

Poglavlje 1

Uranjanje u subatomske svijet

Uloga ovog uvodnog poglavlja je smjestiti fiziku elementarnih čestica (FEČ) kako u zadani povijesni okvir ljudskog društva (s raspoloživom tehnologijom istraživanja), tako i u dani "kutak svemira". Spuštanje u svijet sve sitnijeg povezano je s usponom na "kvantnim ljestvama". Pritom odabir "prirodnog sustava jedinica" bitno pojednostavljuje opis tog svijeta, skrivenog svakodnevnim iskustvu. Moderni akceleratori, koji dopiru i do njegovih najskrovitijih kutaka, razotkrili su bogatstvo čestičnih vrsta sažetih u *tablici elementarnih čestica*, "Mendeljejevoj tablici naših dana" (Dodatak A). To more čestica suprotstavljeno je malom broju sila putem kojih čestice međudjeluju.

1.1 FEČ kao fizika realnog svijeta

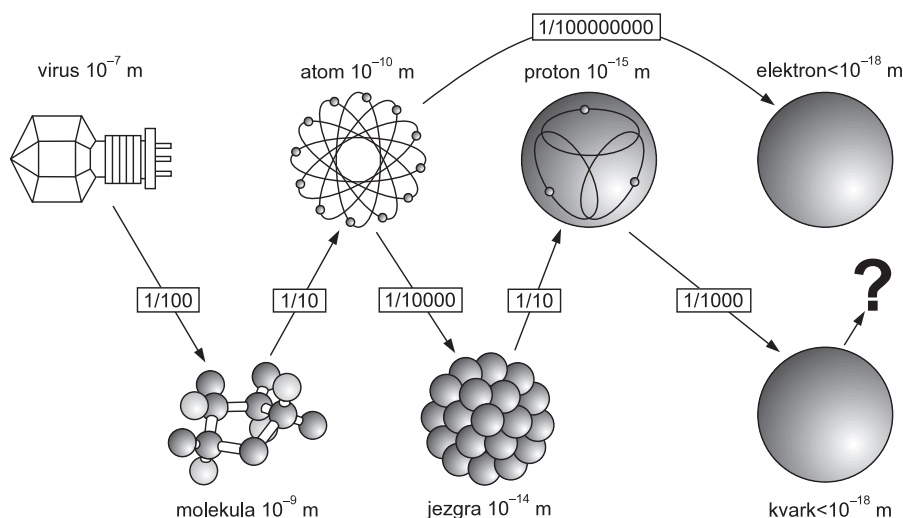
Program fizike čestica može se sažeti u stihovima Goetheovog Fausta :

*"dass ich erkenne, was die Welt
im Innersten zusammenhält,
schau' alle Wirkenskraft und Samen
und tu' nicht mehr in Worten kramen "*

*"Da spoznam, što u samoj srži
Na okupu taj svijet drži,
Da tvornu moć i sjeme zrem
I r'ječi više ne tešëm ! "*

(prijevod: Iso Velikanović)

Dakle, to je program otkrivanja *zakona* prirode, odnosno utvrđivanja *principa* kojima se ona povinuje. Povijesno, taj se program odvijao kao "redukcionizam",



Slika 1.1: *Spuštanje prema sve sitnijem, od dimenzija virusa do kvarkova koji nam se pričinjaju točkastima*

traženjem minimalnog broja sve sitnijih sastojaka materije i minimalnog broja zakona kojima se ti sastojci povinjuju. Uspješnost tog programa doživljavamo kao jedno od najvećih čuda — čudo da čovjek uopće može otkrivati zakone prirode. Tajna tog uspjeha skriva se u mogućnosti da zakone otkrivamo jedan po jedan, odnosno činjenicama:

- ◇ da zakoni imaju jednostavnu pojavnost. Tako je činjenica da gibanje planeta uključuje samo gravitaciju (bez električnih i mikroskopskih sila) omogućila otkriće Newtonovog zakona privlačenja;
- ◇ da postoji čisto makroskopska fizika (kao što je to Maxwellova teorija elektromagnetizma);
- ◇ da postoje procesi koji nisu pod utjecajem makroskopskih sila.

Ovo posljednje svojstvo omogućilo je izradu sve finijih povećala za razotkrivanje sve dubljih slojeva svijeta. Konstrukcija ubrzivača čestica omogućena je činjenicom da je, primjerice, elektron ubrzan u vakuumu pod kontrolom čisto elektromagnetske sile.

Pri traženju temeljnih građevnih elemenata putem sve moćnijih ubrzivača čestica, razotkrivena je ljuskasta struktura svijeta, koju ćemo opisati kao *kvantne ljestve*. Istaknut ćemo najvažnija svojstva koja određuju specifičnost opisivanja subatomske svijeta, kao i ona svojstva koja su omogućila otkrića u tom području.

1.1.1 Kvantne ljestve

Kroz povijest fizike sve moćnija “povećala” razotkrivala su sve sitnije sastavne djeliće tvari (Slika 1.1). Otkriće *atoma i molekula* omogućilo je da se toplina objasni njihovim slučajnim gibanjem, a Boltzmannov *ekviparticijski teorem* (koji predviđa energiju od $kT/2$ ($k \simeq 8.6 \times 10^{-11} \text{ MeV K}^{-1}$) po stupnju slobode) otvorio je vrata kvantnoj mehanici .

Elementarne čestice kao temeljne građevne blokove svijeta nalazimo na samom vrhu kvantnih ljestvi. Naime, eru *klasične fizike* smjenila je fizika mikroskopskih područja koja je postupno razotkrivala strukturu kvantnih ljestvi, gdje svaka prečka obuhvaća jedinstvene pojave (zasebne grane fizike), odijeljene od susjednih dramatično različitim prijenosima energije.

- ◇ Na prvoj (atomske) prečki razvila se metoda mišljenja i kvantitativnih proračuna - formalizam *kvantne mehanike* , nužan i nadajmo se dovoljan za opis preostalih dviju: subatomske (nuklearne) i subnuklearne (fizike čestica).

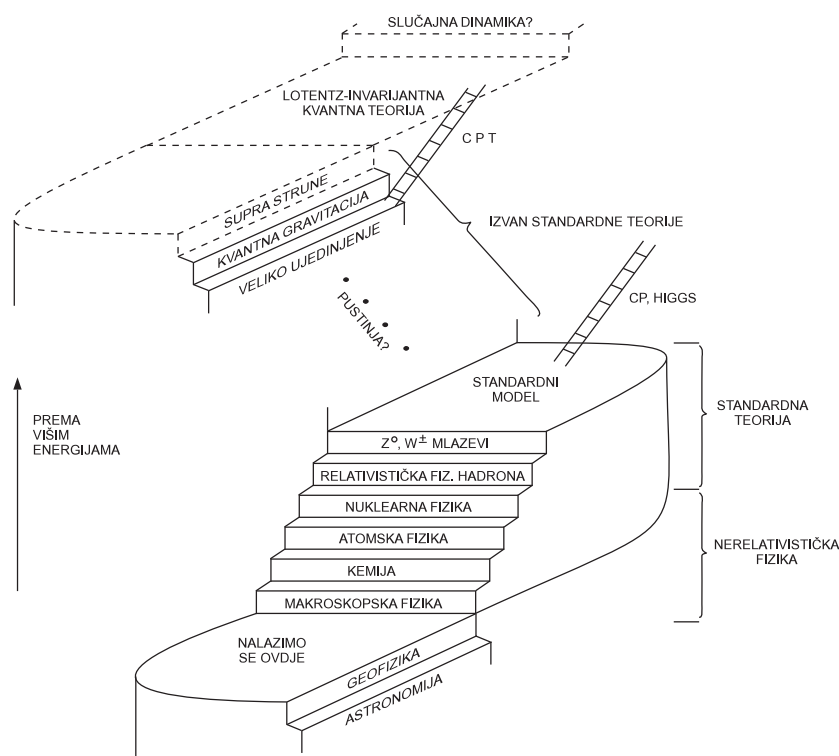
Sile na atomske prečki bile su poznate elektromagnetske, odnosno gotovo isključivo elektrostatičke. Zakoni fizike koji još nisu bili poznati, razotkriveni su i ustanovljeni u vidu kvantne mehanike.

