

Alice Valkárová

Metody a techniky ve světě fyziky částic

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 47 (2002), No. 4, 280--286

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141143>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2002

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



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

Metody a techniky ve světě fyziky částic

Alice Valkárová, Praha

Doby, kdy si fyzik sestrojil s pomocí několika drátů a jednoduchých součástek přístroj, který byl schopen prověřit jeho fyzikální nápad, jsou již v nenávratnu. Přitom to není zase tak dávno, kdy se opravdu daly zásadní objevy ve fyzice udělat s pomocí velmi skrovného experimentálního vybavení. Tak např. F. Běhounek prováděl ještě v třicátých letech minulého století základní výzkumy v oblasti kosmického záření pouze s jednoduchým lístkovým elektrometrem. Situace, kdy od dobrého nápadu k realizaci nevedla dlouhá cesta, se ale dnes radikálně změnila. Nápady sice ani dnes nechybějí, ale cesta od nápadu k experimentálnímu prověření se stala nesmírně trnitou. Platí to ve všech oblastech fyziky, v některých je však tato tendence ještě nápadnější než v jiných. Oblastí, která vyžaduje nyní jedny z nejvyšších investic, a to takových, že nezřídka ani velmi bohatý stát nemá dostatek prostředků, aby si na financování takového projektu troufl sám, je zejména oblast fyziky vysokých energií.

Chceme-li prověřovat teorii (v tomto případě kvantovou chromodynamiku nebo teorii elektroslabých interakcí) nebo chceme-li najít ještě něco nového nad rámec těchto teorií, musíme studovat jevy probíhající na velmi malých vzdálenostech. Menší a menší vzdálenosti znamenají ale vždy větší a větší energie srážejících se částic. Lze to ostatně jednoduše ilustrovat jednoduchým příkladem z naší každodenní zkušenosti. Chceme-li zkoumat ořech, můžeme se sice o něm něco dozvědět, když do něho zlehka štouchneme (např. jaký má tvar anebo jak je těžký), ale daleko více se o něm dozvíme, když do něho pořádně uhodíme kladivem, rozbijeme ho a můžeme se podívat, co je uvnitř.

Urychlit částice na vysoké energie a přivést je do místa, kde se srazí s jinou částicí, je možné jen s pomocí nákladných technických zařízení, **urychlovačů částic**. Urychlovače částic doznaly během 20. století obrovský technický rozvoj. Od původních zařízení rozměrů řádově metrů pracujících v jedné místnosti zbytněly do podoby obrovských kolosů umístěných v podzemních tunelech o délkách kilometrů až desítek kilometrů. Původní urychlovače, v nichž se urychloval jeden druh částic a ten se pak nechal dopadat na částice terčíku, který byl v klidu, se od 60. let postupně nahrazovaly daleko efektivnějšími urychlovači (z hlediska energie, která je k dispozici při interakci), ve kterých se urychlují na kruhové dráze oba svazky (buď v jedné trubici, např. pro elektron-pozitronové svazky, nebo ve dvou různých trubicích) a nechávají se čelně srážet. Těmto urychlovačům se říká urychlovače vstříčných svazků — **collidery** (český název srážec se zatím moc neujal).

Jestliže se „fyzikou vysokých energií“ nazývala někdy v polovině 20. století fyzika pracující s částicemi o energii několika GeV ($1 \text{ GeV} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$), nyní se oblast „fyziky vysokých energií“ přesunula do stovek až tisíců GeV ($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$) a jistě

RNDr. ALICE VALKÁROVÁ, DrSc. (1947), Ústav částicové a jaderné fyziky, MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

ani to ještě není žádný konec. Postavíme-li však takový nákladný urychlovač částic (cena urychlovače protonů a elektronů HERA v Hamburku, uvedeného do provozu v r. 1992, byla asi 100 milionů DEM), nemáme ještě zdaleka vyhráno. Další podstatnou investicí jsou náklady spojené se stavbou **detektorů** — aparatur, které jsou umístěny tam, kde se dráhy vstříčných svazků pod malými úhly protínají a kde dochází k jejich interakcím. Většinou má urychlovač takových míst víc, není to ale zbytečná duplicita, jak by se snad mohlo zdát, a to i když většina aparatur si je velmi podobná. Pokud by totiž bylo něco nového objeveno, je velmi důležité, aby se takový objev potvrdil i na jiném, ale podobném zařízení, na stejném urychlovači. Stavba urychlovače, stejně jako stavba detekčních zařízení na něm umístěných, trvá od počátku projektu až do jeho realizace typicky asi 10 let. Vzhledem k tomu, že ani urychlovače, ani aparatury na svazcích urychlovačů nejsou žádnou levnou záležitostí, je potřeba slučovat finanční prostředky i lidské zdroje čirá nezbytnost. Proto se současná fyzika částic neobejde bez široké mezinárodní spolupráce mnoha fyziků, inženýrů a techniků, pocházejících z mnoha světových výzkumných ústavů a univerzit.

