 2008. Je umístěn v podzemí na území mezi pohořím Jura ve Francii a Ženevským jezerem ve Švýcarsku v ústřední evropské jaderné laboratoři **CERN** (viz 6.1) (*Centre Europeen pour Recherche Nucleaire*) **LHC - Large Hadron Collider** (velký hadronový "srážec"). Na jeho návrhu se podílelo přes 2000 vědců z 34 zemí světa a celý vyšel na 8 miliard amerických dolarů (zhruba 140 miliard Kč)

Vědci i lidé, kteří nejsou součástí komunity kolem LHC, mají obavy, že by experiment nemusel dopadnout tak, jak se předpokládá, ale mohla by vzniknout černá díra, kteří by mohli pohltit Zemi nebo dokonce celý vesmír

Prstenec urychlovače se nachází v tunelu asi 100 m pod zemí (50-150 m pod terénem), jeho obvod je dlouhý 26,66 km. Tunel byl postaven roku 1980 pro předchozí velký urychlovač Large Electron-Positron (LEP). Zajímavostí je, že tunel není umístěn vodorovně, ale má mírný sklon, protože tehdejší technologie nebyly schopny zajistit hloubení tunelů skrz některé horniny. Tunel přechází mezi hranicemi Francie a Švýcarska ve čtyřech místech, nicméně jeho většina leží ve Francii. Přestože je tunel pod zemí, na povrchu se nachází některé budovy umožňující jeho existenci (např. kompresory, ventilace, chladičí zařízení a ovládací stanice).

Kruhovou dráhu urychlovaných částic s vysokou přesností zajišťuje více než 1700 supravodivých elektromagnetů po obvodu trubice. Protony, 3stupňově předurychlené (nejdříve v lineárním urychlovači a pak ve dvou synchrotronech) na energii 450 GeV, jsou injektovány do hlavního urychlovače, kde budou během mnoha oběhů urychleny na výstupní energii 7 TeV, přičemž magnetické pole v segmentech elektromagnetů se během každého cyklu bude měnit z počáteční hodnoty 0,5 T (při 450 GeV) až na 8,3 T (při 7 TeV). Protony se urychlují ve dvou trubicích (prstencích) v **opačných směrech** pro interakce ve vstřícných svazcích. Kromě protonů bude LHC urychlovat i **těžší jádra**, především olova.

Jak funguje

Obr.. 7.1 Model střetu vstřícných svazků. [2]

Od urychlovače. Každý vyslaný paprsek bude oběma svazky částic stejného druhu, buď protony nebo mezi různými typy iontů, především čelní srážky mezi urychlovači a budou vstřikovány do LHC, kde budou cestovat skrz vakuum přirovnatelné k vakuu ve vesmíru. Supravodivé magnety pracující při extrémně nízkých teplotách budou usměrňovat svazky v trubici iontů olova. Svazky budou vytvářeny v již existujícím řetězci dosahovat okolo 3000 svazků částic a v každém z nich bude obsaženo přibližně 100 miliard částic. Částice jsou tak drobné, že pravděpodobnost vzájemné srážky je velmi malá - vychází na rázek ze simulace srážky v detektoru CMS.

LHC bude produkovat něco okolo 20 srážek na každých 200 miliard částic. Nicméně i přes to se budou částice svazku srážet 30 milionkrát za sekundu a LHC bude vytvářet 600 milionů srážek za sekundu. Při rychlosti blížící se rychlosti světla udělá proton v LHC 11 245 oběhů za sekundu. Svazek bude mít možnost obíhat dokola až 10 hodin a urazit dráhu větší než 10 miliard kilometrů – pro srovnání je to větší vzdálenost než cesta na planetu Neptun a zase zpět.

[2]

Popis zařízení

Po dosažení energie 0,45 TeV se ze soustavy urychlovačů vstříknou částice do LHC kde udělají miliony oběhů. Při každém oběhu částice dostanou další impuls od elektrického pole vytvářeném ve speciálních dutinách, dokud jim nebude udělena konečná energie 7 TeV. Svazek o vysoké energii je v LHC udržován soustavou 1800 supravodivých magnetů. Tyto magnety o nízkých teplotách mohou vést elektrický proud s nulovým odporem, proto mohou vytvořit mnohem silnější magnetické pole. Vodiče elektromagnetů jsou vyrobeny z niobitanové slitiny a pracují při teplotě 1,9 K (-271°C). Kdyby LHC používalo běžné elektromagnety namísto supravodivých, prstencem by musel mít obvod 120 km a pro dosažení stejných výsledků by spotřeboval 40x více energie.

LHC pracuje s magnetickými poli okolo 8 Tesla, přičemž běžné „teplé“ elektromagnety jsou schopné vytvořit magnetické pole okolo 2 Tesla.

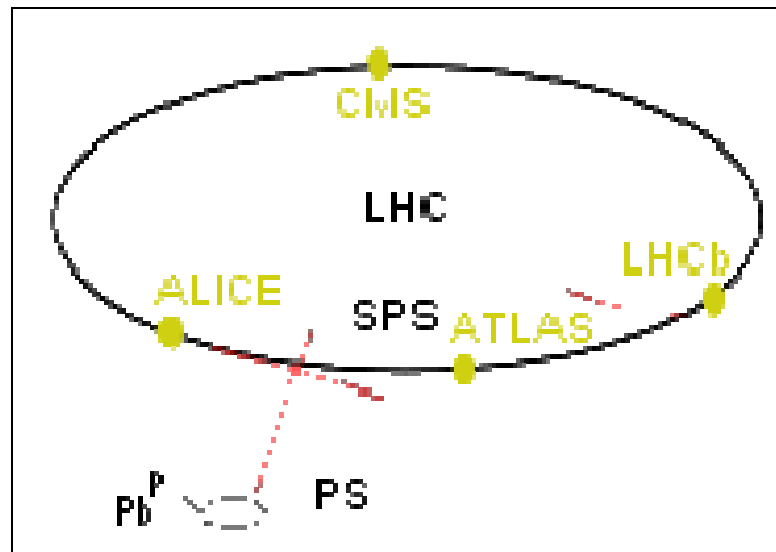
CERN v současné době pracuje na vývoji technologie počítačových sítí zvané GRID. To má spojovat desítky a později stovky PC pro vytvoření prostředku pro zpracování dat zaznamenaných na detektorech LHC. Experimenty LHC budou produkovat enormní množství dat. Každý rok to bude dostatek informací na naplnění kapacity takového počtu CD, že by se z nich dal postavit 20 km vysoký sloup (cca 15 Petabajtů = 15 milionů GB).

[2]

Simulace LHC před spuštěním

Během stavby LHC se usilovně hledalo takové nastavení celého zařízení, které by umožnilo dlouhodobý oběh částic bez nárazu do stěny urychlovače. Takovýto náraz by měl za následky dlouhodobou odstávku celého urychlovače. K simulacím byla využita celosvětová distribuovaná síť systému BOINC, která již od roku 2004 zajišťovala velkou výpočetní kapacitu. Díky projektu LHC@home se na stavbě a samotném ladění urychlovače mohl podílet kdokoliv, kdo měl doma počítač a připojení k internetu. Do výpočtů bylo zapojeno 53 703 lidí na celém světě, z toho 1 658 Čechů. Oficiální zahájení experimentu proběhlo 21. Října 2008.

