

# **Gyorsítók a részecskefizikában**

*Vesztergombi György*

**CERN-HST2006**

*Genf, 2006, augusztus 20-25.*

## Bevezetés a kísérleti részecskefizikába

Ha valaki látott már közelről egy modern nagyenergiájú részecskegyorsítót, akkor bizonyosan elámult annak hatalmas méretein és áttekinthetetlenek tűnő bonyolultságán, így azt valami egészen kivételes, különös jelenségnek tartja. Eközben fel se merül benne, hogy a valóságban egyik legközönségesebb mindennapi eszköztől van szó, hiszen a TV képernyője, illetve a számítógép (képcsöves) monitorja sem más, mint egy-egy komplett részecske gyorsító, amely tartalmazza a tudományos csúcsrendszerének minden lényeges alapelemét:

- a) részecske forrás (elektronok repülnek ki az izzított katódból), és a kb. 20 kV -os elektromos tér adja a gyorsító erőt;
- b) a nyalábvezérlő és fókuszáló mágnes tér ( bár ez a képcsöbéli viszonylag alacsony energiákon elektromos térrel is megoldható, az analógia egyértelműsége érdekében korlátozódjunk most a mágneses esetre );
- c) a céltárgy szerepét a képcső ernyője játssza, amelybe ütközve a felgyorsult elektronok másodlagos részecskéket, fotonokat generálnak, amelyek végülis a szemben és agyban a látható kép érzetét keltik.

Nagyenergiákon az alapelv pontosan ugyanaz, csak éppen a részletek változnak a kutatási céloknak megfelelően. Ahhoz, hogy a távolinak tűnő LHC utáni jövőbeli gyorsítók újszerűségét kellően értékelni tudjunk, szükség van arra, hogy egy kicsit részletesebben megvizsgáljuk ezen alapelvek alkalmazását a jelenlegi rendszerekben. Minden gyorsító az ion- vagy elektron-forrással kezdődik, mivel ez a végenergiától független, ezért most ezzel a témával nem foglalkozunk. Annál fontosabb, hogy megértsük magának a gyorsítási folyamatnak a lényegét. Itt több olyan alapvető körülményt kell figyelembe venni, amely sajnos döntően behatárolja a variációs újítási lehetőségeket. Egyrészt csak olyan részecskét lehet gyorsítani, amelynek az élettartama legalább elegendő arra, hogy az a rendszeren végig fusson. Ez a feltétel látszólag fölöslegesnek tűnik, de mindjárt átérezzük majd ennek a fontosságát, ha pionokat vagy müonokat próbálunk gyorsítani. Másik ilyen triviális feltétel, amelyet nem árt tudatosítani: csak elektromos térrel és csak töltött részecskét lehet gyorsítani.

Gravitációs térrel elvileg lehetne semleges részecskét is gyorsítani, de valószínűleg a következő évszázad folyamán még nem leszünk abban a helyzetben, hogy az ehhez szükséges erősségű gravitációs tereket létrehozzuk. A magerők erőssége nem kétséges, hiszen nagyságrendekkel meghaladja az elektromos térerősséget, csak sajnos ezek hatótávolsága pusztán az atommag méreteire terjed ki. Külön fontos megjegyezni azt a tényt, hogy szűkebb értelemben gyorsítani mágneses térben nem lehet, mert a Lorentz-erő amely a részecske sebességéből és a mágneses térerő szorzatából adódik csak a részecske repülési irányát képes megváltoztatni, de a sebesség abszolút értékét és így az energiáját nem.

Mivel általában egységnyi töltéseket gyorsítunk az elektromos térben, ezért természetes, hogy az energiaegységnek az elektron Voltot vezetjük be, amely egyenlő azzal az energiával, amelyet egy elektron 1V potenciálkülönbség befutása után nyer. Hogy ez valóban milyen kényelmes mindennapi érték, azt jól jellemzi, hogy kb. ekkora gyorsítást érhetünk el, ha egy 1,5V-os ceruzaelem két vége között futtatunk át egy elektront vagy egy protont. Jegyezzük meg, hogy a nyert energia csak a töltéstől függ, a tömeg nem számít, vagyis a nagyenergiájú részecske is 1V feszültségkülönbség befutás után 1 eV plusz energiát nyer, bár közben lehet, hogy a tömege már az eredetinek, az ún. nyugalmi tömegnek ezerszeresére nőtt. A speciális relativitás elmélet miatt ugyanis a sebessége nem nőhet minden határon túl, ezért a nagyenergiákon nem a sebesség, hanem a tömeg nő. Azt mondjuk, hogy a nagyenergiájú, azaz a "relativisztikus" részecskék gyakorlatilag mind fénysebességgel repülnek. A továbbiakban ezt mindig fel is tételezzük, bár persze tudjuk, hogy azért egy icipicit mindig  $c$  alatt maradnak, mert csak a fotonokról tudjuk biztosan, hogy egzaktul fénysebességgel mennek függetlenül attól, hogy 1 eV körüli (látható fény) vagy 100 MeV-es ( akár 1 TeV - es) gamma kvantumokról van szó.