Jedním z takových mezinárodních středisek je např. Evropská laboratoř fyziky částic v Ženevě — CERN, jehož členem je naše republika od r. 1993. Další laboratoři, kde probíhá výzkum za účasti českých fyziků, je německá národní laboratoř v Hamburku — DESY a v USA např. Fermiho národní laboratoř v Batávii. Všechny tyto laboratoře mají světově unikátní urychlovače částic, kolem nichž se soustřeďuje výzkum. V CERNu to byl do nedávné doby (r. 2000) urychlovač vstříčných svazků elektronů a pozitronů LEP s energií $90 + 90$ GeV, v jehož tunelu se nyní staví nový urychlovač LHC (Large Hadron Collider), kde se budou srážet dva svazky protonů s energií $7 + 7$ TeV. V DESY se nachází největší současný urychlovač vstříčných svazků elektronů s energií 28 GeV a protonů s energií 920 GeV a v laboratoři Fermilab vstříčné svazky protonů a antiprotonů, každý s energií 900 GeV.

Detektory na všech těchto urychlovačích částic jsou zkonstruovány tak, aby zaregistrovaly a změřily pokud možno všechny částice, které vznikly při srážce obou svazkových částic (to mohou být elektron + pozitron, elektron (pozitron) + proton nebo proton (antiproton) + proton). Ideální a univerzální detektor, který by přesně zaregistroval a změřil charakteristiky všech možných částic, které vznikají v interakci (jsou to většinou piony, protony, neutrony, miony, rezonance, neutrina), bohužel neexistuje. Proto se používá různý způsob registrace různých částic a v důsledku toho má detektor „cibulovou“ strukturu — skládá se z mnoha vrstev subdetektorů. Schéma těchto struktur je ovšem u většiny detektorů podobné.

Nejblíže vrcholu interakce se umísťují zpravidla páskové křemíkové polovodičové detektory. Je to proto, že mají velmi vysoké prostorové a impulsové rozlišení a malou hmotnost (malá hmotnost je důležitá proto, aby sekundární interakce v nich příliš neovlivňovaly měření v dalších, vzdálenějších slupkách detektoru). Tyto detektory měří směr pohybu a hybnost nabitých částic. Další slupku mohou tvořit ještě tzv. dráhové drátové komory, které zviditelňují a umožňují měření a rekonstrukci nabitých drah dále od vrcholu. Vnitřní dráhové detektory jsou umístěny v silném magnetickém poli solenoidu. Z velikosti zakřivení drah částic lze měřit jejich hybnost a z orientace zakřivení i náboj. Za dráhovými detektory se pak nachází hlavní a nejrozměrnější

struktura detektoru, kterou je tzv. **kalorimetr**. Zatímco předchozí vrstvy nevyužívají při detekci destruktivních metod (částice je sice změřena, ale je žádoucí, aby neztratila svou identitu a nebyla pohlcena), kalorimetry mají naopak za cíl úplně pohltit částice tak, aby mohla být změřena jejich energie. Blíže k urychlovací trubici se nachází elektromagnetická část kalorimetru (má za úkol detekovat zejména elektrony a fotony) a dále pak hadronová část (detekuje silně interagující částice, jako jsou např. piony a kolimované skupiny takových částic nazývané jety). Kalorimetry jsou tvořeny většinou pasivními a aktivními vrstvami, v pasivních (zpravidla ocel nebo olovo) dochází k rozvoji elektromagnetické spršky. V aktivních vrstvách (scintilátory, tekutý argon apod.) se pak měří energie vzniklých sekundárních částic (na základě excitace atomů prostředí nebo jejich ionizace) a tak se rekonstruuje energie původní částice. Kalorimetr musí mít dostatečnou granularitu — zrnitost, aby bylo možné měření s vysokým prostorovým rozlišením. Zároveň je ale třeba volit kompromis, protože příliš velké množství elektronických kanálů by mohlo neúměrně zvýšit cenu už i tak nákladného zařízení. Kalorimetr má několik výhod: může jednak detekovat i neutrální částice a jednak se relativní přesnost měření energie primární částice s rostoucí energií zlepšuje!