[2]



Obr. 7.2: Schematický náčrt konfigurace urychlovačů LHC a detektorů (žlutě). [2]

Po obvodu urychlovače LHC jsou čtyři místa, kde se trubice propojují a protisměrné svazky částic kříží - budou zde probíhat interakce ve vstřícných svazcích. Tato místa jsou obklopena velkými a složitými detekčními systémy, pomocí nichž je připraveno šest experimentů: [1]

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)



Obr. 7.3: Pohled na částicový detektor ATLAS v průběhu výstavby, jeden ze šesti hlavních vědeckých přístrojů LHC. [2]

ATLAS je největším detekčním systémem (váží asi 7000 tun), hlavním nosným programem LHC. Bude komplexně měřit a analyzovat částice vznikající při srážkách protonů o energii 14 TeV. Má za úkol zkoumat fyziku ve větším rozsahu, než například ALICE, včetně pátrání po Higgsově bosonu, extra dimenzích a částicích, které by mohly tvořit temnou hmotu. Detekční systém ATLAS (a též níže uvedený CMS, částečně i ALICE) má válcové koaxiální uspořádání podobné, jako je na modelovém obrázku 7.3 avšak mnohem složitější; je to nejsložitější a nenákladnější detekční zařízení v dosavadní historii!.

Tvoří ho 8 obřích magnetů, poskládaných na délku do kruhu tak, aby magnetické pole bylo nejsilnější uprostřed detektoru. Každý z těchto magnetů měří 25 metrů a je složen ze supravodivých cívek. [2]

Vnitřní část detektoru, která zaznamenává dráhy nabitých částic vylétajících z místa srážky, se skládá ze tří souosých vrstev („slupek“) dráhových detektorů (*trackerů*): nejnižší jsou pixelové polovodičové detektory, pak stripové detektory a detektory přechodového záření. Celý systém je umístěn v silném podélném magnetickém poli 2 Tesla supravodivého *solenoidního elektromagnetu*; ze zakřivení drah částic v magnetickém poli lze určit náboj a hybnost částic.

Další vrstvu detekčního systému tvoří spektrometr, nazývaný „*kalorimetr*“, jehož úkolem je absorbovat energii vylétajících částic a kvantifikovat ji (její „vzorek“) pomocí výstupních elektrických impulsů. Skládá se ze dvou částí: *elektromagnetický kalorimetr* pro měření energie fotonů a elektronů a *hadronový kalorimetr*.

Poslední, vnější vrstva detektoru ATLAS je tvořena mionovým spektrometrem, určeným pro detekci vysokoenergetických mionů, které jsou schopny projít vrstvou kalorimetru. Analýzou drah mionů, zakřivených silným *toroidální* magnetickým polem, lze určit jejich hybnosti a znaménka elektrických nábojů. K detekci drah mionů se používají driftové trubicové a mnohohrátové ionizační komory. [1]

Detektor CMS (Compact Muon Solenoid)



Obr. 7.4: Pohled na částicový detektor CMS v průběhu výstavby. [2]

Optimalizovaný pro detailní analýzu mionů, bude spolupracovat se systémem ATLAS pro komplexní analýzu vysokoenergetických interakcí. Jeho struktura je podobná jako u ATLASu. Pro analýzu trajektorií rychlých mionů je součástí detekčního systému velký elektromagnet válcového tvaru (*solenoid*), vytvářejícím magnetické pole o síle 4 Tesla (zhruba 100 tisíckrát větší, než magnetické pole Země). Toto pole musí být poutáno ocelovými výztuhami, které tvoří značnou část celkové hmotnosti detektoru (12 500 tun).. Solenoid obalující vlastní detektor je složen z cylindrické cívky supravodivých kabelů. Zajímavostí detektoru je, že jako jediný byl nejdříve postaven na povrchu a teprve pak spuštěn do podzemí

Na detekčních systémech ATLAS a CMS se očekává objev nových částic, především *Higgsova bosonu*. Pokud by jeho rozpad šel elektromagnetickým způsobem přímo na vysokoenergetické dvojice γ , nebo (přes W-bosony) na elektrony a pozitrony, byly by tyto sekundární částice zachyceny v elektromagnetickém kalorimetru ATLASu nebo CMS. Při rozpadu na miony (přes Z-bosony) by přišla ke slovu hlavně mionová detekční část CMS. A všechny nabitě částice mohou zanechávat své stopy ve vnitřních dráhových detektorech (*trackerech*) obou systémů.

[1]

ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

Je dalším experimentálním systémem, jehož úkolem bude studium srážek jader („těžkých iontů“), především olova, při těžišťových energiích až 5 GeV/nukleon. Pro experiment ALICE bude LHC srážet olověné ionty aby se tak vytvořily podmínky shodné s těmi po Velkém třesku. Získaná data umožní fyzikům studovat stav hmoty zvaný kvark-gluonová plazma, která nejspíše při velkém třesku existovala. Protony a neutrony jsou tvořeny kvarky (proton: 2 kvarky up, 1 kvark down, neutron: 1 kvark up, 2 kvarky down), které drží pohromadě díky jiným částicím zvaným gluony (od anglického slova glue – lepidlo). Gluony působí na kvarky tak velkou silou, že samostatný kvark ještě nebyl nalezen. Kolize v LHC způsobí teploty vyšší než 100 tisíci násobek teploty v jádru Slunce. Fyzikové doufají, že při těchto podmínkách se protony a neutrony roztaví a uvolní tak kvarky ze svazků s gluony. Tím vznikne kvark-gluonová plazma. Experiment ALICE bude studovat kvark-gluonovou plazmu, její vznik a zpětné přetvoření na známou hmotu.

Podobně jako ATLAS a CMS, má i ALICE válcové koaxiální uspořádání velkého počtu detektorů, určených k registraci a rekonstrukci parametrů především nabitých částic vznikajících při srážkách jader. [1]

TOTEM

(Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation)

Experiment TOTEM se zaměří na zkoumání jevů, které se nevešly do škály úkolů víceúčelových detektorů ATLAS a CMS. Bude měřit velikosti částic a přesně monitorovat luminozitu LHC. K tomu musí být TOTEM schopen detekovat částice produkované velmi blízko paprsků obíhajících v LHC. To vyžaduje detektory ve speciálně navržených vakuových komorách zvaných Římské hrnce (Roman pots), připojených k trubkám s paprsky. 8 těchto zařízení bude v párech umístěno v blízkosti kolizí v detektoru CMS na čtyřech místech. CMS a TOTEM jsou dva experimenty na sobě nezávislé, avšak TOTEM bude sloužit jako sběrač dat ze všech experimentů.

[1]

LHCb (*Large Hadron Collider beauty*)

LHCb má mít za úkol studovat narušení CP symetrie při rozpadech B-mesonů obsahujících těžký (druhý nejtěžší) b-kvark (b znamená »bottom« jako »spodní« nebo také »beauty« jako »krásný«). K zachycení kvarků b vyvinuli vědci pro LHCb sofistikovaná pohyblivá sledovací zařízení blízko drahám paprsků kroužících v LHC.

Při vysokoenergetických srážkách protonů v LHC vzniká mj. i velký počet párů b-b' kvarků-antikvarků a jejich hadronizací pak B-mesony i baryony. Způsob rozpadu těchto částic je citlivý na narušení CP symetrií – jestli se hmota chová nepatrně odlišně než antihmota.

Detektor by měl zodpovědět, proč se zdá, že vesmír je složen téměř výhradně z hmoty, ale ne z antihmoty (baryonová nesymetrie). Namísto obklopení místa kolize detektorem používá LHCb řadu sub-detektorů ke zjištění částic. Vertex Locator (VELO) je prvním detektorem umístěným okolo místa srážky, kde bude měřit trajektorie částic v místě interakce. Po detektoru VELO, následuje RICH-1 (*Ring Imaging Cherenkov detectors*). Bude identifikovat trajektorie částic malých hybností. Hlavní sledovací zařízení je uloženo před i za magnetem a bude opět zaznamenávat trasy částic a měřit jejich hybnosti. Na okraji je sledovací zařízení RICH-2 pro sledování částic s vysokou hybností. LHC vytvoří velké množství kvarků různých typů, předtím, než se rozpadnou na jiné formy.