- ◇ Pri izučavanju slijedeće prečke polazilo se od stečenih zakona *kvantne mehanike*. Njihovom primjenom željelo se saznati više o nuklearnim silama koje vladaju u svijetu atomskih jezgara. Što je prirodnije nego uspješnu kvantnu mehaniku primijeniti i na opis elementarnih čestica. Pri tome se razotkriva neobično svojstvo čestičnog svijeta, da čestice doživljavaju prostor i vrijeme potpuno ravnopravno. Zakoni nalaze novu, elegantniju i uspješniju formulaciju u obliku relativističke kvantne mehanike (teorije polja).
indexteorija poljaseekvantna teorija polja

Priložena ilustracija sad već solidno utvrđenog “kvantnog stepeništa” (slika 1.2) dočarava slijed stepenica na kojima dominiraju pojedina načela, koja ćemo izučavati u ovoj knjizi. Ljestve ucrtane pri vrhu stepeništa naznačuju nedovršenost spoznaja vezanih uz najviše energijske skale. Kraj jedne ere i početak nove, u fizici je redovito obilježen pojavom “paradoksa” koji u fizičara izazivaju “dileme”. Istaknute su dvije povijesne dileme i njima pridružene skale “nove fizike”:

- ◇ *dilema čestica - val*, na kojoj je izrasla kvantna fizika na skali “Bohrovog polumjera” (dimenzije vodikova atoma)

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e} (= \alpha^{-2} r_e) = 5.2917706(44) \cdot 10^{-11} \text{ m} . \quad (1.1)$$



Slika 1.2: Kvantno stepenište kojim se penjemo na razine sve viših energija (preuzeto iz [?])

- ◇ *dilema čestica - polje*, aktualizirana primjenom relativističke kvantne fizike na opis međudjelovanja elektrona i fotona. Tako ustanovljena teorija pod nazivom *kvantna elektrodinamika*, na skali komptonске valne duljine elektrona

$$r_e^{kompt} = \frac{\hbar}{m_e c} (= \alpha^{-1} r_e) = 3.8615905(64) \cdot 10^{-13} \text{ m}, \quad (1.2)$$

postala je uzorom svih budućih kvantnih teorija polja. Pri tome središnje mjesto zauzima zamišljaj polja-prijenosnika sile.

Pojedina temeljna sila bit će karakterizirana svojom jakošću — “konstantom fine strukture”. Ovdje razmatrano elektromagnetsko međudjelovanje karakterizirano je jakošću α u koju ulazi kvadrat električnog naboja - pojašnjenom nešto kasnije u jednadžbi (1.7) i (??).

Možemo nabrojati još neke istaknute prečke na kvantnim ljestvama: Primjerice, klasični polumjer elektrona (“nabojni polumjer”)

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} (= \frac{\alpha}{m_e}) = 2.8179380(70) \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad (1.3)$$

je veličina kojom se izražava Thomsonov udarni presjek komptonkog raspršenja svjetlosti na slobodnim elektronima

$$\sigma_T = \frac{8\pi r_e^2}{3} = 0.6652448(33) \text{ barna}$$

(1 barn = 10^{-28} m^2 ; vidjeti odjeljak ??). Klasični polumjer elektrona r_e , koji je znatno manji od njegove komptonske valne duljine, prirodno ulazi i u izraze (1.2) i (1.3). Za razliku, “srednji kvadratični” polumjer nukleona (mjereno u Rutherfordovom raspršenju, odjeljak ??)

$$r_{rms}^N = 0.81 \cdot 10^{-15} \text{ m} \simeq 1 \text{ fm} \quad (1.4)$$

znatno je veći od komptonske dimenzije nukleona ($\simeq 1/5 \text{ fm}$). Najavimo da su ove veličine $\simeq 1 \text{ fm}$, u usporedbi s (1.1) ili (1.2), “tigrovi od papira”. Naime, one ne uvode u fiziku nikakvu bitnu novinu. Predviđamo da slijedeća skala nove fizike stupa na scenu na udaljenostima recipročnog tera-elektronvolta ¹

$$\text{TeV}^{-1} \simeq 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}. \quad (1.5)$$

Izučavanje te skale (koja bi trebala razriješiti misteriju porijekla čestičnih masa) bit će posao slijedeće generacije fizičara i slijedeće generacije super-sudarivača (LHC na CERN-u) o čemu će biti više riječi u odjeljku 1.2.2. Nedvojbeno, granica snova fizičara predstavljena je Planckovom skalom (vidjeti kasnije relacije (1.18) – (1.20)), na kojoj će se morati preispitati i sami koncepti prostora i vremena.

1.1.2 Fundamentalne sile i njihovi prijenosnici

□ ATOMSKA FIZIKA

Godine 1929. kada je Hideki Yukawa diplomirao na sveučilištu u Kyotu, jedine poznate elementarne čestice bile su elektron i proton, koji tvore atome vodika na sl. 1.3. Energija elektrostatičkog privlačenja elektrona i protona²

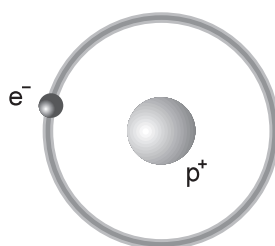
$$V_{el.stat.}(r) = -eV = -\frac{e^2}{4\pi r}, \quad (1.6)$$

može se karakterizirati bezdimenzionalnom jakošću međudjelovanja, tzv. *konstantom fine strukture*

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} \simeq \frac{1}{137}. \quad (1.7)$$

¹za vezu udaljenosti i energije vidjeti odjeljak 1.1.3

²u Heaviside-Lorentzovom racionaliziranom sustavu jedinica, koji ćemo obrazložiti u slijedećem odjeljku.



Slika 1.3: Shematski prikaz najjednostavnijeg, vodikova atoma. Međudjelovanje središnjeg protona i orbitirajućeg elektrona temelji se na zamišljaju (“konceptu”) polja. Električno nabijeni proton uspostavlja u okolnom prostoru polje, koje elektron, kako osjeća, tako se u njemu i giba

Konstanta α se može promatrati kao konstanta proporcionalnosti³ koja povezuje energiju elektrostatičkog odbijanja dvaju elektrona na udaljenosti komptonske valne duljine (1.2), s vrijednošću vlastite energije elektrona:

$$V_{el.stat.}(r_e^{kompt}) = \alpha m_e c^2 . \quad (1.8)$$

Uočimo li da se karakteristična energija vezanja za vodikov atom pojavljuje u obliku Rydbergove konstante $Ry = 13.6eV$,

$$Ry = \frac{\alpha}{2r_B} = m_e \alpha^2 / 2 , \quad (1.9)$$

vidimo da se α pojavljuje kao karakteristična atomska nerelativistička brzina!

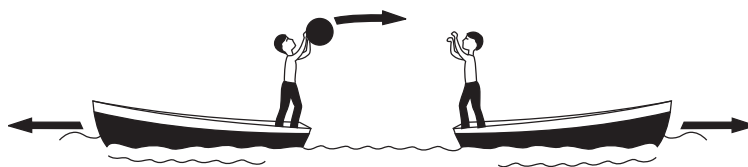
Dinamički problem elektromagnetske (e.m.) interakcije u načelu je jednostavan. U praksi se pojavljuju teškoće zbog višestručnog problema (teškoće koje nisu svladane u potpunosti kad se odmaknemo od vodikovog prema težim atomima). Samo poznavanje temeljne elektromagnetske interakcije nije dovoljno da bi se predvidjelo postojanje kristala.