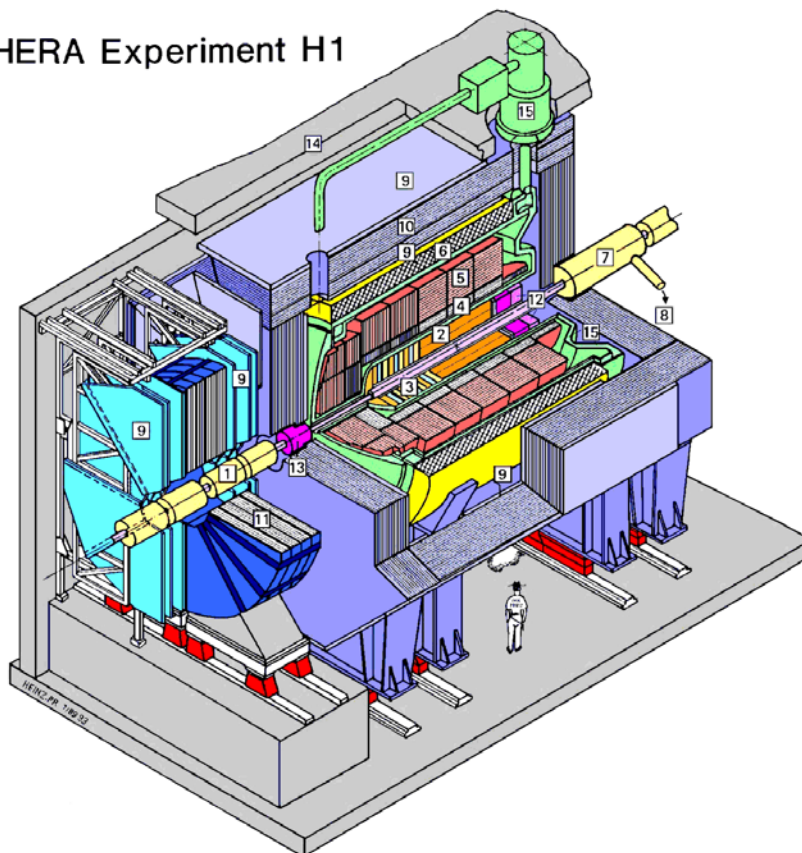
Ty částice, které se ani po průchodu hadronovým kalorimetrem nepohltily, jsou zpravidla slabě interagující miony a neutrina. Ionizující dráhy mionů jsou vidět pak v další vrstvě detektoru — mionových komorách. Neutrina, která jsou schopna projít bez interakce celou zeměkoulí, nevidíme samozřejmě vůbec, ale z měření tzv. chybějící energie můžeme nejenom usoudit, že v interakci vznikla, ale můžeme i přibližně spočítat jejich energii a směr pohybu.

U všech těchto subdetektorů se kladou velmi vysoké nároky na jejich spolehlivost, která musí být srovnatelná se spolehlivostí zařízení vyslaných kosmickými sondami do vesmíru. Ani tady totiž není možné po uzavření celého detektoru a jeho umístění do svazku cokoliv na zařízení ještě opravovat. S opravami se musí počkat do dalšího zastavení urychlovače, což může být třeba až za půl roku nebo i později. Kalorimetr s tekutým argonem, umístěný v kryostatu, který je součástí experimentu H1 v DESY, nebyl otevřen a tedy nemohl být ani opravován od r. 1992.

Při srážkách dvou částic s energií řádově desítek nebo stovek GeV se produkuje velké množství částic v různých procesech. Míra pravděpodobnosti, že proběhne určitý typ interakce, je dána **účinným průřezem**, který má rozměr plochy a měří se v barnech ($1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$). V místě interakce dochází ke srážkám velmi často — důležitou veličinou charakteristickou pro každý urychlovač je časový interval určující periodicitu střetu balíků svazkových částic. Pro urychlovač HERA to je 96 ns a pro plánovaný urychlovač LHC to bude neuvěřitelných 25 ns.