[1]

LHCf (*Large Hadron Collider forward*)

LHCf bude studovat vysokoenergetické částice generované „dopředu“ ve směru protonového svazku. LHCf má za úkol simulovat kosmické záření v laboratorních podmínkách za pomoci částic vytvořených uvnitř LHC. Je nejmenším experimentem, co do počtu vědců (22). Kosmické záření je způsobeno nabitými částicemi z vesmíru, které neustále bombardují zemskou atmosféru. Narážejí do jader ve vyšší atmosféře a způsobují kaskádu částic, které dosáhnou zemského povrchu. Získání znalostí o chování kosmického záření, resp. Těchto kaskád částic pomůže vědcům vypracovat velké experimenty, které pokryjí tisíce kilometrů. Spektrometr (kalorimetr) LHCf se

zaměřuje především na *neutrální* energetické částice (fotony γ , neutrální piony, neutrony) emitované pod malými úhly; nabitě částice mohou být registrovány trackery v ATLAS a CMS, částice emitované pod velkými úhly pak navíc kalorimetry a mionovými spektrometry obou systémů.

[1]

Experimenty a jejich detektory

Úkolem částicového detektoru je zaznamenávat a vizualizovat exploze částic, které jsou důsledkem srážky. Informace o rychlosti, hmotnosti a elektrickém náboji částice pomohou fyzikům zjistit identitu dané částice. Úkol to ale nebude snadný. Předpokládáme, že LHC pomůže objevit nové částice. Ty však nebudou volně poletovat a čekat, až si jich někdo všimne. Všechny důkazy o existenci částice budou nepřímé. Některé mohou existovat pouze nepatrné zlomečky sekundy, a proto uvidíme pouze produkty jejich rozpadu. Moderní přístroje částicové fyziky se skládají z vrstev sub-detektorů, každý se specializuje na určitý typ částice. 3 hlavní typy sub-detektorů:

Sledovací zařízení – odhaluje trajektorii elektricky nabitě částice podle stopy, kterou za sebou nechají (pokud jsou ve vhodné směsi).

Kalorimetr – měří ztrátu energie při průchodu. Obvykle je navržen tak, aby zastavil a absorboval většinu částic přicházejících z kolize. Kalorimetry jsou konstruovány z vrstev hustých materiálů (olovo) a prokládány aktivními médii (tekutý argon). Kalorimetry zastaví většinu známých částic kromě mionů a neutrin (ty mohou pouze vychýlit např. radioaktivní látky)

Částicový identifikační detektor – identifikuje částici podle záření vysílaného nabitou částicí.

[2]

Účel

Očekávaný start projektu jež proběhl v roce 2008 zajistí srážky o největší energii, jaká kdy byla dosažena v laboratorních podmínkách, a už dnes se fyzici nemohou dočkat, co se jim podaří odhalit. Čtyři obrovské detektory – ALICE, ATLAS, CMS a LHCb – budou zkoumat srážky a tímto způsobem budou možná fyzici schopni

prozkoumat nové teorie hmoty, energie, vesmíru a času. Výsledky z LHC mohou vrhnout nové světlo na:

- Temnou energii
- Temnou hmotu a částice, které ji tvoří
- Antihmotu
- Higgsův boson
- Kvarky a leptony - jsou skutečně fundamentální částice?

Výkonnost

LHC je přístroj pro koncentraci energie ve velmi malém prostoru. Částice budou mít energii řádově TeV. 1 TeV je energie srovnatelná s energií letícího komára, háček je v tom, že proton je asi trilionkrát menší než komár. Každý proton rotující v LHC bude mít energii 7 TeV, takže když se srazí dva protony, energie srážky bude 14 TeV. Ionty olova mají 82 protonů a dohromady dávají ekvivalentně vysokou energii: kolize dvou svazků iontů olova bude mít energii srážky okolo 1150 TeV. Při plném výkonu bude mít každý svazek energii 350 MJ, což je energie jakou má vlak o váze 400 tun jedoucí rychlostí 200 km/h. Tato energie je dostatečná k roztavení 500 kg mědi. Energie uložená v magnetech je ještě přibližně třicetkrát vyšší (11 GJ).

[2]

Výsledky měření z urychlovače LHC jsou nesmírně důležité pro jaderné fyziky, otvírají nové možnosti v oblasti výzkumu a odhalují neznámé stránky vesmíru. Přístroj urychluje dva paprsky částic proti sobě rychlostí větší než 99,9 % rychlosti světla. Srážky těchto paprsků vytváří spršky nových částic, které jsou poté předmětem studia vědců.

Fyzikové si od tohoto velkého urychlovače mimo jiné slibují, že energie srážek v LHC by mohla být dostatečná k experimentálnímu nalezení tzv. *Higgsových bosonů*, zatím hypotetických modelových částic, generujících hmotnosti elementárních částic. Rovněž nejlehčí *supersymetrické částice* (LSP - *Lightest Supersymmetric Particle*) by

při těchto interakcích snad mohly být prokázány. Impozantní systém urychlovače LHC a detekčních aparatur je nejsložitějším a nejdůmyslnějším dílem, jaké lidstvo vytvořilo ve své dosavadní historii! Porobnosti o konstrukci, průběhu výstavby a výsledcích experimentů na LHC jsou uvedeny na oficiálních www-stránkách CERN: <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>.

Bezpečnostní problémy

Vědci i laici, kteří nejsou součástí komunity kolem LHC, vyjádřili znepokojení, že LHC může způsobit jednu z několika teoretických katastrof, které by mohly zničit Zemi nebo dokonce celý vesmír:

- Vytvoření stabilní černé díry
- Vytvoření zvláštní hmoty, která by byla stabilnější než normální hmota

CERN vytvořil studii, která by vyšetřila, jestli se takové nebezpečné události jako vytvoření stabilní mikroskopické černé díry mohou stát. Studie došla k závěru: "Nenašli jsme žádný podklad pro jakoukoli možnou hrozbu." Například, není možné vytvořit mikroskopické černé díry, pokud by určité neotestované teorie byly správné. I kdyby však vznikly, ihned by se vytratil a byly by tak neškodné. Jeden z nejsilnějších argumentů, že LHC je bezpečný, je fakt, že kosmické paprsky o mnohem větší energii, než může LHC kdy vyprodukovat, bombardovaly Zemi a všechna tělesa ve sluneční soustavě miliardy let bez takovýchto účinků. Stejně ale u každého nového experimentu nikdy není možné s jistotou říct, co se stane. John Nelson z Birminghamu University řekl, že "je velmi, velmi nepravděpodobné, že existuje nějaké riziko - ale nemohu to dokázat."

RHIC, podobný, jen mnohem menší urychlovač, funguje již od roku 2000 a nezpůsobil zatím žádné Zemi-ničící efekty.

Podle britského deníku Telegraph obdrželi vědci pracující na LHC řadu výhrůžných e-maily a telefonátů od lidí obávajících se, že by urychlovač mohl vytvořit černou díru nebo vyvolat zemětřesení. Na počátku experimentu údajně do systému pronikla skupina řeckých hackerů a na internetové stránky experimentu vložili nápis "GST: Greek

Security Team". Podle deníku se hackeři dostali těsně k počítači, který řídí magnety, jež regulují paprsek částic. [2]



Obr. 7.5: Jeden z více než 1800 supravodivých magnetů urychlovače LHC na transportním vozíku uvnitř 27 km dlouhého podzemního tunelu. [2]

7.2. Koncepční perspektivy velkých urychlovačů:

Kruhové či lineární urychlovače?