□ NUKLEARNA DOMENA

Poznavanje elektrona i protona nije bilo dostatno za razumijevanje atomskih jezgara. To je postalo moguće tek nakon otkrića dviju novih čestica, neutrona i pozitivno nabijenoga “elektrona”, pozitrona. Uz njih, da bi objasnio β -radioaktivne raspade jezgara, Pauli je uveo još jednu neutralnu česticu koju se nije moglo izravno opažati — neutrino. Ipak je kao neriješen problem ostalo još jako nuklearno vezanje koje drži na okupu protone i neutrone (*nukleone*) u jezgri. Taj problem

³Kasnije ćemo vidjeti da je taj bezdimenzionalni broj povezan s vjerojatnošću da elektron emitira ili apsorbira kvant svjetlosti (foton)

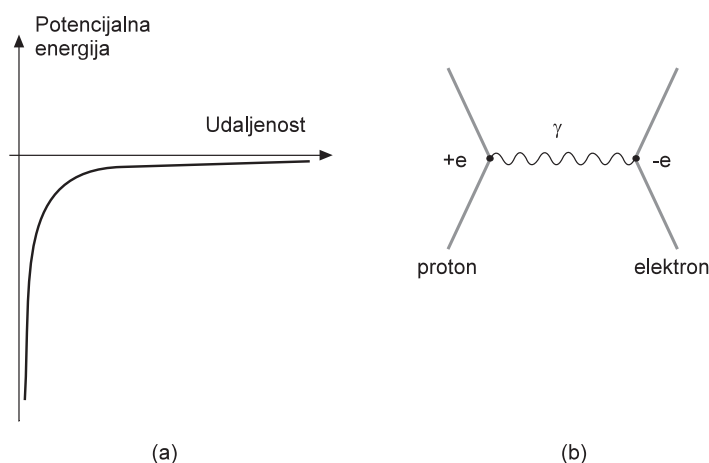
“nuklearnoga ljepila” Yukawa je razriješio uvođenjem principa, koji se kasnije pokazao temeljnim u izučavanju subatomske fizike — da se međudjelovanje zbiva kroz loptanje česticom-posrednikom (medijatorom sile). Kako sila nastaje loptanjem, može nam dočarati sljedeća analogija: zamislimo dva čovjeka u čamcu, koja se počinju dobacivati loptom (sl. 1.4). Pri svakom odbačaju i uhvatu lopte zbog predanog impulsa čamci će se početi udaljavati (odbijati). Ako zamislimo dovoljno spretno dobacivanje bumerangom umjesto loptom, možemo si dočarati i privlačenje. Dakako da u posljednjem slučaju medij (zrak kroz koji se giba bumerang) ima presudnu ulogu.



Slika 1.4: *Izmjenjivanje (loptanje) česticom rezultira silom*

□ DOMENA ELEMENTARNIH ČESTICA

Yukawino je razmišljanje o prijenosniku sile polazilo od koncepta fotona - kvanta polja elektromagnetskog međudjelovanja. Naime, da kulonski potencijal (1.6) kojim se npr. privlače elektron i proton u atomu, ima svoje izvorište u loptanju — “virtualnoj izmjeni” fotona (sl. 1.5).



Slika 1.5: *Privlačni kulonski potencijal (a) ima izvorište u virtualnoj izmjeni fotona (b)*

Po analogiji Yukawa zaključuje da postoji “U-kvant”, medijator nuklearne sile, koji mora biti dovoljno učinkovit da nadvlada odbojne sile između pozitivno nabijenih protona u jezgri atoma. Budući da ta sila ne djeluje na udaljenosti-
ma većim od dimenzija atomskih jezgara⁴, pridružena potencijalna energija mora opadati s udaljenošću brže od kulonske, npr. kao

$$\pm g_U^2 \frac{e^{-\lambda_U \cdot r}}{r} . \quad (1.10)$$

Izjednačavanjem dosega ovog potencijala,

$$\lambda_U = \frac{\hbar}{m_U c} , \quad (1.11)$$

s dosegom nuklearne sile ($2 \cdot 10^{-15} m$), Yukawa je predvidio masu medijatora, $m_U \simeq 200 m_e$.

Godine 1935., kada je Yukawina teorija objavljena, otkrivač pozitrona C. D. Anderson opazio je u maglenoj komori trag čestice od stotinu i trideset elektronskih masa, odnosno devetine mase protona. Otuda i predloženo ime mezotron, uskoro skraćeno na mezon. Ta se čestica, po svemu osim u masi, pokazala vjer-
nom kopijom elektrona (μ lepton). Na otkriće Yukawine čestice, koja je u dovolj-
no snažnom međudjelovanju s atomskom jezgrom, trebalo je pričekati još jedno desetljeće, kada je C.F. Powell odlučio izložiti kozmičkom zračenju nove fotograf-
ske emulzije, prvi put upotrebljene nakon Drugoga svjetskoga rata. Fotografske
ploče izložene na Andama u Boliviji dale su sjajne rezultate. Iz tragova se za-
ključilo da se radi o π mezonu (pionu), čestici koja se u svemu podudara s onom
koju je predvidio Yukawa. Godine napornih teorijskih i eksperimentalnih poku-
šaja i promašaja na kraju su okrunjene s dvije Nobelove nagrade — 1949. godine
Yukawi i 1950. Powellu. Otkrivanje novih čestica nije se zaustavilo na pionu.
Uskoro su slijedila otkrića ostalih mezona ($\eta, \rho, \omega, \phi, \dots$), najprije u kozmičkom
zračenju, a poslije i u pokusima s ubrzivačima. Od svih tih mezona pion je naj-
lakši i stoga odgovoran za “rep” nuklearne sile, tj. onaj njen dio koji ima najveći
doseg (sl. 1.6).

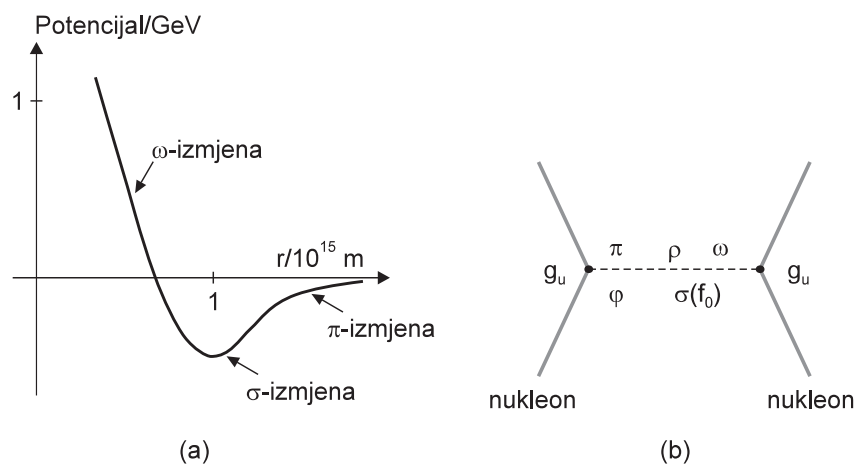
Jakost loptanja π mezonom može se izraziti bezdimenzijskom konstantom, po analogiji s kulonskim potencijalom. Ovoga puta, potencijal na udaljenosti kom-
tonske valne duljine piona,

$$V(r) = f^2 \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r} \simeq \frac{f^2}{4\pi r} , \quad (1.12)$$

izražen u energijama mirovanja piona, ($g m_\pi c^2$), daje za konstantu proporcional-
nosti

$$g = \frac{f^2}{4\pi \hbar c} \simeq 15 . \quad (1.13)$$

⁴odnosno da za razliku od elektromagnetskog, pridruženi tok trne s udaljenošću



Slika 1.6: Potencijal međunukleonskog međudjelovanja (a). Udio od izmjenne pojedinog mezona (b) određen je predznakom i jakošću vezanja kojom se pojavljuje u Yukawinom izrazu

Prema relaciji (1.11), virtualno loptanje težim mezonima odvija se na manjim udaljenostima na kojima je međunukleonski potencijal odbojan. Sama činjenica da u izgradnji jakog nuklearnog međudjelovanja sudjeluje više čestica ipak zadaje udarac Yukawinoj mezonskoj teoriji kao teoriji *temeljne sile*. Danas se ona shvaća kao preostala (rezidualna) sila. No ideja formiranja potencijala sile kroz loptanje česticom-medijatorom ugrađena je u sve buduće teorije koje opisuju elementarne procese u fizici. Tako ćemo se u kasnijim poglavljima uvjeriti da i Yukawin potencijal (1.10) i kulonski potencijal (1.6) slijedi iz Yukawinog načela, “principa loptanja”.