Zapsat ale všechny interakce zaznamenané v detektoru na média není možné z kapacitních důvodů. Kromě toho je třeba mít na zřeteli, že kromě „užitečných“ interakcí se v detektorech registrují i některé zcela nežádoucí procesy, kterým se říká pozadí. Mezi procesy pozadí patří např. proces, kdy jedna částice svazku interaguje s molekulou zbytkového plynu v urychlovací trubici (i proto je velice žádoucí, aby v trubici bylo velmi vysoké vakuum) v blízkosti místa, kde se svazky protínají, anebo detektorem procházejí vertikálně miony z kosmického záření atd. Nesmíme také zapomínat na

HERA Experiment H1



Obr. 1. H1 detektor na urychlovači HERA. Dobře je vidět slupková struktura detektoru, nejbližše svazkům se nacházejí dráhové komory, pak elektromagnetický a hadronový kalorimetr umístěný v kryostatu, nejdále mionové komory. V tomto případě, kdy protony mají mnohem větší energii než elektrony, je detektor asymetricky uspořádán, aby se dosáhlo lepší kvality měření ve směru letu protonu, kam letí většina částic po interakci.

to, že velkou část účinného průřezu reprezentují fyzikální procesy, které sice nejsou přímo pozadím, ale je to „nudná“ fyzika, které už velmi dobře rozumíme z předešlých experimentů a kterou se nechceme tudíž vůbec zabývat. Interakce toho typu by nám ale mohly nakonec úplně zahltit naše registrující média. Proto je nutné provést v reálném čase výběr interakcí, které nás zajímají a které se budou dále zpracovávat — k tomu slouží tzv. **trigger**. Skládá z několika úrovní: na první úrovni se provede použitím údajů z několika rychlých subdetektorů předvýběr interakcí, které se zapisují a předávají triggeru další úrovně. V době zapisování není detektor schopen detekovat další interakce a začíná „mrtvá doba“ detektoru (typická mrtvá doba může představovat 10% z celkové doby). Triggery několika úrovní mají za cíl silně eliminovat pozadí (až faktorem 10^7) a zredukovat nezajímavé fyzikální procesy tak, abychom získali co nejčistší soubor pro nás zajímavých interakcí. Není třeba zdůrazňovat, že k tomu je

třeba alespoň přibližně vědět, jak mají ty „zajímavé“ interakce v detektoru vypadat! Jak to ale můžeme vědět?

Teorie zvaná **kvantová chromodynamika** je podle našich současných vědomostí schopna popsat správně procesy silných interakcí probíhající na úrovni partonů (tj. kvarků a gluonů). Jistou, zatím exaktně neřešenou obtíž představuje přechod od partonů (které přímo nepozorujeme) k hadronům, které jsme schopni měřit. Abychom popsali proces hadronizace — přechodu od partonů k hadronům, musíme se uchýlit k různým fenomenologickým modelům, které jsou schopny popsat to, co pozorujeme. K takovému popisu interakcí ve fyzice částic používáme většinou tzv. **modely Monte Carlo**. Model Monte Carlo je program ke spočítání účinného průřezu specifického procesu v definované kinematické oblasti. Při integraci používá generátor náhodných čísel — odtud název Monte Carlo. V modelu Monte Carlo je obsažena naše teoretická znalost, jak probíhá proces na partonové úrovni (v nejnižším řádu poruchové teorie). Pro hadronizaci, tj. přechod od partonů k hadronům, nemůžeme použít kvantovou chromodynamiku, a proto se do programů Monte Carlo zadává v podobě fenomenologických modelů (nejčastěji se používá tzv. lundský model).

Výsledkem generace případu metodou Monte Carlo je **úplná** informace o čtyřimpulsu **všech částic** vyletujících z interakce. Je třeba mít ovšem na zřeteli, že když analyzujeme informaci z detektoru, nemáme zdaleka úplnou informaci o všech částicích. Důvodem je to, že každý detektor má spoustu tzv. mrtvých oblastí, kde se mohou částice pohltit, aniž by byly detekovány. Jsou to třeba mezery mezi moduly kalorimetru, kudy vedou různé kabely, je to svazková trubice, solenoid, různé nosné konstrukce apod. Kromě toho některé částice mohou zmizet nedetekovány ve svazkové trubici, některé kanály detektorů mohou, ať už dočasně, nebo trvale, špatně pracovat.