Jakkoli je princip kruhového urychlování nabitých částic velmi úspěšný a efektivní, zdá se, že kruhové urychlovače se v pozemských podmínkách již přiblížily k hranicím svých možností. Pokud bychom chtěli nabitě částice urychlovat na ještě podstatně vyšší energie při reálně dostupných průměrech kruhové dráhy (tj. průměrech urychlovacích trubic), čím dál více by se uplatňoval jev vzniku **synchrotronového záření***, které by odnášelo značnou část kinetické energie částic a nakonec by znemožnilo další urychlení. Zdá se tedy, že budoucí urychlovače pro nejvyšší energie v pozemských podmínkách budou muset být **lineární**. Délka lineárních urychlovačů pro dosažení vysokých energií činí mnoho kilometrů. To je v pozemských podmínkách rovněž limitující faktor.

*) Synchrotronové záření vzniká jako brzdné záření v důsledku nerovnoměrného pohybu elektricky nabitých částic při kruhovém oběhu. Podle známého Larmorova vzorce elektrodynamiky je intenzita tohoto vyzařování úměrná elektrickému náboji a druhé mocnině zrychlení pohybu částice, zde se jedná o *dostředivé zrychlení* kruhového pohybu. Při dané kinetické energii je tedy intenzita synchrotronového záření nepřímo úměrná kvadrátu hmotnosti částice. Tento jev se proto uplatňuje především při kruhovém urychlování lehkých částic, **elektronů**, které se při dosažení vysokých kinetických energií pohybují vysokými rychlostmi a s vysokými radiálními zrychleními. U protonů vzhledem k jejich vysoké hmotnosti je synchrotronové vyzařování milionkrát menší.

Protonové nebo elektronové urychlovače?

Protony a elektrony (vč. pozitronů) jsou z hlediska svých vlastností a struktury velmi odlišné částice, což se projevuje odlišnými mechanismy interakcí. **Protony** mají složitou vnitřní strukturu kvarků interagujících prostřednictvím gluonového pole. Při jejich vysokoenergetické srážce neinteragují jako celek, ale energie interakce se **rozdělí** jednotlivé kvarky, přičemž v gluonovém poli dochází k produkci většího množství dalších částic - dvou a tříkvarkových kombinací, mezonů a baryonů. Tyto procesy jsou sice důležité z hlediska studia silných interakcí a vlastností hadronů, avšak

energie interakce se "rozmělní" na velký počet sekundárních částic; nelze dosáhnout koncentrace energie na malý počet částic. Při protonových srážkách vstupují do interakcí všechny kvarky, které "zamoří" detekční prostor kolem místa interakce množstvím sekundárních částic (obr.1.5.1G,H). V tomto "balastu" je značně obtížné "najít" (odseparovat) vzácné případy požadované interakce jedné z dvojic kvarků.

Elektron je naproti tomu částice prakticky bodová bez vnitřní struktury (aspoň v nám známých a dostupných prostorových měřítcích). Při vysokoenergetické srážce proto elektrony **interagují jako celek**, vzniká podstatně méně sekundárních částic, na které se **koncentruje** podstatně větší část energie. Pro hledání nových masivních částic jsou proto interakce urychlených kompaktních elektronů výhodnější, než složitě strukturovaných protonů. Zjednodušeně se dá říci, že při vysokých energiích jsou srážky elektronů "tvrdší" než srážky protonů. Elektronové srážky jsou podstatně "čistší" než protonové, vzniká při nich mnohem méně sekundárních částic (srovnejme příslušné Feynmanovy diagramy na obr.1.5.1). Výhodou je proto nižší radiální pozadí nezajímavých částic, mezi nimiž se snadněji hledají požadované masivní částice. Zdá se tedy, že pro dosažení nejvyšších faktických koncentrací energií při interakcích budou **výhodnější velké urychlovače elektronů** - vstřícné elektron-pozitronové srážky.

Pozn.: Konstrukteři dosud největšího urychlovače LHC v CERN již projektují stavbu velkého **elektron-pozitronového collideru** pod názvem **CLIC** (*Compact Linear Collider*) s energií 3 TeV.

Vesmírné urychlovače?

Zmíněné technické problémy a omezení jsou povětšinou dány pozemskými podmínkami, v nichž se urychlovače konstruují. Mnohé z těchto problémů by automaticky odpadly, kdybychom urychlovače instalovali **mimo prostor naší Země**. Konstrukce urychlovačů ve vesmíru má několik principiálních výhod:

- **Dostatek volného prostoru** pro instalaci i těch nejrozsáhlejších urychlovacích systémů.
- **Beztlíživý stav.** Odpadá nutnost robustních konstrukcí zajišťujících mechanickou pevnost. Lze též snadno, bez konstrukčních zásahů, provést změny polohy a rekonfiguraci jednotlivých částí urychlovacího systému v prostoru.

- **Vysoké vakuum**, které je k dispozici všude, v celém prostoru, a to "zadarmo". Odpadá tedy nutnost konstruovat urychlovací trubice, v nichž v pozemských podmínkách jen obtížně udržujeme potřebné vakuum. Urychlované částice se mohou pohybovat ve volném prostoru po drahách, přesně určených a tvarovaných magnetickým polem.
- **Nízká teplota**, která u vhodných materiálů automaticky zajišťuje **supravodivost**. Cívky elektromagnetů tedy **není nutno chladit**, jednou vzbuzený proud se bude trvale udržovat a budit permanentní magnetické pole k potřebnému zakřivování drah urychlovaných nabitých částic. I elektromagnety s časově proměnným magnetickým polem budou pracovat bez energetických ztrát teplem

Reálnému využití těchto principiálních předností však za současného stavu naší techniky brání zatím velmi obtížně řešitelné **technické problémy**. Je to především vynesení konstrukčního materiálu o vysoké váze (statisíců tun) ze zemského povrchu, proti gravitaci, na oběžnou dráhu kolem Země, nebo dokonce do vzdáleného vesmírného prostoru. Na to zatím technické prostředky nemáme, současné rakety jsou příliš slabé, pomalé a neefektivní. Dále je to otázka dálkového napájení elektrickou energií a též zajišťování přesné polohy jednotlivých částí urychlovacího systému se submilimetrovou přesností. Pouze oblast přenosu měřených dat z interakcí částic by byla řešitelná i prostředky naší současné elektroniky (která v posledních desíletích - jako jediná z technických disciplín - udělala zásadní kvalitativní pokrok!).

V budoucnu lze očekávat, že experimenty s částicemi urychlenými na nejvyšší energii ze **z pozemského prostoru přesunou do vesmíru...**

[1]

8. Kosmické urychlovače

Procesy urychlování stavebních částic hmoty probíhají i v **přírodě**, a to často v mnohem větším měřítku a intenzitě, než to my dokážeme uměle. V bouřlivých procesech ve **hvězdách a galaxiích** dochází k procesům, které fungují jako "kosmické urychlovače" částic. Jsou diskutovány především tři mechanismy urychlování částic ve vesmíru:

Fermiho mechanismus plynulého difuzního urychlování při opakované interakci částic s pohybujícími se rozlehlými oblaky ionizovaného plynu, za spolupůsobení magnetického a elektrického pole.

Výbuch supernovy, při němž se vnější části hvězdy rozpínají rychlostí blízkou rychlosti světla, přičemž ve vzniklé rázové vlně mohou být v prudce expandující ionizované hmotě protony urychlovány na energie až stovky TeV.