## *1. Lineáris Gyorsító*

A klasszikus katódsugárcsőben a kb. 20 kV-os gyorsító elektromos teret a katód és ernyő között létesített statikus tér hozza létre. A döntő különbség a modern részecske gyorsítóban ehhez képest az, hogy a gyorsítást időben igen gyorsan változó, nagyfrekvenciás elektromos térrel hozzák létre. Ez valóban egy hihetetlenül nagy trükk, hiszen ez teszi lehetővé, hogy akár elvileg végtelen nagy gyorsítófeszültséget is létrehozassunk. A korábbi gyorsítóban abszolút korlátot jelentett, hogy semmilyen körülmények között nem lehet néhány millió Voltnál nagyobb feszültségkülönbséget fenntartani. A trükk cselességét a következőképpen lehet szemléltetni. Vegyünk végtelen számú +1 Voltos elemet, amelyeket felváltva (+1,-1, ..... ) polaritással rákötünk a tengelyre merőlegesen álló kondenzátorok lapjaira, amelyek közepén egy kis lyuk van a részecskéknek az áthaladására. Ha a  $t = 0$  - ban az elektron egy adott cellában van, akkor ott a térerő gyorsítja, és  $t = +1$  - kor ér a cella végére, ekkor hirtelen megfordítjuk az elemek polaritását, így a következő cellában megint gyorsító teret talál a részecske, és  $t = 2$  - kor már 2 eV-al nagyobb lesz az energiája. " n " cella befutása után az energiája neV

lesz vagyis úgy érhetünk el akármilyen nagy eV-nyi energiát, hogy a rendszerben sehol sem lép fel  $\pm 1$  V-nál nagyobb feszültségkülönbség !

A csoda az, hogy ez gyakorlatban meg is valósítható, ha az 1V-os egyedi cellák helyett rádiófrekvenciás "haladó hullámot" indukálunk a gyorsító elektródái között. Ezen a hullámon "szörföznek" a gyorsítható részecskék. A mai gyorsítóknak kb. 250 MHz-es rövidhullámokat használunk az úgynevezett üregrezonátorokban.

## 2. Cirkuláris Gyorsító

A fenti elven működő lineáris gyorsítókkal elvileg akármekkora energia elérhető, de gyakorlati határt szab a maximális hossz, hiszen a Föld átmérőjénél hosszabb egyenes pályát nehéz lenne készíteni. A hatásfokot növelni lehet a cellánkénti térerő növelésével, de mindkét szempontból (hossz és térerő) a gyakorlati korlátot a pénzügyi költségek jelentik. A nagyenergiájú gyorsítóépítés kettes számú nagy trükkje: ugyanazon ( rövid és olcsó ) lineáris gyorsítón ugyanazokat a részecskéket többször futtatjuk át. Itt jön be a mágneses dipól-tér. A szinkrotronok alapelve a következő: adva van egy gyűrű, amelynek a kerülete mentén mágneses dipólok helyezünk el. A dipólok tere merőleges a gyűrű síkjára és a térerősség 0 és  $B_{max}$  között szabályozható. A gyűrű nem egészen tökéletes kör, általában néhány helyen lineáris szakasz(oka)t iktatnak be, ezekben lehet a lineáris gyorsító(ka)t elhelyezni. A gyorsítás menete a következő: a forrásból  $E_0$  kezdő energiával egy részecske csomagot lövünk be a LIN - be,

ahonnan  $E_1 = E_0 + D E$  energiával jön ki. A  $B_0$  erősségű dipól-tér egy kör után visszavezeti a részecskéket a LIN - be, és onnan kijöve  $E_2 = E_0 + 2 D E$  energiával már a megnövelt  $B_1 = B_0 + D B$  tér fogja újra visszavezetni a LIN - be, és így tovább mindaddig  $D B$  - vel növeljük a teret amíg el nem érjük  $B_{max}$  - ot.