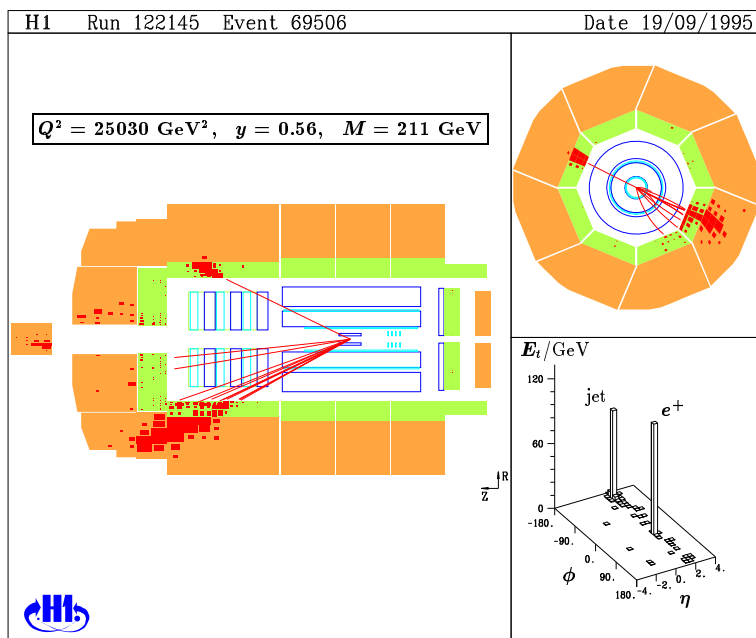
Standardní postup je tedy takový, že se interakce, které byly nagenеровány programy Monte Carlo, propustí programy (program GEANT) s přesně stejnou geometrií, jakou má reálný detektor. Putujeme pak s každou částicí detektorem, díváme se, jakým materiálem právě prochází, a na základě toho generujeme spršky. Snažíme se tedy sledovat přesně, co se s každou částicí stane a kdy a kde se pohltí. Výsledkem takové simulace umělých interakcí je pak odezva v přesně stejném formátu, v jakém získáváme reálná data v reálném detektoru.

Po rekonstrukci (používáme opět přesně stejný program jako pro data) máme dva soubory interakcí (každý obsahující typicky několik tisíc až milionů případů). Jeden soubor je soubor naměřený (data) a druhý nagenеровaný s použitím modelů, v nichž jsou založeny všechny naše současné teoretické znalosti o probíhajícím procesu. Oba tyto soubory analyzujeme identickými programy a pak srovnáme výsledky. Pokud jsou výsledky různé a jsme-li přesvědčeni, že jsme prováděli vše správně (a podaří-li se nám o tom přesvědčit i ostatní spolupracovníky), můžeme vyvodit, že teoretické předpoklady založené v modelu Monte Carlo neodpovídají skutečnosti.

Toto je sice trochu zjednodušený¹⁾, ale v podstatě správný popis, jakými krůčky postupujeme, chceme-li získat nová fakta potvrzující nebo vyvracející nějakou naši

¹⁾ Neuvedla jsem tady, že modely Monte Carlo používáme i pro nezbytné korekce dat, které mají za cíl odstranit efekty rozlišení a efekty způsobené neúplným prostorovým pokrytím detektorů atd.

Candidate from NC sample



Obr. 2. Počítačové zobrazení srážky elektronu s energií 28 GeV s protonem 820 GeV v bočním a příčném pohledu a jako „lego“ zobrazení. Odražený elektron letící na obrázku nahoru je detekován dráhovými komorami a v elektromagnetickém kalorimetru jako soubor klastrů. Naproti letící jet zanechává stopy v dráhových detektorech a klastry v elektromagnetickém a hadronovém kalorimetru. Z příčného pohledu i z lego zobrazení je vidět, že elektron i jet letí proti sobě a mají přibližně stejnou energii. Takové interakce slouží ke studiu struktury protonu.

teoretickou představu. Pro určení účinného průřezu nějakého procesu si musíme být nejenom jisti tím, že v našem datovém souboru už nemáme žádné procesy pozadí, ale musíme ještě mít správně spočtenou efektivitu triggeru a akceptanci detektoru. Je tedy evidentní, že experimentální bádání ve fyzice vysokých energií vyžaduje spoustu specializovaných znalostí, dobrou znalostí detektoru počínaje a dobrým pochopením teorie konče. Není tedy divu, že práce na experimentech v částicové fyzice je prací vysoce kvalifikovaných týmů lidí.