Pohlcování hmoty černou dírou, kdy velké množství hmoty, přitahované černou dírou, vytvoří kolem ní tzv. *akreční disk*, v jehož nejnižší centrální oblasti dochází k extrémně silnému ohřevu pohlcované látky klesající po spirále do černé díry. Podél osy symetrie tohoto tlustého rotujícího disku pak "trychtýři" z vnitřní části uniká proud částic a záření - tzv. *jet* neboli *výtrysk*, který obsahuje částice urychlené na velmi vysoké relativistické energie.

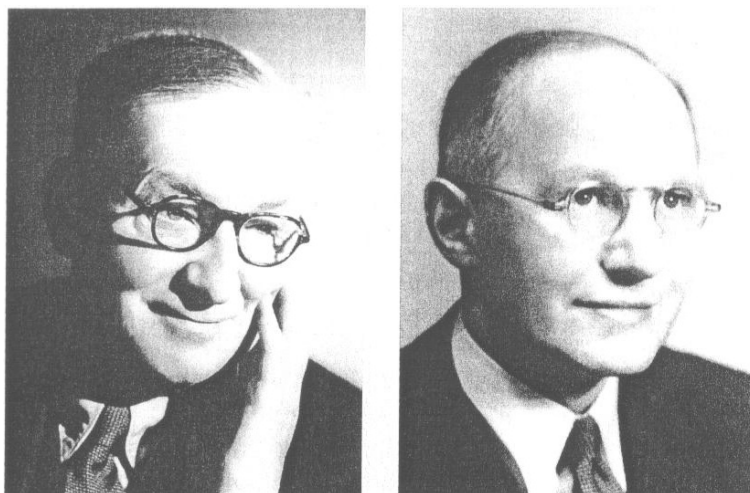
Těmito mechanismy (a možná i dalšími dosud neznámými) vzniká vysoce energetické **kosmické záření**.

[1]

9. Konstrukteři urychlovačů

Další kapitola představuje vynálezce, fyziky, objevitele a konstruktéry urychlovačů částic. Díky nim, se výzkum studia částic dostal do takové formy, jakousi jistě zpočátku nedokázali představit.

John Cockroft a Ernest Walton

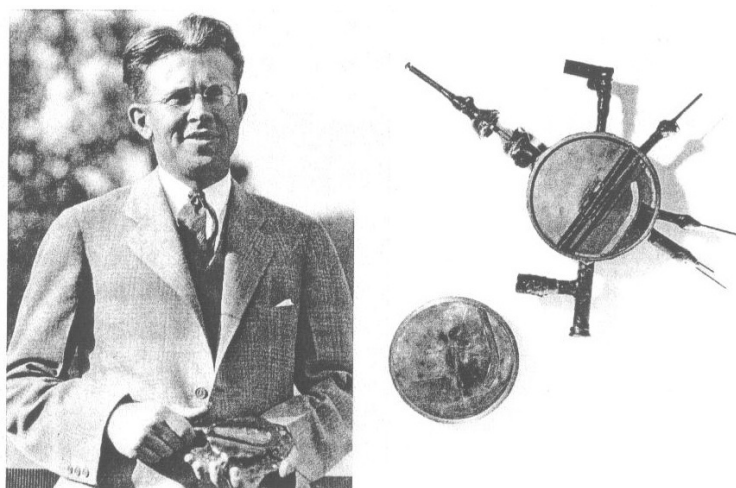


John Cockroft (1879-1967) a **Ernest Walton** (1903-1995) obdrželi Nobelovu cenu v roce 1951. Sestrojili první urychlovač použitelný pro experimenty v jaderné fyzice. První reakcí, kterou pozorovali, bylo štěpení jádra lithia protonem. Jádro lithia obsahuje tři protony a čtyři neutrony a spolu s nalétajícím protonem vytvoří dvojici částic α , z nichž každá obsahuje dva protony a dva neutrony. Je zábavné číst, jak ten experiment realizovali. Museli dokázat, že při reakci vznikly dvě částice α , které byly vyzářeny současně. Provedli to s pomocí dvou pozorovatelů, z nichž každý sledoval stínítko, které se při dopadu částice α rozzářilo. Jakmile zpozorovali záblesk, stiskli tlačítko. Dva současně ukazovali na rozpad jádra lithia.

Zařízení, které při experimentu použili, urychlovalo protony asi na 700 keV. Podle dnešních měřítek to samozřejmě byla dosti malá energie, pro studium atomových jader však již stačila. Walton si již v roce 1951 optimisticky představoval (viz jeho nobelovská přednáška), že by tato metoda mohla být použitelná k urychlení protonů

až na 10 GeV, ale to byla nepochybně marná naděje. Kruhové urychlovače jako cyklotrony apod. jsou k urychlování protonů vhodnější. Je zajímavé, že napětový generátor Cockroftova-Waltonova typu (kaskádový generátor) je používán ve většině televizorů ke generování potřebného napětí 20-30 keV. Cockroftova-Waltonova zařízení se také dosud používají hned za ionizační komorou jako počáteční urychlovače velkých protonových urychlovačů.

Ernest Lawrence



Ernest Lawrence (1901-1958), Nobelova cena v roce 1939. V roce 1929 vynalezl cyklotron. Sestrojil ho spolu se svým doktorantem Miltonem Stanleyem Livingstonem (1905-1986) na podzim roku 1930. Detaily modelu vidíme na pravém obrázku. Měl průměr jen necelých 10 cm a urychloval částice na 80 keV. V roce 1931 postavil přístroj o průměru komory 22,5 cm a výstupu 0,5 MeV. Další dva cyklotrony vybudovala univerzita v letech 1933-1935, pátý univerzitní cyklotron byl dokončen v roce 1938. Energie urychlených částic již dosahovala několika desítek MeV, což je několikrát více, než poskytovaly tehdy používané přirozené radionuklidy. Poslední cyklotron už narazil na meze, dané relativistickým nárůstem hmotnosti částic. Pro její kompenzaci musel mít hlavní magnet nehomogenní magnetické pole. Vyvrcholil zařízením ve Fermilabu u Chicaga ve Spojených státech, které urychluje protony na 1 TeV.

Lawrencovou zásluhou vznikla celá skupina konstruktérů, kteří postavili zařízení ve Fermilabu, v Brookhavenu, v SLAC (u Stanfordu) a v Argonne (u Chicaga). Například roku 1939 postavil tým pod vedením fyzika Igora Kurčatova první sovětský cyklotron.

Sám Lawrence měl předchůdce v Rolfu Wideröeovi (1902-1996) z Norska. Wideröe je považován za prvního konstruktéra urychlovačů. Sám je stavěl a inspiroval nejen Lawrence, ale i B. Touscheka, který vyvinul první elektron-pozitronový srážecí. Základní myšlenka, na níž je cyklotron postaven, spočívá v tom, že doba oběhu částice nezávisí na její rychlosti. Při nízké energii tedy obíhá na malé orbitě, zatímco v závěru má mnohem větší rychlost a pohybuje se ve větších kruzích. Doba oběhu se přitom nemění. Právě tento princip, nejprve zjištěný experimentálně a rychle vysvětlený teoreticky, učinil z cyklotronu takové života schopné zařízení. Princip cyklotronu byl označen za naprosto nejdůležitější vynález v historii urychlovačů.

Bruno Toucek



Bruno Toucek (1921-1978) se narodil v Rakousku, napsal svou disertaci pod Heisenbergovým vedením a málem nepřežil válku. Protože jeho matka byla židovka, neustále mu hrozilo, že ho nacisté uvězní. S pomocí několika fyziků se mu nějaký čas dařilo unikat, ale v roce 1945 jej gestapo zatklo a uvrhlo do vězení. Často jej navštěvoval Rolf Wideröe, se kterým hovořil o novém zařízení nazvaném betatron. Ke konci února 1945 jej odvezli do koncentračního tábora blízko Kielu. Protože

pochodoval s těžkým balíkem knih a byl dosti nemocný, upadl na zem někde na okraji Hamburku. Důstojník SS vytáhl pistoli a střelil ho do hlavy ponechav jej ležet zraněného a krvácejícího ve škarpě. Jen náhodou byl zraněn pouze za levým uchem. Dostal se do nemocnice, ale vrátili ho do vězení, odkud byl vysvobozen britskými vojáky.