□ BAŽDARNA SIMetriJA I PRIJENOSNICI SILA

Činjenica da jako nuklearno međudjelovanje koje drži jezgru na okupu nema jednoznačnog mezona-medijatora, upućuje da je tu riječ o preostalom učinku nekog temeljnijeg međudjelovanja. Što je sa slabom nuklearnom silom koja omogućuje β -raspad jezgara? Po staroj Fermijevoj teoriji riječ je o interakciji u jednoj točki za koju na prvi pogled ne bi postojalo polje medijatora. No po Yukawi sve se sile temelje na izmjeni mezona, samo ti su mezoni na nukleone vezani jako, a na lakše čestice (leptone), slabo. Na ovaj način formuliran je u stvari prvi pokušaj ujedinjenja jakog i slabog međudjelovanja. No taj se pokušaj pokazao preuranjenim punih četrdeset godina. Naime, toliko je vremena bilo potrebno da se kroz nagomilano iskustvo iskristalizira princip lokalne baždarne (engl. *gauge*) simetrije, po kome samo vektorske čestice (spina 1) mogu biti prijenosnici temeljnih sila. Znakovito je da za razliku od bezdimenzionalne veličine α , jakost slabog međudjelovanja

u Fermijevoj slici ima dimenziju recipročnog kvadrata mase (što je ekvivalentno dimenziji površine u prirodnom sustavu jedinica, koji ćemo uvesti u slijedećem odjeljku),

$$G_F \simeq 10^{-5} m_p^{-2}. \quad (1.14)$$

Ta je činjenica naznačila trag koji je doveo do otkrića otkrića W^\pm i Z -baždarnih bozona, kao nosioca slabe nuklearne sile. Time je i baždarni princip doživio najblistaviju potvrdu.

□ ULOGA GRAVITACIJE

Sila Newtonovog privlačenja, koja je u svakodnevnom životu na prvom mjestu, izgleda potpuno zanemariva u *fizici elementarnih čestica*. Jakost nekog međudjelovanja najjasnije se vidi u vrijednosti bezdimenzionalne jakosti međudjelovanja.

Zbog male jakosti Newtonove konstante

$$G_N = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-2} = 6.71 \cdot 10^{-39} \hbar c (\text{GeV}/c^2)^{-2}, \quad (1.15)$$

gravitacijski potencijal između dva nukleona,

$$G_N \frac{m_n^2}{r}, \quad (1.16)$$

izražen energijom mirovanja nukleona $m_n c^2$, vodit će na fantastično malu bezdimenzionalnu jakost:

$$\alpha_G = \frac{G_N m_n^2}{\hbar c} = 0.59 \cdot 10^{-38}. \quad (1.17)$$

Slično možemo procijeniti kolika bi trebala biti masa čestice, da bi njena gravitaciona energija bila usporediva s njenom energijom mirovanja (da bude $\alpha_G = 1$). Tu vrijednost nazivamo Planckovom masom

$$M_{Pl} = (\hbar c / G_N)^{1/2} = 1.221(4) \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2 = 2.18 \cdot 10^{-5} \text{ g}. \quad (1.18)$$

Pridružena komptonska valna duljina karakterizira udaljenost na kojoj gravitacija postaje bitna i naziva se Planckovom duljinom:

$$l_{Pl} = \hbar / M_{Pl} c = (G_N \hbar / c^3)^{1/2} \simeq 1.6 \cdot 10^{-33} \text{ cm}. \quad (1.19)$$

Vrijeme potrebno svjetlosti da tu udaljenost prevali je Planckovo vrijeme:

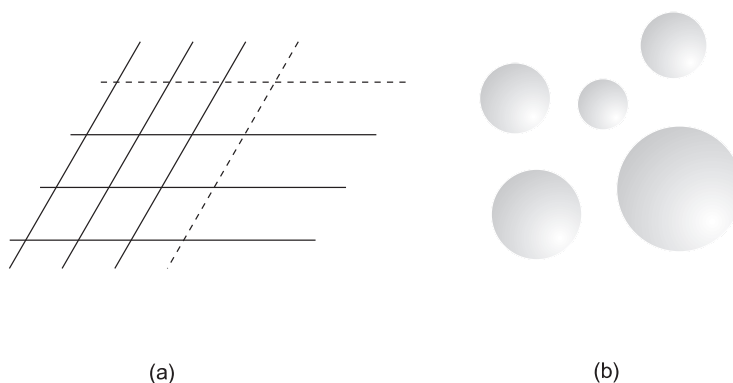
$$t_{Pl} = (G_N \hbar c^{-5})^{1/2} \simeq 5.4 \times 10^{-44} \text{ s}. \quad (1.20)$$

1.1.3 Prirodni sustav jedinica

Formuliranje “zakona fizike” svodi se na postavljanje relacija između osnovnih koncepata teorije. Pri tome se uvode “temeljne konstante”, a neke od njih se mogu eliminirati ako prijeđemo na nove jedinice mjerenja. Nekoliko usputnih ilustrativnih primjera pomoći će nam da se odlučimo za “prirodni sustav jedinica” u kojima će fizika čestica naći najjednostavniji opis.

□ GEOMETRIJSKA ANALOGIJA FIZIKE

Prapočelo fizike, kao umijeća postavljanja relacija između veličina za koje nije uvijek očito da su povezljive, nalazimo u geometriji. Primjerice, površinu lika



Slika 1.7: Za razliku od parceliranja ravne plohe (a), parceliranje uljnih mrlja na vodi ili mjehura od sapunice (b) traži uvođenje Ludolphovog broja π

mjerimo popunjavanjem elementarnim površinama. Prijeđemo li s popunjavanja elementarnim krugovima površine $S = \pi a^2$ na popunjavanje pravokutnicima $S = a^2$, izbjegli smo uvođenje “temeljne konstante” π — “zakon” mjerenja poprima najjednostavniji oblik. Kvadratura kruga već traži uvođenje broja π (sl. 1.7).

□ KLASIČNA MEHANIKA

Zakoni klasične mehanike sadrže konstante “utkane” u određeni sustav jedinica. Budući da mehaniku primjenjujemo u “svakodnevnim situacijama”, dogovorno se upotrebljava SI (racionalizirani MKSA) sustav jedinica temeljen na metru, sekundi i kilogramu kao jedinicama za duljinu, vrijeme i masu. Međutim, pri opisu elektromagnetizma javlja se neobična, složena situacija, koja rezultira iz zasebnog izbora mehaničkih i električnih jedinica. Kulonska, elektrostatička potencijalna energija (1.6) za dva elektrona u vakuumu proporcionalna je s $1/r$, gdje je

konstanta proporcionalnosti u SI sustavu jedinica dana s

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} . \quad (1.21)$$

U tom izrazu 4π je čisto geometrijski faktor (površina jedinične sfere). Veličina $\epsilon_0 = 8.854187\dots \cdot 10^{-12} \text{F m}^{-1}$, *permitivnost vakuuma*, u stvari je samo konverzioni faktor koji pretvara Coulomb (jedinicu električnog naboja u SI sustavu) u jedinicu “energije · udaljenosti”.

Slično, magnetska sila uključuje *permeabilnost vakuuma* μ_0 , koja opet ne odražava nikakvo svojstvo vakuuma. Činjenica da je produkt ϵ_0 i μ_0 fiksiran, $\epsilon_0\mu_0 = 1/c^2$, pokazuje da je ponovno riječ o konverzionom faktoru, pri čemu c ukazuje na *relativističku* prirodu magnetskog polja (pojavljuje se za naboj u gibanju). Dakle, nema stvarne potrebe uvođenja nezavisne jedinice naboja SI sustava: mjerimo li naboj u jedinicama $e/\sqrt{\epsilon_0}$, jedina konstanta koja se pojavljuje u elektromagnetizmu je *brzina svjetlosti*:

$$c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1} . \quad (1.22)$$

U fizici čestica daje se prednost Heaviside-Lorentzovom sustavu jedinica, već naznačenom u izrazima (1.6) i (1.7). On odgovara izboru $\epsilon_0 = 1$ i $\mu_0 = 1$. Pritom je u Coulombovu zakonu i konstanti fine strukture zadržan faktor 4π , da bi jednadžbe gibanja elektrodinamike, Maxwelllove jednadžbe, poprimile najjednostavniji oblik.