A szinkrotron gyorsító ára attól függ, hogy mekkora az  $R$  és  $B_{max}$  . A közönséges normál hőmérsékletű vas mágnesek esetén  $B_{max} = 1.5$  Tesla, szupravezető mágnes esetén jelenleg az LHC-ben tervezett  $B_{LHC} = 8,5$  Tesla tér jelenti a gyakorlatilag elérhető maximumot. A LEP alagútban elhelyezhető hadron gyorsító effektív rádiusza  $R = 3$  km, mivel a hajlító dipól mágnesek a 27 km - es kerületnek csak egy részét tölthetik ki.

Ezért a jelenleg elérhető legnagyobb nyalábenergia:

$$E_{LHC} = 7 - 8 \text{ TeV}$$

### 3. Váltakozó fókuszálás - defókuszálás

Az elv valóban egyszerű: gyorsítás és visszahajlítás. A dolog attól válik bonyolulttá, hogy a részecskéket több ezer, sőt millió fordulat után is egzaktul ugyanarra a pályára kell visszavezetni. Ahhoz, hogy ezt elérjük, egy valóban Nobel-díjas trükkre van szükség. Utólag visszanezve is csak különleges csodának lehet tartani, hogy a részecskéket úgy lehet az adott ideális pálya közvetlen közelében tartani gyakorlatilag időlimit nélkül, hogy váltakozva a pályára visszatérítő (azaz fókuszáló) és attól eltérítő (azaz defókuszáló) mágneses lencséken vezetjük át a nyalábot. A trükk lényege az, hogy a **homogén** dipól térrel ellentétben, amely a pályát kör alakúvá teszi, itt kvadrupól-teret is alkalmazunk, amely többszörös értelemben is **inhomogén**. Egyrészt, az adott kvadrupól, ha vertikálisan fókuszál, akkor horizontálisan defókuszál. Másrészt a térerősség a kvadrupól közepén nulla és onnan kifelé haladva lineárisan növekszik.

Az alternáló fókuszálás elvét két dimenziós vetületben érthetjük meg. Egymás után elhelyezve adva van két azonos egymáshoz képest  $90^\circ$  - kal elforgatott kvadrupól mágnes. Két eset lehetséges. Vertikális vetületben nézve, az első kvadrupól fókuszál, és a második defókuszál, vagy ennek a fordítottja. Mindkét esetben vegyünk egy olyan részecskét, amely próbál eltérni a középvonaltól.

Az a) esetben a fókuszáló tér rögtön visszafordítja a renitens részecskét. Ennek az erőteljes lépésnek a hatásosságát persze nagyban csökkenti, hogy ezután defókuszálás lép fel. Viszont itt lép be a nagy trükk! A tér inhomogenitása miatt a defókuszáló tér erőssége lényegesen kisebb lesz a korábbi fókuszáló térénél, mivel itt a részecske már közelebb lesz a középvonalhoz. Vagyis az eredő hatás a két kvadrupólra való áthaladás után végülis fókuszálás lesz.

A b) esetben ugyanez a logika működik, de fordított előjellel. Az első lépés defókuszáló hatása miatt a második kvadrupólba a középvonaltól távolabb fog a részecske belépni, ezért nagyobb lesz a visszatérítő hatás, mint a korábbi eltérítő. Tehát az eredő hatás, megint fókuszálás.

Vegyük észre, hogy a részecske töltésének az előjelére szimmetrikus az elrendezés, hiszen csak az a) és b) eset cserélődik fel, ha pozitív helyett negatív a részecske, akkor is az elrendezések mindegyike végül is azonos fókuszáló hatást eredményez.

A háromdimenziós mozgás esetén az a furcsa kombináció valósul meg, hogy a részecske **egyszerre** hajtja végre az a) és b) eseteket, hiszen ugyanazon kvadrupól terében amikor horizontálisan fókuszál, akkor vertikálisan defókuszál; ez persze a második kvadrupólban pont fordítva van, így a szimmetria helyre áll, és a végeredmény egyidejű fókuszálás lesz mindkét irányban.