Pracoval na různých místech, zvláště v Glasgowě, a nakonec se usadil v Itálii. V roce 1960 navrhl první elektron-pozitronový srážec, ve kterém se elektrony a pozitrony pohybují v opačných směrech v tomtéž magnetické, prstenci. Idea srážec ve skutečnosti pochází již od Wideröea, z roku 1943. Wideröe ji dokonce patentoval. Touschek však přišel s nápadem použít jeden prsteneček pro oba svazky a v tomto duchu zařízení (AdA) sestrojil.

Touschek bohužel propadal kouření a alkoholu a zemřel předčasně a v roce 1978 ve Švýcarsku. Fyzika v něm ztratila velkého člověka, jehož vědecký vklad byl obrovský.

Wolfgang (Pief) Panofsky



Wolfgang (Pief) Panofsky (1919) založil Centrum lineárního urychlovače ve Stanfordu (SLAC) a vyvinul lineární elektronový (a pozitronový) urychlovač. SLAC je pravděpodobně neúspěšnější laboratoří fyziky částic, stojí za třemi Nobelovými cenami. Panofsky byl ředitelem SLAC v letech 1961 až 1984.

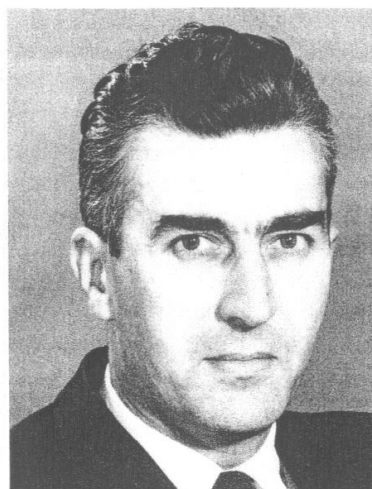
Studoval v Princetonu a na Caltechu získal doktorát, účastnil se projektu Manhattan (vývoj atomové bomby) a po období stráveném v Berkley nastoupil v roce 1951 na univerzitu ve Stanfordu. Značně se angažoval v záležitostech kontroly zbrojení a dodnes je důležitějším poradcem americké vlády.

Dosáhl ohromných úspěchů, byl oceněn velkým množstvím vyznamenání. Ironicky nikoli Nobelovu cenu.

Jeho otec Erwin Panofsky (1892-1968) byl nejznámějším německým historikem umění. Protože byl Žid, uprchl z nacistického Německa v roce 1934 a po krátké době nastoupil do Ústavu pokročilých studií v Princetonu. Jeho další syn, Hans Panofsky (1917-1988) byl také velmi inteligentní a přispěl k pochopení turbulencí čistého vzduchu a rozptylu znečišťujících látek. Když oba synové studovali v Princetonu, jejich inteligence byla velmi rychle rozpoznána. Protože se jeden z nich jevil trošku šikovnější než druhý, přezdívalo se jim chytrý a hloupý Panofsky.

Když byl jednou Pief v Mnichově, zeptali se ho, jestli chce jít do nějakého muzea. Odpověděl: „Můj otec mi často celé hodiny vysvětloval obrazy a já jsem se jednou rozhodl, že už žádné další nechci vidět.“

Robert Wilson a John Adams



Robert Wilson (1914-2000) a **John Adams** (1920-1984). V roce 1967 Robert Wilson, který až do té doby pracoval na Cornellově univerzitě, začal budovat Fermilab nedaleko Chicaga. Patřila k tomu zodpovědnost za navrhování budov, jakou je třeba

hlavní (výšková) budova Fermilabu, ale také za tvorbu různých soch rozmístěných po území ústavu. Za zmínku určitě stojí, že při výstavbě urychlovače ve Fermilabu dodrželi rozpočet. Wilson byl ředitelem do roku 1978.

Wilson pocházel z Wyomingu a byl pozoruhodným člověkem Navzdory svým pacifistickým názorům se podílel na vývoji atomové bomby. Později se stejně jako W. Panofsky zapojil do protiválečných aktivit. Ben Lee, který vedl skupinu teoretiků ve Fermilabu, řekl, že po konferenci v Amsterdamu v roce 1971 na něj Wilson naléhal, aby začal na těchto teoriích pracovat.

Ředitelé laboratoří patrně nemohou být milí ke každému. Wilsonovy postoje v podstatě výstavby Fermilabu byly proslulé. Vyhodil každého, kdo pilně nepracoval. Jednou taková oběť odporovala: „Mne nemůžete vyhodit.“ Wilson se zeptal proč ne, a ten člověk odpověděl, že ve skutečnosti ve Fermilabu není zaměstnán.

Adams postavil dva urychlovače v CERN, PS v letech 1953-1959 a SPS v letech 1971-1975. Od roku 1971 do roku 1980 byl také ředitelem CERN. Neměl žádnou formální kvalifikaci, což mu nebránilo, aby byl výjimečným projektantem a inženýrem. Vášnivě soutěžil se svým americkým protějškem ve Fermilabu, Wilsonem. Když se Fermilab rozhodl postavit Tevatron se supravodivými magnety, svěčil se s přáním vybudovat takové zařízení v CERN, ale ještě lepší. K tomu však nemělo dojít. CERN se rozhodl postavit LEP. Rozhodnutí padlo, když byl Adams ředitelem. Navzdory svým vlastním preferencím Adams výstavbou LEP nakonec podpořil. Velikost energie LEP stanovil jeho nástupce H. Shopper.

[7]

10. Využití urychlovačů

Existuje mnoho možností využívání urychlovačů v nejrůznějších odvětvích. Podívejte se na krátký přehled.

Výzkum

- fyzika – mnoho oblastí, včetně astrofyziky
- chemie
- biologie

Průmysl

- iontové implantace
- modifikace povrchů
- mikrolitografie
- synchrotronové záření
- sterilizace
- polymerizace
- aktivace (detekce výbušnin)

Lékařství

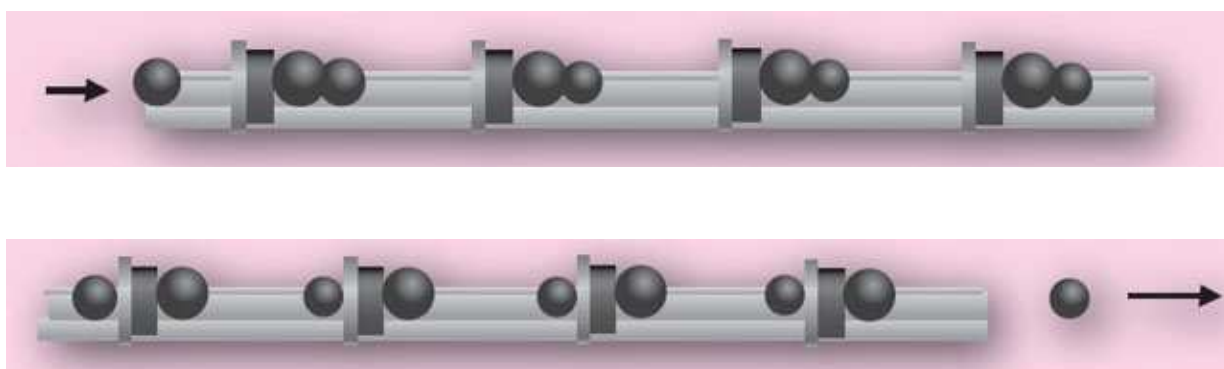
- produkce izotopů
- terapie pomocí gama záření, nebo těžších částic

Energetika

- fúze
- zážeh plazmatu
- transmutace odpadu
- iniciace štěpení

11. Model znázorňující funkci urychlovače

Místo elektricky nabitých částic jsou urychlovány ocelové kuličky s použitím známého fyzikálního zákona o předávání energie nárazem a působením magnetického pole.