□ KVANTNA FIZIKA

Da bi objasnio fotoelektrični efekt, Einstein je prizvao novu temeljnu konstantu \hbar . Ta konstanta ulazi u kinetičku energiju elektrona kojeg iz metala karakteriziranog izlaznim radom W izbacuje zračenje kružne učestalosti (pulzacije) ω :

$$E = \hbar\omega - W . \quad (1.23)$$

Konstanta koju je prvi uveo Planck 1900. godine, za opisivanje zračenja crnog tijela, ima vrijednost

$$\hbar = 1.05457266(63) \cdot 10^{-34} \text{ J s} = 6.5821220(20) \cdot 10^{-22} \text{ MeV s} . \quad (1.24)$$

Time Planck-Einsteinova relacija (1.23) putem *kvantne konstante* \hbar povezuje ono što je prividno (klasično) nepovezljivo: klasični čestični koncept energije (E) i klasični valni koncept pulzacije (ω)!

Prirodni sustav jedinica uvodi se odabirom $\hbar = c = 1$ za dvije ustanovljene temeljne konstante (1.22) i (1.24). Time umnožak

$$\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \rightarrow 1 \quad (1.25)$$

opisuje pretvorbu (konverziju) između energije i udaljenosti

$$\text{MeV} \simeq \frac{1}{197} \text{ fm}^{-1} \quad \text{ili} \quad 1 \text{ fm} \simeq 5.07 \text{ GeV}^{-1}. \quad (1.26)$$

Temeljne veličine koje ulaze u fizikalne relacije izražene su jedinicom mase $[M]$ ili jedinicom recipročne duljine $[L^{-1}]$:

$$\begin{array}{ccc} \text{energija } mc^2 & \text{duljina } \hbar/mc & \text{vrijeme } \hbar/mc^2 \\ [M] & [M]^{-1} & [M]^{-1} \end{array} .$$

Osim masa u izraze će još ulaziti čisti brojevi ($\pi = 3.1416\dots$, $e = 2.718\dots$) te bezdimenzionalne konstante, koje mjere jakost temeljnih sila. Ostaje otvoreno pitanje da li je moguć izbor neke mase, kao temeljne jedinice. Vidjeli smo u prošlom odjeljku da Newtonova konstanta G_N vodi u kombinaciji s \hbar i c na Planckovu masu. Pitanje je da li je G_N na istom stupnju temeljnosti s čisto konverzionim faktorima \hbar i c . Vjerojatnije je G_N bliže naboju e — mjeri jakost međudjelovanja pa time i izvorna fizikalna svojstva svemira u kojem živimo. No za razliku od naboja e , G_N ne može u kombinaciji s \hbar i c dati bezdimenzionalnu veličinu koja bi mjerila jakost gravitacije. Ta činjenica, koja je povezana s poteškoćom da se gravitacija pomiri s kvantnom mehanikom, naznačuje da je G_N na nižem stupnju temeljnosti.

1.2 Identifikacija čestica i sila

Saznanja o česticama dobivamo iz njihova međudjelovanja, tj. preko sila koje djeluju među njima. Za razliku od izravnoga Cavendisheva (ili Eötvösova) mjerenja gravitacijskog privlačenja između olovnih kugli i Coulombova (ili Robisonova) mjerenja odbijanja nabijenih kuglica, fizika čestica je upućena na neizravne metode mjerenja. Gotovo sve informacije dobivene o česticama potječu iz triju izvora:

- ◇ iz proučavanja RASPRŠENJA čestica na metama (mjerenja energije i kuta otklona raspršene čestice);
- ◇ iz proučavanja RASPADA čestica (prepoznavanja ostataka spontanog raspada čestica);
- ◇ iz proučavanja VEZANIH STANJA (utvrđivanja svojstava objekata složenih od više čestica).

Zadržimo se na kratkom povijesnom prikazu istraživanja produkcije i detekcije čestica te identificiranja temeljnih sila, koje je rezultirala kompaktnom slikom temeljnih čestica⁵ i “standardnom teorijom” njihovih međudjelovanja.

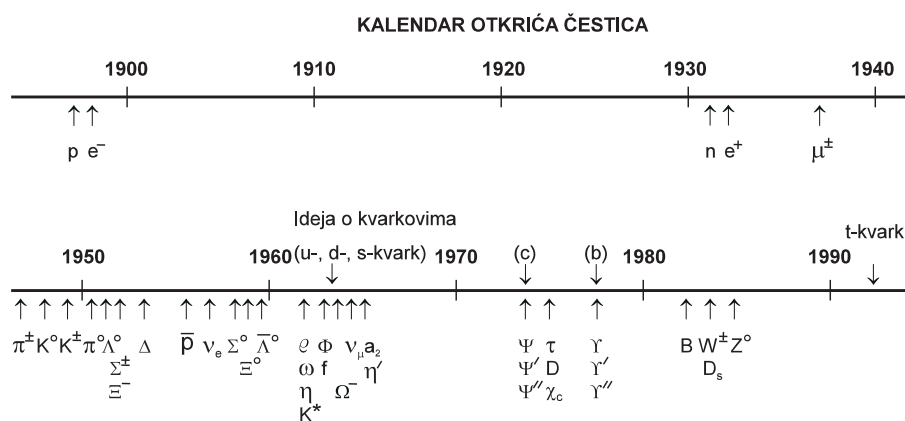
⁵Tablice u dodatku A

1.2.1 Povijesni osvrt na produkciju čestica

Uz prirodnu radioaktivnost (α , β i γ zračenje), kozmičko zračenje je drugi stalni prirodni izvor čestica visoke energije. Do ranih 50-tih, taj prirodni laboratorij doveo je do nekih od najvažnijih *otkrića* u fizici elementarnih čestica. Čestice

$$e^+, \mu, \pi, K \text{ i } \Lambda$$

uhvaćene su u fotoemulzijama postavljenim na planinama ili nošenim balonima. Ipak, događaji koji proizlaze iz kozmičkog zračenja su nepredvidivi, sa zanemari-vom vjerojatnosti pojavljivanja na danom mjestu. To objašnjava (ilustrirano “ka-lendarom otkrića” na slici 1.8) procvat otkrića čestica u drugoj polovici ovog sto-ljeća, nakon primjene ubrzivača. Za sustavno *sondiranje* sve sitnijih sastavnih



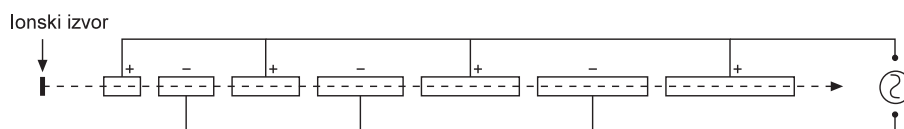
Slika 1.8: Najvažnija otkrića novih čestica nakon primjene ubrzivača

dijelova tvari mogu nam poslužiti zračenja ili čestice koje možemo kontrolirati u laboratoriju. Uz elektromagnetsko zračenje atoma (rentgensko ili X zračenje) za to sondiranje može poslužiti elektromagnetsko (γ) zračenje atomskih jezgara. S pomoću druge sastavnice prirodne radioaktivnosti, α zračenja, Rutherford je identificirao atomske jezgre na kojima se one raspršuju. Same α čestice Rutherford je prepoznao kao jezgre helija, dok je u najjednostavnijim pozitivno nabijenim Goldsteinovim “katodnim zrakama” Rutherford prepoznao *protone*, jezgre vodikova atoma.