Tehát, dipól és kvadrupól mágnesek ügyes kombinálásával a részecskéket akármeddig közel egzakt zárt vonalú pályán tarthatjuk. A gyakorlati határt a vákuum minősége jelenti. Ugyanis a maradék gázatomokkal való ütközés, fokozatosan csökkentheti a nyaláb intenzitását. Ha elég jó a vákuum, akkor egy hónapig is körbe keringtethetjük a részecskéket a gyorsító gyűrűben. Ezt a CERN-ISR -ben valóban sikerült elérni, amihez

persze a világűrbelinél is lényegesen jobb vákuumot kellett létrehozni. A gyakorlatban kb. egy napig érdemes fenntartani a nyalábot a működő tároló gyűrűkben.

Csak azért, hogy számszerű fogalmunk legyen arról, milyen hihetetlen precizitást lehet elérni ezzel a váltakozó fókuszálási módszerrel, nézzük az LHC esetét. A majdnem 30 km-es kerületű gyűrűben a protonok másodpercenként, 10 000 kört tesznek meg, vagyis egy nap alatt közel  $10^9$  kört, másképpen fogalmazva egy "fénynapnyi" utat tesznek meg ( $L = 3 \cdot 10^{10}$  km!). Ha a világűrben ilyen messzire lenne egy céltárgy, akkor azt 20 mikron pontossággal találnánk el, ugyanis olyan jó a fókuszálás, hogy a gyorsítóban egy nap után is ilyen pontossággal tudjuk biztosítani, hogy a szembe jövő protonok találkozzanak.

Ez azt jelenti, hogy az ilyen hosszú gyorsítóval egy a Naprendszer szélén keringő Plútón is túl levő szűnyog szemét is képesek lennénk eltalálni, ami persze nem jelenti azt, hogy ilyen pontossággal tudnánk célozni, mivel itt a célra korrigálás folyamatosan történik.

#### *4. Fix - target versus Collider*

A gyorsítók történetében a következő trükk azon a köznapi tapasztalaton alapul, hogy ha az autóval 100 km/óra sebességgel a falnak ütközünk, az elég nagyot szól. Igazából nagybumm akkor következik be, ha **két** autó ütközik frontálisan egymással szembe ilyen sebességgel. A kísérleti technika szédületes fejlődése olyan élesen fókuszált nyalábot létrehozását tette lehetővé, hogy bennük sikerült a részecskék sűrűségét annyira növelni, hogy ha két ilyen elektron vagy proton csomag találkozott, akkor közülük néhány biztosan telibe találja a másikat. Ez nem elhanyagolható pontosság, hiszen protonok esetén ez kb.  $10^{-15}$  m átmérőjű céltábla eltalálását jelenti.

Amikor a nyalábot álló céltárgyra löjük, akkor fix-target kísérletről beszélünk, ilyen gyorsítók: Bevalac, AGS, SPS stb... Ha viszont két nyaláb szolgál egymás céltárgyaként, akkor collider-ről (ütköztetőről), azaz ütköző nyalábos gyorsítóról van szó, ilyenek a LEP, az SppS és majd az LHC. Külön érdekesség, ha két különböző típusú nyalábot ütköztetnek, mint a hamburgi HERA - ban, ahol 30 GeV-es elektronok ütköznek 920 GeV-es protonokkal.

Hogy mennyire érdemes ütköztetőt használni azt már egyetlen számmal is jól lehet érzékeltetni. Ha a 7+7 TeV-es LHC proton-proton ütköztető 14 TeV-es tömegközépponti energiáját fix-targetes gyorsítóval akarnánk elérni, akkor 25 000 TeV-es proton nyalábot kellene létrehozni. Arról ma még álmodni sem tudunk, hogy a 7 TeV-nél 3000 - szer nagyobb energiájú részecskegyorsítót egyáltalán képesek leszünk-e valaha építeni, viszont az ütközőnyalábos technika tálcán kínálja a kutatási lehetőséget ilyen hatalmas energiák tartományában is.

## 5. Miért kell mindig nagyobb energia?

Most már értjük, hogy hogyan lehet új gyorsítót építeni, de az igazi kérdés az, hogy egyáltalán miért van mindig újabb és nagyobb energiájú gyorsítókra szükség ?