Obr. 11.1 : Schéma znázorňující princip funkce modelu simulujícího funkci urychlovače částic

Použitá literatura

- [1] RNDr. Vojtěch Ulman: Jaderná a radiační fyzika: 1.5. Elementární částice [online] [citováno 5.9.2009]. Dostupný z www: <<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika5.htm>>
- [2] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Large Hadron Collider [online]. c2009 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Large_Hadron_Collider&oldid=4708116>
- [3] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Synchrotron [online]. c2009 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Synchrotron&oldid=4379387>>
- [4] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Urychlovač částic [online]. c2009 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Urychlova%C4%8D_%C4%8D%C3%A1stic&oldid=4643575>
- [5] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Tevatron [online]. c2009 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tevatron&oldid=4634691>>
- [6] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Bevatron [online]. c2010 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Bevatron&oldid=4836251>>
- [7] Veltman M.: Fakta a záhady ve fyzice elementárních částic, Academia Praha 2007
- [8] Fišer J.: Průhledy do mikrokosmu, Mladá fronta Praha 1986
- [9] Keck Ch.: Urychlovače částic, Státní nakladatelství technické literatury Praha 1965
- [10] Tarábek P., Červinková P.: Odmaturuj z fyziky, Didaktis 2004
- [11] Vošický Z., Lank V., Vondra M.: Matematika a fyzika v kostce, Fragment 2007

[12] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Lineární urychlovač [online]. c2009 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW:

<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Line%C3%A1rn%C3%AD_urychlova%C4%8D&oldid=3624249>

[13] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Iontová trubice [online]. c2008 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW:

<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Iontov%C3%A1_trubice&oldid=3278221>

[14] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Cyklotron [online]. c2009 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW:

<<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cyklotron&oldid=4681725>>

[15] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Evropská organizace pro jaderný výzkum [online]. c2009 [citováno 19. 01. 2010]. Dostupný z WWW:

<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Evropsk%C3%A1_organizace_pro_jadern%C3%BD_v%C3%BDzkum&oldid=4650488>

[16] Vladimír Wagner: Úvod do subatomové fyziky [online] [citováno 3.4.2010]. Dostupný z www.: <http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/prednasky/subatom/experiment/urychlovace.html>

[17] Jiří Rameš (český překlad): Dobrodružství z částicemi [citováno 5.4.2010] dostupné z www: <http://www-hep2.fzu.cz/adventure/slac.html>

[18] Jiří Rameš (český překlad): Dobrodružství z částicemi [citováno 5.4.2010] dostupné z www: <http://www-hep2.fzu.cz/adventure/cesr.html>

[19] Jiří Rameš (český překlad): Dobrodružství z částicemi [citováno 5.4.2010] dostupné z www: <http://www-hep2.fzu.cz/adventure/kek.html>

[20] Matematika a fyzika: Z. Vošický, V. Lank, M. Vondra; Fragment 2007

[21] Javorskij B. M.: Přehled elementární fyziky, Státní nakladatelství technické literatury Praha 1989

- [22] Krupka F., Kalivoda L.: Fyzika, Státní nakladatelství technické literatury Praha 1989
- [23] McCracken G., Scott P.: Fúze : energie vesmíru, Mladá fronta Praha 2006
- [24] Ugrošík B.: Fyzika, Státní nakladatelství technické literatury Praha 1987
- [25] Beiser A.: Úvod do moderní fyziky, Academia Praha 1975
- [26] Doležal Zdeněk: Urychlovače nabitých částic [citováno 2.8.2009] dostupné z www:
<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~dolezal/teach/accel/>
- [27] Karjakin N.I., Bystrov K.N.: Přehled fyziky, Státní nakladatelství technické literatury Praha 1970

Příloha 1

Historie objevů elementárních částic

Do roku 1930 byly známy jen dva druhy elementárních částic: protony nacházející se v jádrech atomů a elektrony. V roce 1930 Paul Dirac na základě kvantové teorie a pohybových rovnic elektronu předpověděl, že k elektronu musí existovat antičástice s kladným nábojem; tato částice byla nazvána POZITRON. Dále v tomto roce objevili Bothe a Becker záření neutrálních částic vznikající při bombardování lehkých prvků částicemi α . Tyto neutrální částice identifikoval v roce 1932 J. Chadwick jako NEUTRONY.

Existenci NEUTRINA jako částice bez elektrického náboje s nulovou hmotností předpokládal v roce 1930 W. Pauli, který touto hypotézou vysvětlil záhadu rozpadu β (jaderná přeměna). Podle zákona zachování energie by každá částice β emitovaná jádrem při β -rozpadu měla mít stejnou energii podobně, jako je tomu při α -rozpadu. Měření ukazovala, že energie částic β nabývá hodnot od nuly až po jistou maximální energii Q charakteristickou pro daný rozpad. Pauli tedy předpokládal, že zbylou energii odnáší neutrino a součet energie β -částice a neutrino je roven Q . Neutrino lehce procházejí hmotou, dokonce i Země je pro ně „průhledná“. Jejich detekce je nesmírně těžká, a proto první neutrino byla zachycena speciálními detektory až v roce 1953 F. Reinesem a C. J. Cowanem.

MEZONY předpověděl Hideki Yukawa v roce 1935 jako ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE umožňující vzájemné silové působení mezi nukleony v jádře atomu. Mezonům přisoudil nenulovou klidovou hmotnost, protože silové pole, jehož kvanta jsou hmotné částice, dává síly krátkého dosahu na rozdíl od fotonů, kde jejich nulová hmotnost má za následek elektromagnetické síly působící „do dálky“. Původní předpoklad, že zprostředkující částice by mohl být elektron, vedl ve výpočtech k jaderným silám o velikosti 10^{10} krát menší než síly pozorované. Proto hmotnost mezonu, kterou vypočetl Yukawa, je přibližně 230krát větší než hmotnost elektronu. Mezony byly poprvé objeveny v kosmickém záření v roce 1937.

Fyzika ve třicátých letech 20. století znala proton, elektron, neutron, pozitron, neutrino a mezon. Kvantová teorie s jejich pomocí úspěšně vysvětlovala strukturu atomu, jádro atomu, α - i β -rozpad. Tyto částice fyzikové považovali za elementární, tj. základní stavební prvky atomových jader a atomů, které nejsou složeny z menších částic. Postupně však byly nalezeny další a další částice, nejprve v kosmickém záření, později při srážkách protonů, elektronů a jiných částic urychlených na vysoké energie v URYCHLOVAČÍCH. Dále se zjistilo, že některé částice považované za elementární se rozpadají na jiné částice, a objevila se otázka, které částice sou vlastně elementární. V současné době zná fyzika kolem 280 částic. FUNDAMENTÁLNÍ neboli ZÁKLADNÍ se nazývají částice, které nemají vnitřní strukturu, tj. nejsou složeny z jiných částic. Přitom se i tyto částice mohou při srážkách proměňovat v jiné částice. Název „elementární částice“ zůstal vyhrazen pro ostatní mikročástice; terminologie zde není sjednocena.