Jestliže v 50. letech pracovalo na jednom experimentu v průměru několik desítek lidí, v 90. letech to byly už stovky lidí a na experimentech plánovaných na budoucím urychlovači LHC v CERNu to bude již více než tisíc lidí. Z toho je zřejmé, že v takových rozměrných kolektivech je velmi důležitá jak dobrá organizační práce a dobrá informovanost celé skupiny, tak i manažerské schopnosti vedoucích odborníků.

Výsledky bádání ve fyzice vysokých energií nemají v současné době žádný bezprostřední význam pro aplikace. Bude ještě bezpochyby dlouho trvat, než bude možné některé naše znalosti využít v praxi, zatím je dost obtížné si něco takového vůbec

představit. Na druhé straně má však tento výzkum v oblasti detekčních technik a počítačů nezanedbatelný význam pro různé nepřímé aplikace. Při vyvíjení detektorů a urychlovačů totiž velmi často posouváme naše současné hranice technických možností. Některými z aplikací, jejichž užitečnost lze jen stěží zpochybnit, je např. využití urychlovačů k ozařování nádorů v medicíně, využití drátových proporcionálních komor vyvinutých G. Charpakem pro experimenty v CERNu (dostal za ně Nobelovu cenu) jako detektorů rentgenového záření, ale to nejsou zdaleka jediné aplikace. Málokdo si např. už dnes uvědomuje, že také internet je jedním z výtěžků lidí kolem fyziky částic (začal se používat na začátku 90. let v CERNu).

A co nás čeká v budoucnosti? Jakým směrem povede další technický rozvoj? Urychlovačem LEP dosáhly kruhové urychlovače vstřícných svazků elektronů a pozitronů už hranic svých možností. Je to dáno tím, že nabitá částice pohybující se v magnetickém poli po kruhové dráze vyzařuje tzv. brzdné záření, jehož intenzita je přímo úměrná energii a nepřímo úměrná kvadrátu poloměru kružnice a čtvrté mocnině hmotnosti částice. Pro elektronové (pozitronové) urychlovače tedy hrají ztráty energie způsobené synchrotronovým zářením s rostoucí energií klíčovou roli (pro urychlovač LEP byly ztráty energie na jednu částici 2000 GeV/s)! A tak ačkoliv existující tunel bývalého urychlovače elektronů a pozitronů v CERNu může být použit jako tunel pro urychlování protonů a je nyní přestavován na urychlovač LHC, urychlovače elektronů a pozitronů s energií vyšší, než měl LEP, už budou muset být lineární. Lineární urychlovače se sice nepotýkají s brzdným zářením, ale donedávna bylo limitující obtíží vytvoření velmi vysokého gradientu pole při urychlování (asi 25 MV/m). Na rozdíl od kruhového urychlovače, kde částice přilétá do téhož rezonátoru mnohokrát a pokaždé může být trochu urychlena, v lineárním urychlovači prochází každým rezonátorem jen jednou.

V současné době se uvažuje o několika takových projektech lineárních urychlovačů elektronů v USA, Německu, Japonsku a CERNu, z nichž zatím nejpropracovanější a nejlépe připravený se zdá projekt německé laboratoře DESY v Hamburku, nazvaný TESLA (Tera-electronvolt Energy Superconducting Linear Accelerator). Urychlovač TESLA by měl mít délku podzemního tunelu přes 33 km a urychlovat elektrony a pozitrony na energii 500 + 500 GeV. Kromě základního výzkumu by měl skýtat i mnoho možností aplikovaného výzkumu s pomocí sekundárních svazků a laserových svazků. Tento projekt, podporovaný opět velmi širokou mezinárodní spoluprací, by měl být posouzen a eventuálně schválen během tohoto roku. Už nyní se však na přípravě projektu a testování některých detekčních metod podílejí fyzici z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy a z Fyzikálního ústavu AV ČR. Předpokládá se, že pokud bude projekt tohoto urychlovače nové generace schválen, mohl by být uveden do provozu už v r. 2010.