A kísérleti tudományok utóbbi néhány száz éves fejlődése két fő irányt mutat: távcsöveinkkel a világűr egyre nagyobb mélységeibe hatoltunk be, mikroszkópjainkkal pedig az anyag egyre finomabb szerkezetét sikerült felderíteni. A módszer lényegében azonos: a *foton* hullámtermészetén alapul. Az elektronmikroszkóp esetén szintén hasonló dologról van szó, csak hogy itt az *anyag* hullámtermészetét használjuk ki. A felbontás növelésére az ad lehetőséget, hogy anyaghullámokkal lényegesen rövidebb hullámhosszakat lehet viszonylag könnyen előállítani. Mivel a céltárgy két részlete csak akkor különíthető el, ha a távolságuk nagyobb, mint a letapogató sugár hullámhossza, ezért az adott felbontáshoz mindig hozzá rendelődik egy minimális sugárnyaláb energia. A sejtek vizsgálatához például elegendő a keV-es nagyságrendű energiájú elektronnyaláb, azonban az atommag belsejének  $10^{-17}$  m-es pontosságú felderítéséhez már 100 GeV-es elektronok szükségesek. Még nagyobb energiákra van szükségünk, ha ennél még sokkal finomabb részletekre van szükségünk.

A feladat nagyságát, azaz a  $10^{-17}$  m - től a 0 - ig való eljutást, hűbben leíró paramétert kapunk, ha "log r" - t vizsgáljuk, amely skálán ez a -17 - től  $-\infty - \infty$  -ig tartó soha be nem fejezhető útnak felel meg.

A fizikai világ egységének egyik érdekes szimbóluma, hogy a  $\log r \rightarrow -\infty$  -t kutató szupermikroszkópok, a gyorsítók energiája a  $+\infty$  - hez tart, amely persze nem haladhatja meg a jelenlegi ismereteink szerint véges univerzum összenergiáját. Vagyis bár a log r - ben a negatív irányban indulunk el, a kísérlet végrehajtásához az egész világot kellene bevonni. Hogy a kör teljesen záruljon, azt érdemes figyelembe venni, hogy ha a távcsöveinkkel a log r - ben a pozitív végtelen irányába indulunk el, akkor az Ősrobbanásig jutunk vissza, amikor az egész világ egyetlen pontba volt összesűrítve. Tehát a részecskefizika és asztrofizika végsősoron ugyanazt vizsgálja.

## 6. $e^+ e^-$ gyorsítók

Ahhoz, hogy az LHC utáni gyorsítók kutatási feladatairól beszélhessünk, néhány szót kell ejteni, hogy mit várunk magától az LHC-től. Az LHC a LEP helyére kerül. Magától adódik a kérdés, miért ez a nagy hűhó? Miért nem elégedtek meg egyszerűen a LEP energiájának TeV-re növelésével. Hát ez elvben valóban csodálatos lenne, de a gyakorlat sajnos más. A LEP bizonyos szempontból a részecskefizika dinoszauruszának tekinthető, ugyanis ennél nagyobb **cirkuláris** elektrongyorsítót valószínűleg soha nem fognak

építeni, mert itt minden paramétert, már az ésszerűség határáig túlfeszítettek. A probléma gyökere végtelenül egyszerű: a szinkrotron-sugárzás. Az elektron a legkönnyebb töltött részecske, amely ezért már a legkisebb erőhatás miatt fellépő gyorsulás következtében fotonokat sugároz ki. ( A proton is sugároz ilyen fotonokat, de ezek mennyisége még az LHC energiákon is elhanyagolható. ) Mivel a mágneses térben irányváltoztató gyorsulás lép fel, ezért cirkuláris gyorsítóban elkerülhetetlen ez az ún. szinkrotron-sugárzás, amely persze az elektron energiájának rovására történik. A cirkuláris elektron-gyorsító energiáját csak addig a határig lehet növelni, ameddig egy fordulat alatt több energiát tudunk betáplálni, mint amennyit az elektron ez alatt szinkrotron-sugárzás miatt veszít. Az eredeti LEP esetén ez a 45 GeV energia körül következett be. Azonos pálya esetén, ha meg akarjuk duplázni a nyaláb energiáját, akkor  $2^4 = 16$  szor nagyobb lesz a sugárzási energiavesztés. Ezt a LEP esetén szupravezető üregrezonátorok bevezetésével sikerült ugyan kompenzálni, de már 10-es faktor elérése teljesen lehetetlen lett volna, mivel ahhoz 10 000 - szer több energiát kellett volna betáplálni. Mivel az LHC 7 TeV - es proton energiája 70 - szer nagyobb a LEP 100 GeV - énél, ezért itt már csillagászati 25 millió - szoros energiaigény lépne fel, ha elektronokat akarnánk gyorsítani.