POZITRON objevil Carl Anderson v kosmickém záření v roce 1932. Při setkání elektronu s pozitronem (tj. hmoty a antihmoty) dochází k ANIHILACI: elektron s pozitronem zaniknou, přičemž vzniknou dva fotony o energii $m_e c^2 = 0,51 \text{ MeV}$ (m_e je klidová hmotnost elektronu).

Objev NEUTRONU

V roce 1930 zjistili Bothe a Becker, že při bombardování lehkých prvků (Be, B, Li) částicemi α vzniká pronikavé záření částic bez náboje o energii 5 MeV. Irene a Frederic Joliot-Curie v roce 1931 zjistili, že tyto částice (o nichž se předpokládalo, že jsou to fotony) předávají při srážkách jádrům vodíku tak velikou hybnost, že jejich energie by musela být 50 MeV. Tento paradox rozřešil v roce 1932 J. Chadwick. Vypočetl (podle zákonů zachování energie a hybnosti) hmotnost těchto částic, která byla rovna přibližně hmotnosti protonů, a stal se tak objevitel neutronu.

Elektrodynamika vysvětlovala vzájemné silové působení elektricky nabitých těles pomocí elektromagnetického pole, které je tvořeno fotony.

Kvantová elektrodynamika vysvětlila vzájemné silové působení dvou elektronů jako interakcí pomocí fotony nelze detekovat, protože jsou emitovány jedním elektronem a okamžitě zachyceny druhým elektronem.

Fotony umožňující vzájemné silové působení dvou elektrických nábojů se nazývají ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE.

Existenci zprostředkující částice se dnes ve fyzice vysvětluje jakékoliv silové pole umožňující silové působení mezi hmotnými částicemi. Podobný princip „zprostředkující částice“ platí kupř. u kopané, kde hráče „drží pohromadě“ skutečnost, že si „vyměňují“ míč.

[10]

Příloha 2

Články zabývající se spuštěním pokusu Velkého třesku.

V obřím urychlovači chystají simulaci Velkého třesku.

Pohlí to svět, varují kritici

Vědci z Evropské organizace pro jaderný výzkum (CERN) se v úterý pustí do údajně největšího fyzikálního experimentu všech dob. V obřím podzemním prstencovém urychlovači u švýcarské Ženevy se pokusí simulovat podmínky Velkého třesku, jímž podle současných teorií před 13,7 miliardy let začalo pozorovatelné rozpínání vesmíru. Odpůrci experimentu se obávají vzniku černých děr, které pohlí svět.



Podzemní část obřího urychlovače částic LHC
FOTO: fotobanka Profimedia

pondělí 29. března 2010, 9:41 - Ženeva

Ve velkém urychlovači nejmenších částic (LHC) má v úterý začít klíčová fáze pokusů. Cílem je vyvolat srážky nejmenších částíček hmoty. Vědci do obřího tubusu

vpustí dosud rekordní množství energie a pokusí se tak napodobit podmínky, při nichž se zrodil vesmír.

Rekordní energie

Dva paprsky částic nyní v prstenci kolují energií 3500 miliard elektronvoltů (3,5 teraelektronvoltů; 3,5 TeV), což je dosavadní světový rekord. Energie bude v následujících dnech zvyšována. "První pokus s kolizemi o síle 7 TeV (3,5 TeV na každý paprsek) je plánován na 30. března," uvedl CERN. Elektronvolt odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu.

"Než vyvoláme srážky, může to trvat hodiny nebo dokonce dny," upozornil podle agentury Reuters generální ředitel CERN Rolf Heuer. "Už jenom setkání paprsků je samo o sobě výzva: je to tak trochu jako vypálit z obou břehů Atlantiku jehly tak, aby se v polovině cesty srazily," přiblížil obtížnost experimentu technologický ředitel CERN Steve Myers.

"Malý Velký třesk" má odhalit temnou hmotu

Každá ze srážek nejmenších částic má vytvořit jakýsi "malý velký třesk" poskytující údaje, které budou tisícovky vědců analyzovat v příštích letech.

Jakmile budou vysokorychlostní srážky spuštěny, měly by podle plánů nepřetržitě pokračovat 18 až 24 měsíců s výjimkou údajně krátké technické odstavky na konci tohoto roku.

LHC má umožnit nový pohled na podstatu hmoty a vesmíru. Vědci si od experimentu slibují odhalení takzvané temné či skryté hmoty, jejíž existence nikdy nebyla prokázána.

Odborníci se domnívají, že dosud známe jen pět procent vesmíru a neviditelný zbytek tvoří právě skrytá hmota, zhruba čtvrtina vesmíru, a skrytá energie, 70 procent. "Pokud se nám podaří odhalit skrytou hmotu, naše znalosti budou zahrnovat 30 procent vesmíru, což by znamenalo obrovský pokrok," řekl Heuer. ,

Odpůrci experimentu se obávají konce světa

Experimenty v LHC vyvolávají od prvního spuštění urychlovače v srpnu 2008 i obavy, někdy až apokalyptických rozměrů. Někteří skeptikové tvrdí, že srážky nejmenších částic atomu vytvoří černou díru, která pohltí celou Zemi.

Jistá Němka se kvůli tomu dokonce obrátila na německý ústavní soud s požadavkem ukončit účast Německa na experimentech v LHC. Soud stížnost zamítl s poukazem na nedostatek důkazů.

Podstatnou část LHC tvoří 27 kilometrů dlouhý prstencový tubus v hloubce asi 100 metrů pod povrchem země. Jeho část zasahuje do Francie.

Článek z [www: http://www.novinky.cz/zahranicni/evropa/196063-v-obrim-urychlovaci-chystaji-simulaci-velkeho-tresku-pohliti-to-svet-varuji-kritici.html](http://www.novinky.cz/zahranicni/evropa/196063-v-obrim-urychlovaci-chystaji-simulaci-velkeho-tresku-pohliti-to-svet-varuji-kritici.html)

Konec světa se nekoná, CERN oslavuje první srážky protonů s rekordní energií

Přes výpadek, který postihl zahájení simulace velkého třesku při zrození vesmíru ve velkém urychlovači částic u Ženevy, skončila první fáze experimentu úspěchem. Vědci z Evropské organizace pro jaderný výzkum (CERN) si v řídicí místnosti zatleskali poté, co zaznamenali první srážky protonů. Očekává se, že experiment umožní nový průlom ve fyzice.

úterý 30. března 2010, 11:34 – Ženeva
(Aktualizováno: úterý 30. března 2010, 13:44)

Konec světa, před kterým varovali odpůrci pokusů v obřím podzemním urychlovači částic u Ženevy, se nekonal. Obavy, že experiment povede k vytvoření hmoty pohlcujících černých děr, se ukázaly jako neopodstatněné.

Ve velkém urychlovači nejmenších částic (LHC) tak v úterý začala klíčová fáze pokusů. Fyzikům se podařilo v urychlovači vyvolat srážky nejmenších protonů. Vědci do obřího podzemního tubusu vpustili dosud rekordní množství energie, aby tak napodobili podmínky, při nichž se zrodil vesmír.

"Je to velmi komplikované zařízení a výpadky nejsou neobvyklé," uvedl Michael Barnett z laboratoře v Berkeley, který tak komentoval počáteční výpadek, kdy se podle informací paprsky ztratily.

Ztracené paprsky v prstenci kolovaly již deset dní s energií 3500 miliard elektronvoltů (3,5 teraelektronvoltů; 3,5 TeV), což je dosavadní světový rekord. Energie se má v následujících dnech zvyšovat.

Článek z www: <http://www.novinky.cz/zahranicni/evropa/196216-konec-sveta-se-nekona-cern-oslavuje-prvni-srazky-protonu-s-rekordni-energii.html>