No i α zračenje i protoni zbog svoga naboja i svojih velikih dimenzija nisu idealne sonde za izučavanje subatomske strukture. *Elektroni* (β zračenje prirodne radioaktivnosti) mogu ponuditi željeno razlučivanje ako se ubrzaju na potrebnu energiju. Naime, da bismo “elektronskim mikroskopom” postigli rezoluciju dimenzija atomske jezgre ($\Delta x \simeq 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$), treba elektrone ubrzati na energiju

$$E \simeq \frac{\hbar c}{\Delta x} \simeq 1 \text{ GeV}. \tag{1.27}$$

Za taj posao običnu vakuumsku cijev treba zamijeniti ubrzivačem. Povijesno, taj je program započeo elektrostatičkim generatorima (Van de Graffa) i njihovom tandem varijantom dobivenom ulančavanjem. No doista visoke energije mogu se postići samo njihovim višestrukim ubrzavanjem, kao što se to postiže nizom “radio-frekventnih” šupljina koje formiraju *linearni ubrzivač* (sl. 1.9). Čuveni



Slika 1.9: *Shematski prikaz linearnog ubrzivača. Protoni iz ionskog izvora ulaze u slijed potisnih cijevi u vakuumskoj komori. Duljina cijevi birana je tako da kako protoni dosežu veću brzinu, njihovo prolazno vrijeme kroz cijev bude konstantno*

“ubrzivač 2-milje” u **SLAC**-u (od engl. *Stanford Linear Accelerator Center*) ubrzavao je elektrone do energija većih od 20 GeV. Linearni ubrzivač protona do 800 MeV energije, konstruiran u Los Alamosu, služio je kao tzv. mezonaska tvornica.

Ipak, linearni ubrzivač je ubrzo pokazao svoja ograničenja. Ako bi **SLAC**-ovu aparaturu od 20 GeV htjeli unaprijediti do 500 GeV, ubrzivač duljine 3 km morao bi narasti do 75 km!

Spasonosnom se pokazala ideja *kružnoga ubrzivača* (*ciklotrona*), koji je od Lawrenceovog prijedloga iz 1930. godine evoluirao do suvremenih sudarivača (sl. 1.10). Nabijena čestica relativističke mase $m = \gamma m_0$, u *konstantnom* magnetskom polju B opisuje orbitu polumjera

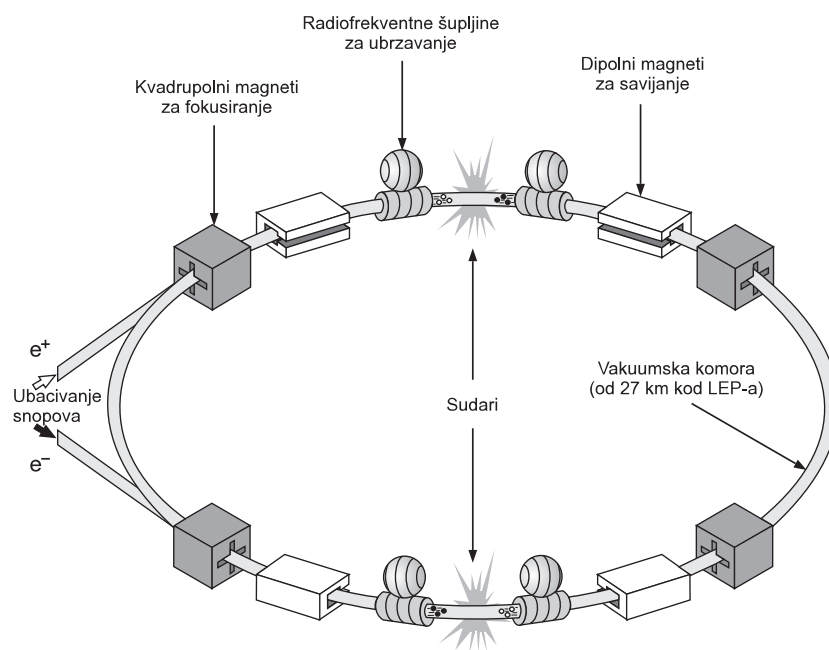
$$R = \frac{mv}{eB} . \quad (1.28)$$

Stoga promjenljivo električno polje koje služi za ubrzavanje treba podesiti na pulzaciju

$$\omega = \frac{eB}{m} . \quad (1.29)$$

Usavršenu verziju kružnog ubrzivača, sinkrociklotrona (*sinkrotrona*) predložili su 1945. godine McMillan i Veksler. Magnetsko su polje podesili tako da čestica bude u fiksiranoj orbiti, a električno polje tako da ubrzava samo čestice koje se u danoj radiofrekventnoj šupljini nađu u pravi trenutak. Ovim je tehnikama otvorena era moćnih ubrzivača. No postoje i važni ograničavajući faktori kružnih ubrzivača:

- ◇ GUBITAK ENERGIJE kružnih ubrzivača putem sinkrotronskog zračenja. Tijekom jednog obilaska kružne orbite polumjera R čestica mase m , energije E (odn. relativističkih parametara $\beta = v/c \simeq 1, \gamma = E/m$, koje ćemo



Slika 1.10: *Shematski prikaz kružnog ubrzivača (primjerice **LEP-a**), koji otjelovljuje elemente koje susrećemo već kod TV prijemnika : sustav ubrzanja, savijanja snopa, fokusiranja, te vakuumski sustav*

uvesti u slijedećem poglavlju) gubi energiju

$$\frac{\Delta E}{2\pi R} = \frac{4\pi e^2 \beta^2 \gamma^4}{3R}. \quad (1.30)$$

To je razlogom da se nakon **CERN**-ovog **LEP-a** ne planira kružni elektronsko-pozitronski ubrzivač više energije. Jedan izlaz iz ove poteškoće bio bi prijelaz na novu generaciju linearnih ubrzivača, primjerice **CLIC** (od engl. **CERN Linear Collider**). Drugo, operativnije rješenje (planirano za **LHC**, protonski supersudarivač), oslanja se na činjenicu da protoni i antiprotoni gube po jednoj orbiti za faktor

$$\left(\frac{m_e}{m_p}\right)^4 \simeq 10^{-13} \quad (1.31)$$

manje energije nego elektroni ili pozitroni. Jedino što je za proton ukupna energija raspoređena po njegovim konstituentima, tako da na kvark ili gluon ne otpada više od desetine energije protona. To je popraćeno i otežanom analizom protonskih sudara.

- ◇ **LUMINOZNOST** je drugi ograničavajući faktor, koji odražava činjenicu da udarni presjeci detaljnije diskutirani u odjeljku ?? imaju dimenziju $[M]^{-2}$.

Istraživanja na sve manjim dimenzijama praćena su padom udarnih presjeka, što se nastoji nadoknaditi povećanjem *luminoznosti*, definirane kao

$$\mathcal{L} = (\text{broj čestica u jedinici vremena}) / (\text{jedinica površine}) . \quad (1.32)$$

Tada je broj čestica koje po jedinici vremena prolaze kroz površinu $d\sigma$

$$dN = \mathcal{L} d\sigma , \quad (1.33)$$

a time i broj čestica raspršenih u jedinici vremena u prostorni kut od Ω

$$dN = \mathcal{L} \sigma(\Theta) d\Omega . \quad (1.34)$$

Na ovom koraku izraz

$$\sigma(\Theta) = \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{\mathcal{L}} \frac{dN}{d\Omega} \quad (1.35)$$

predstavlja definiciju diferencijalnog udarnog presjeka koju vole “akceleratorski” fizičari: *vjerojatnost događaja dana je umnoškom udarnog presjeka i luminoznosti*. Ovdje smo nove pojmove uveli za pokuse na *fiksiranoj meti*, gdje susrećemo još jedan ograničavajući faktor u usporedbi sa *sudarivačem* na kome se križaju i sudaraju snopovi čestica.

◇ RASPOLOŽIVA ENERGIJA za stvaranje čestica ima jednu od vrijednosti

$$s = (p_a + p_b)^2 \sim \begin{cases} E_a m_b & \text{za fiksiranu metu,} \\ 4E^2 & \text{za sudarivač s } E_a = E_b \equiv E. \end{cases} \quad (1.36)$$

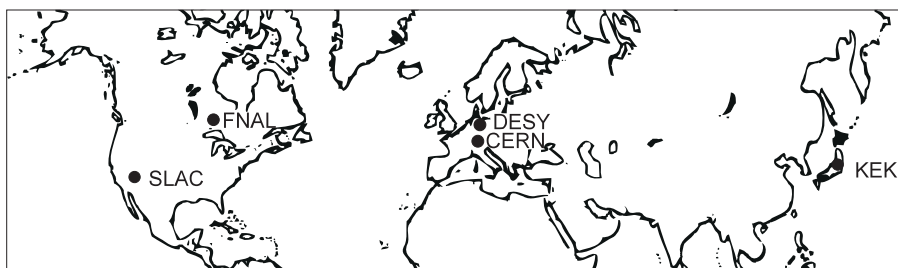
Time smo za stvaranje novih čestica upućeni na efikasnije aparature sa sudarajućim snopovima čestica.