A " tiszta " fizika szempontjából az elektron-positron ütközőnyalábos gyorsító előnyösebb, mint a proton - proton, mert az elektron a mai tudásunk szerint pontszerű részecske, viszont a protonról, már a Rutherford - kísérlet óta tudjuk, hogy véges méretű belső szerkezettel rendelkező bonyolult képződmény. Mivel a protonban 3 valencia - kvark van, ezért proton - proton ütközések esetén, az elemi kvark-kvark ütközésekre gyakorlatilag az összenergia egy tizede jut. Vagyis egy 700 GeV - es  $e^+ e^-$  ütköztető ugyanarra lenne képes, mint a 7 TeV - es LHC. Érdekes módon ezt még nem tudjuk megépíteni. Ezért került előtérbe az LHC, ha be akarunk lépni a fizika egy teljesen új tartományába. A gyorsító építők egyik nagy kihívása éppen az, hogy milyen legyen a következő elektron-positron gyorsító.

Az LHC nem csak földrajzilag, de a kutatási témában is a LEP nyomdokaiba lép: Higgs - bozonok és szuperszimmetrikus részecskék keresése. Felmerül a kérdés, mit lehet még ezután kutatni ? Ha minden igaz, akkor az LHC-n ezeket megtaláljuk és így tovább folytatódik az egyre unalmasabbá váló Standard Modell, illetve annak minimális szuperszimmetrikus kiterjesztésének a sikere. Hát éppen ez az ! Mi van a Standard Modellen túl, erre kellenek az új ötletek és gyorsítók !

A történelem azt mutatja, hogy minden új gyorsítót azért építettek, mert meg akartak bizonyosodni az akkori elmélet nagyobb energiákra való extrapolálhatóságáról. Ez általában sikerült is, de minden új energiataromány meghódítása váratlan új jelenségek felfedezésére is vezetett. Az antiproton felfedezésére Berkeley - ben készült Bevalac indította el az elemi részecskék felfedezésének dömpingjét, a 30 GeV - es brookhaveni AGS és CERN - i PS gyorsítókon az elemi részecskék részletes tanulmányozása vezetett el a kvark-modell kidolgozására. A következő generációhoz tartozó proton gyorsítók a CERN-i ISR és SPS, valamint a Fermilab TEVATRON, a SLAC elektron LINAC-jával együtt feltárták a proton parton szerkezetét. Előre "tervezett" felfedezés volt proton-antiproton (SpS) ütközésben a Z és W kimutatása, de általános meglepetést jelentett, hogy a t - kvarkot csak 175 GeV - es tömegnél lehetett megtalálni.



Most is óriási kérdőjelként meredezik előttünk, mi határozza meg az egyes részecskék tömegét? Létezik-e a Nagy Egyesülés az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatások között? Miért van 3 generáció a kvark-lepton családokból?

Az LHC szerepe valószínűleg hasonló lesz az SppS szerepéhez a Z, W fizikában. Általában ugyanis a hadron-gyorsítók a felfedezők, de csak néhány új részecskét tudnak produkálni a rendkívül zavaros háttér miatt, míg a részletes vizsgálat a megfelelő  $e^+ e^-$  gyorsítón történik. A LEP - en összesen 20 millió Z-t gyártottak, ami minőségi különbséget jelent az SppS néhány tucatjához képest. Ezért a 2005 - ben elkészülő LHC után valószínűleg egy 0.5 - 1.0 TeV közötti energiájú  $e^+ e^-$  ütköző nyalábos gyorsító megépítése várható valamikor 2010 után. Mivel cirkuláris gyorsítót ilyen energián nem lehet építeni, ezért itt azt az újszerű megoldást fogják alkalmazni, hogy majd két lineáris gyorsító lövi egymással szembe az elektront és a pozitront. Természetesen így folyamatosan mindig új nyalábokat kell betáplálni, mert egy elektront, illetve pozitront csak egyszer lehet az ütközési zónán átvezetni.

Egyelőre 3 helyen folynak intenzív kutatások a lineáris elektron-gyorsítók energiájának növelésére. A klasszikus megoldás a gyorsító hosszának csökkentése érdekében az, hogy növelik az elektromos gyorsító tér erősségét, míg a LEP - ben a gradiens 7 MeV/m volt, a németországi DESY-ben a TESLA lineáris ütköztető 22 MeV/m - rel 30 km hosszú lenne, addig a japán KEK-ben a JLC 36 MeV/m - rel 16 km-t, az amerikai SLAC-ben tervezett NLC 55 MeV/m-rel már csak 11 km-t igényelne.

A legambiciózusabb tervet a CERN-ben készítik, amelynek a realizálása persze nem is várható 2020 előtt. Ez a CLIC nevű  $e^+ e^-$  gyorsító már valóban minőségileg újat jelentene, hiszen az LHC-n túlmutató 3 - 5 TeV -es energia tartomány meghódítására készülne (emlékezzünk ez proton-proton gyorsítóban 30 - 50 TeV - et jelentene ) . Itt két lényegesen új tervezési elv kerülne bevezetésre:

a) A gyorsítást létrehozó haladó hullám frekvenciája 30 GHz lenne, amely a jelenlegi LEP frekvencia több mint 100 - szorosa ;

b) A gyorsító teret nem klystronokkal, hanem egy párhuzamosan haladó másik alacsony energiájú nyaláb segítségével hoznák létre. Ezzel a "nyaláb-meghajtással" 150 MeV/m - et meghaladó gyorsítási gradienst lennének képesek elérni.

Az ötlet első pillanatban lehetetlennek tűnik ( sokaknak még második pillanatban is ). Igazi Münchhausen-báró idea, mintegy "saját hajánál" fogva akarjuk a nyalábot gyorsítani. Valóban örült elképzelés, de van benne rendszer, lásd a mellékelt ábrát.

A meghajtó 1.2 GeV - es elektron nyalábot a gyorsítandóval szemben vezetve, úgy lassítják le, hogy a lelassuló elektronok által kisugárzott fotonok megfelelő erősségű 30 GHz-es elektromos teret hozzanak létre éppen abban a pillanatban, amikor a gyorsítandó elektronok ott tartózkodnak. Az elv valóban működik, ugyanis az első próbakísérletek sikeresek voltak. Jelenleg tervezés alatt van egy olyan modell építése, amelynek a főbb méretei már közel vannak a tervezett végső gyorsító paramétereire, persze a kívánt hosszak parányi töredékét készítve csak el.

## 7. VLHC

A dolgok logikájából következően a CLIC után újra egy proton-proton gyorsító következne a sorban. A Very Large Hadron Collider (VLHC) esetén a 100 TeV-es energiatartomány meghódítása lenne a cél. Két irányban folynak a kutatások. Mivel a protonok szinkrotron-sugárzásának nagysága még ezen energiákon is elviselhető, ezért mindenképpen cirkuláris gyorsító építésére gondolnak. A  $p = 0.3 BR$  formula szerint nagy  $p$ -t, azaz nagyenergiát vagy  $B$  vagy  $R$  növelésével érhetjük el, ahol  $R$  az effektív körpálya sugara. Alacsony tér ( 2 Tesla) esetén  $2 R^2 = 600$  km adódik a gyűrű teljes területére, míg erős tér ( 12 Tesla ) esetén elegendő lenne 100 km-es alagút, amely a LEP/LHC alagútnak csak 3 - 4 - szerese .

Az alacsony térelképzelés lényege, hogy rendkívül egyszerű és olcsó 250 m hosszú darabokból álló tömeggyártásra kiválóan alkalmas mágneseket készítenének, amelyeket csatorna ásó robotok temetnének a föld alá, vagyis még külön alagút építésére sem lenne szükség. A Fermilab-ban már dolgoznak egy 50 m-es próba mágnesen.

Az erős terű mágnes készítésénél a szupravezető kábel anyagának kiválasztása és megmunkálása jelenti a fő problémát. A klasszikus szupravezetőkben NbTi ötvözetet használnak, itt a magas tér eléréséhez Nb<sub>3</sub> Sn ötvözet kellene, amelynek a megmunkálása igen problematikus. Ugyancsak vizsgálják a különböző NbTiTa ötvözeteket. Az LBNL-ben egy 3 éves programot indítottak a lehetőségek felmérésére.