1.2.2 Od ubrzivača do suprasudarivača

Očigledno za snopove čestica koje ćemo ubrzavati treba rabiti svakodnevne stabilne čestice, do kojih je lako doći. Za proizvodnju elektrona dovoljno je zagrijati metal, a za proizvodnju protona treba ionizirati vodikov atom. Udaranjem takvim snopovima ubrzanih čestica na mete, dobivaju se egzotične, manje svakodnevne čestice. Vještim aranžiranjem apsorbera i magneta mogu se izdvojiti (separirati) željene egzotične čestice u intenzivne sekundarne snopove. Današnje tehnike omogućuju da se to uspješno izvodi za pozitrone (e^+), mione (μ), pione (π), kaone (K) i antiprotone (\bar{p}). Cilj je postići dovoljno intenzivne snopove da se može govoriti, primjerice, o “kaonskim tvornicama” ili “tvornicama B mezona”. Od

osobita interesa bit će tvornice čestica koje pripadaju obiteljima teških fermiona (tvornice c kvarka, τ leptona, b kvarka, primjerice **BTCF**, od engl. *Beijing Tau-Charm Factory*). Na istoj liniji ostvaruju se i “tvornice s lakim okusima”, primjerice “tvornica ϕ čestica” **DAΦNE**, (od engl. *Double Anular Φ -factory for Nice Experiments*) na Frascatiju u Italiji i paralelni **CEBAF** (od engl. *Continuous Electron Beam Accelerator Factory*) u USA, te **ELFE** (od engl. *Electron Laboratory For Europe*) planiran u Europi). Time su otvorena vrata eksperimentima visoke statistike, dakle istraživanjima koja svoj adut vide u velikoj preciznosti.

Stabilnost elektrona, protona i njihovih antičestica omogućuje uskladištenje tih čestica u skladišne prstenove (engl. “storage rings”) - da bi ih u sljedećem koraku ubrzali i uskladištili u nekom sljedećem prstenu većih dimenzija. To je zapravo put kojim su krenuli vodeći svjetski akceleratori centri. Na postojećim ubrzivačima dograđivani su moderni sudarivači (vidi tablicu 1.1 vodećih svjetskih akceleratorskih centara i prikaz njihovog rasporeda u svijetu i sliku 1.11). Primjerice, stepenice koje je prošao **SLAC**, su sljedeće:

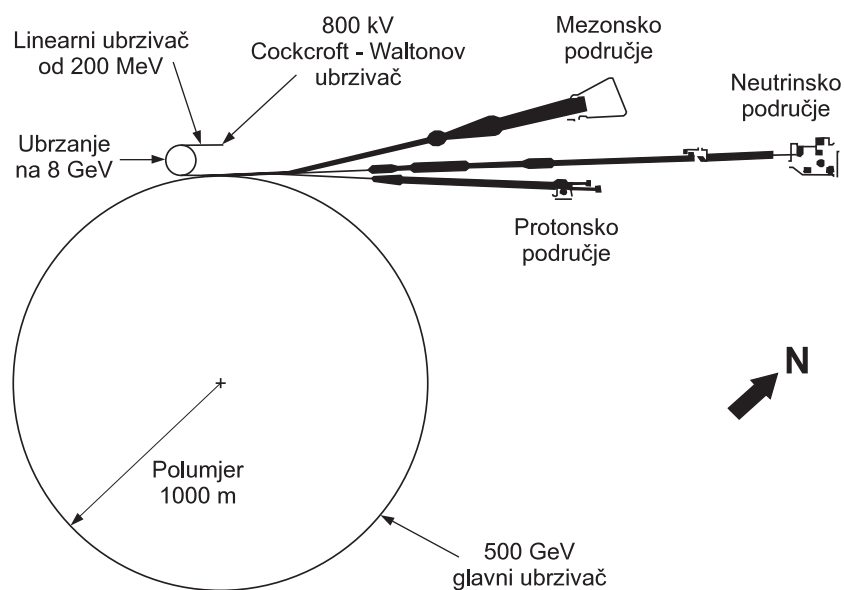


Slika 1.11: *Raspored vodećih ubrzivača u svijetu*

1. **PEP** – Electron-Positron Storage Ring (CM energija 30 GeV)
2. **SPEAR** – Electron-Positron Storage Ring (CM energija 2-7 GeV)
3. **SLC** – Electron-Positron Collider (CM energija 100 GeV).

Slično, stepenice za Fermilab (vidi sliku 1.12) su sljedeće :

1. Elektrostatički Cockroft-Waltonov ubrzivač
2. Linearni ubrzivač na 200 MeV
3. Kružni ubrzivač na 8 GeV
4. Tevatron, ubrzivač na 500 GeV, koji je uvođenjem još jednog prstena pretvoren u sudarivač na kojem je opažen t kvark!



Slika 1.12: *Fermilab*

Kratica	Puni naziv	Ime (km)
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center	SLC (3,2)
FNAL	Fermi National Accelerator Laboratory	Tevatron (6,3)
CERN	Centre Européene pour la Recherche Nucléaire	LEP (27)
DESY	Deutches Elektronen - Synchrotron	HERA (6,3)
KEK	Tsukuba, Tokyo	TRISTAN (3)

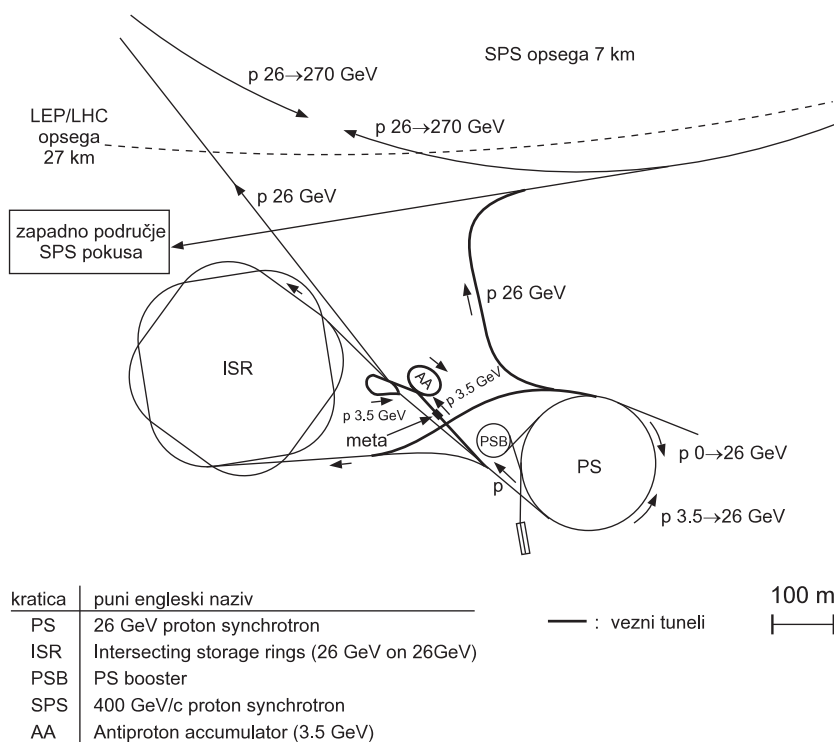
Tablica 1.1: *Vodeći svjetski centri visokoenergijskih istraživanja*

Zadržat ćemo se još na **CERN**-u koji je evoluirao preko **SPS**-a (sl. 1.13) do stadija **LEP/LHC**-a (sl. 1.14):

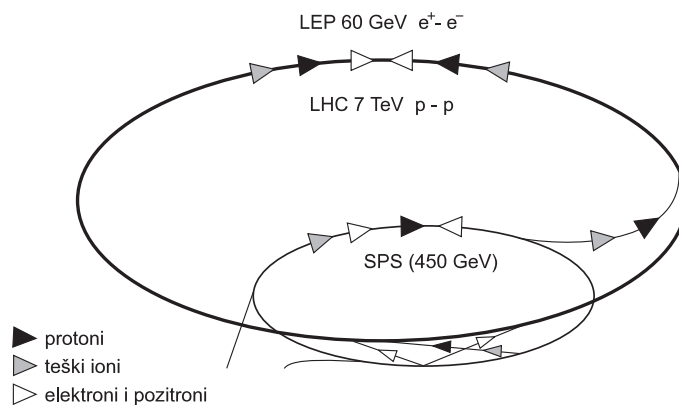
1. **ISR** Proton-Proton Storage Ring (CM energija 20-60 GeV) (zatvoren 1984)
2. **SPPS** Proton-Antiproton Storage Ring (CM energija 600 GeV)
3. **LEP/CERN** I faza 50 + 50 GeV e^+e^- , II faza 95+95 GeV
4. **LHC/CERN** Large Hadron Collider, u izgradnji na **LEP**-ovom tunelu.