## 8. Müion gyorsítók

A titokzatos müion ( a nehéz elektron ) a legelőször felfedezett nem stabil töltött elemi részecske pályafutását egy emlékezetes megtévesztő manőverrel kezdte, mivel sokáig az erős kölcsönhatást közvetítő Yukawa - mezonnal keverték össze. Hosszú időbe telt, amíg a pion felfedezése tisztázta a helyzetet. A müionok kozmikus sugárzásbeli észlelése más szempontból is történelmi érdekességet jelent, mert a józan logika szabályai szerint a két milliomod másodpercig élő müionoknak nem is lett volna szabad a föld felszínén levő megfigyelőkhöz eljutnia. A müion az első olyan részecske, ahol a speciális relativitás elvei mindennapi gyakorlattá váltak, és a relativisztikus idődilatáció nem csak a müion megfigyelhetőségét tette a múltban lehetővé, hanem még gyorsítását is a jövőbeli gyorsítóban. Hihetetlen, de a technika mai állása alapján valószínűnek tűnik, hogy előbb

lesz 5 TeV-es  $e^+e^-$  ütköző nyalábos cirkuláris gyorsító, mint az  $e^+e^-$  CLIC. Müionok esetén ugyanis a viszonylag nagy tömeg ( ~ 200 elektron tömeg ) miatt még ilyen energiákon is elviselhető a szinkrotron-sugárzás erőssége. A 7. ábrán látható egy ilyen komplexum vázlatos rajza. A részleteket mellőzve csak a főbb lépéseket soroljuk föl.

A proton-szinkrotron 16 GeV-es protonjait egy céltárgyra lövik, ahonnan intenzív pionnyaláb repül ki, ezeket fókuszálják és váltakozva pozitív / negatív csomagokat alakítanak ki. A 100 m hosszú pion bomlási zóna végén átlagban 0.3 müont várnak minden egyes protonra számítva. Ezeket több lépésben gyorsítják fel a szükséges végenergiára. Ha például elérik a nyalábonkénti 250 GeV-et, akkor az élettartamuk az eredeti 2500 - szorosára nő, vagyis kb. 5 ezredmásodpercig fognak körbe-körbe menni. A folyamatos működést állandó újratöltéssel lehet biztosítani.

Mivel itt rendkívül intenzív nyalábokról van szó, ezért a müonok bomlása következtében korábban elképzelhetetlen intenzitású neutrínó nyaláb is megjelenik melléktermékként. Ez a melléktermék teljesen új távlatokat nyithat a neutrínó fizikában.

## ***9. Egyéb vad ötletek***

Az eddigiekben ismertetett elképzelések a legszilárdabb realitás talaján állottak, a következőkben megpróbáljuk kissé szabadjára engedni a fantáziánkat.

Pulzált lézerekben ma már el lehet érni  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> csúcsteljesítmény sűrűséget, amely fantasztikusnak tűnő 30 TV/m gradienst ad a fókuszban ! Vagyis elvileg majdnem 100 TeV-et lehet elérni 3 méteres gyorsítóval. A baj csak az, hogy az elektromos tér iránya merőleges a hullám terjedési irányára, a részecskegyorsítóhoz viszont longitudinális komponensre van szükség. Stanfordban előkészítés alatt van egy kísérlet, amelyben két lézer nyalábot kereszteznek bizonyos szög alatt úgy, hogy a transzverzális komponensek kioltásák és a longitudinálisok erősítsék egymást. Így 3 GV/m gradienst várnak.

Jelentős erőfeszítések történtek annak a kiderítésére, hogy hogyan lehetne elektronok gyorsítására felhasználni a plazma oszcillációkat, amikor a plazma elektronjai rezgésbe jönnek az állónak tekinthető ionokhoz képest. Az elektronsűrűségbeli oszcillációk igen erős tereket tudnak fenntartani a plazmában, hiszen itt nincsen átütési feszültségi határ. Magukat a plazma oszcillációkat viszonylag könnyű kelteni lézerrel. Egy UCLA group az ún. Plasma Beat-Wave Acceleratorban 3 GV/m-es gradienst tudott létrehozni 3 cm-n.

A CLIC ötletet viszi tovább az a kezdeményezés, ahol 90 GHz - es hullámot akarnak létrehozni és így viszonylag klasszikus eszközökkel 1 GeV/m gyorsulást próbálnak elérni a nem távoli jövőben.

Összefoglalva megjegyezhetjük, minden remény megvan, hogy a gyorsítók energiája a következő évtizedekben is exponenciálisan fog emelkedni. Így az új fizikai felfedezéseknek a gyorsító energia miatt nem lesz semmi akadály.