□ **LHC – prvi globalni akceleratori pokus**

Izučavanje Fermijeve skale do te je mjere zahtjevno da traži novu generaciju sudarivača — suprasudarivače. Od dva predložena projekta, američkog **SSC** (Super-



Slika 1.13: **SPS na CERN-u**

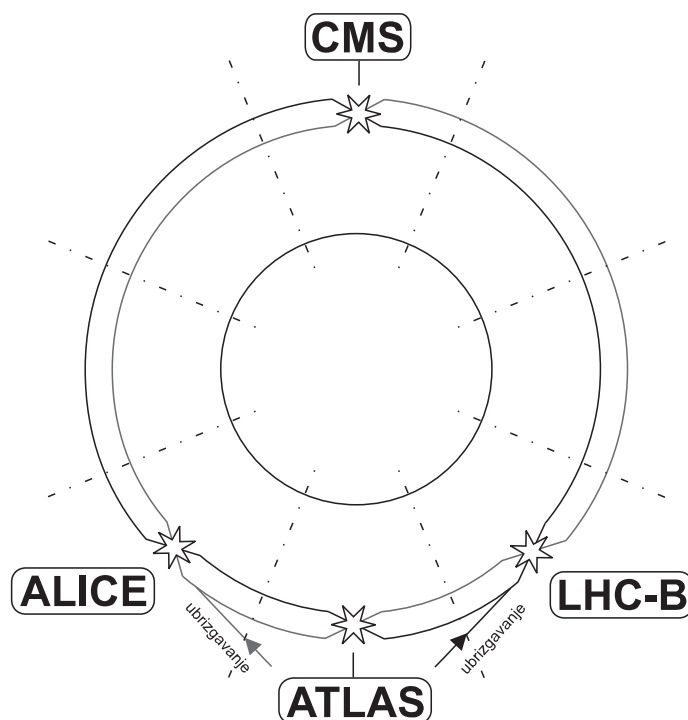


Slika 1.14: **LEP/LHC na CERN-u**

conductor Super Collider) i europskog **LHC**, samo je ovom drugom 1994. godine odobreno financiranje. Potom su se i američki fizičari, uz fizičare s ostalih kontinenata, okrenuli **LHC-u**, koji je prerastao u prvi globalni poduhvat te vrste. Po svojoj važnosti **LHC** to i zaslužuje.

Ilustrirajmo to nekim pojedinostima : kičma **LHC-a** su supravodljivi dipolni magneti duljine 13 m koji daju polje od 8.6 T. Oni će voditi 2835×2835 roja s po

10^{11} protona do 4 zone sudaranja. Na tim mjestima smještene su četiri **LHC** pokusa, koji nose imena svojih detektora (prikazani prema rasporedu po aktivnostima na sl. 1.15) :



Slika 1.15: **ATLAS, CMS, ALICE, LHC-B**

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) predložen od grupe koja uključuje 1505 fizičara sa 139 ustanova iz 31 zemlje;

CMS (Compact Muon Spectrometer) predložen od grupe 1569 fizičara sa 138 ustanova iz 31 zemlje, uključujući Hrvatsku.

Ova dva detektora prvenstveno su namijenjena otkrivanju nove fizike (vezane uz Higgsov bozon i suprasimetrične čestice).

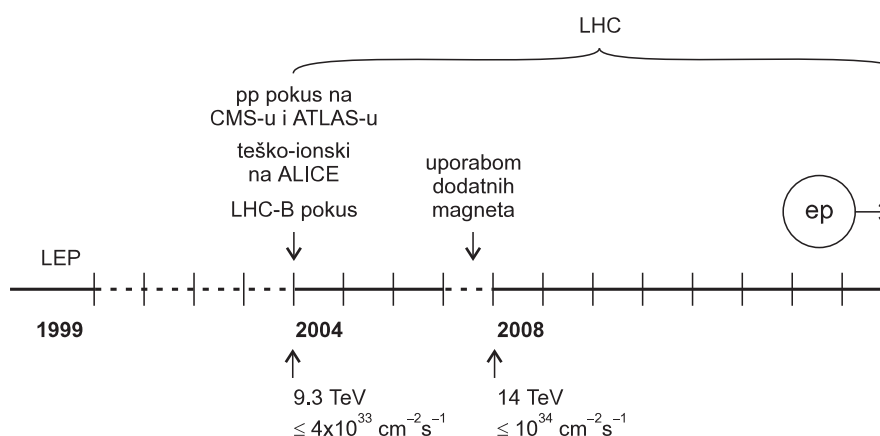
ALICE (A Large Ion Collider Experiment) pokus, namjenjen je izučavanju nuklearne tvari na visokim temperaturama i gustoćama;

LHC-B pokus, namjenjen je preciznom određivanju kutova *CKM* matrice.

Na slici 1.16 prikazan je kalendar **LHC**-a, čija će se dogradnja izvoditi u tri faze:

1. U prvoj fazi koja bi započela 2004. godine, radio bi na 9.3 TeV s luminoznošću $4 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$;

2. U drugoj fazi radio bi na 14 TeV s $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, što bi se postiglo umetanjem dodatnih supravodljivih magneta 2008. godine;
3. U konačnoj fazi došlo bi do eventualne konstrukcije $e - p$ sudarivača, koji omogućuje najnoviji dizajn — **LHC** magneti na dnu tunela omogućavali bi u budućnosti postavljanje **LEP** magneta iznad njih. Primjerice, elektroni na 60 GeV omogućavali bi luminoznost veću od $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na 1.3 TeV u $e^\pm - p$ sudarima.

Slika 1.16: Kalendar **LHC** projekta

□ ERA NEAKCELERATORSKIH POKUSA ISPRED NAS?

Dok priprema za **CERN**-ov veliki hadronski sudarivač ide dalje, američki **SSC** (Superconducting Super Collider) s 20 TeV snopovima protona u 85 km dugom tunelu u Texasu, otkazan je krajem 1993. godine. Razlog — cijena koja je premašila 10 milijardi dolara. Nakon nacionalnih akceleratorских programa, pred nama je era kontinentalnih ili čak globalnih poduhvata. Takva je naime sudba pokušaja da se novi slojevi svijeta istraže višim energijama — faktorom tisuću u energiji za svaki slijedeći korak. Tajne vanjskog atomskog omotača razotkrivene su energijama eV, unutrašnjost atoma ispitivana je keV-skim X zračenjem, atomske jezgre energijama MeV, dok na skali GeV iskrsavaju evidencije za kvarkove.

No “zajednica fizičara”, ako želi biti odgovorna i prema sebi i prema okolini (poreznim obveznicima), mora se suočiti s realnim granicama rasta. Svatko tko ima ambiciju oblikovati budućnost fizike čestica, poziva se na povijest (“učiteljicu života”). Freeman Dyson [?] gleda za kakav su tip otkrića u fizici čestica do sada dodjeljivane Nobelove nagrade i nalazi da je dodjeljeno

- ◇ 1/3 na fronti energije;

- ◇ 1/3 na fronti preciznosti (točnosti mjerenja);
- ◇ 1/3 na fronti rijetkosti pojavljivanja (iznenađenja).

Kako su sve tri fronte podjednako obećavajuće za otkrića novih zakona prirode, on zagovara mješavinu programa koji bi dali priliku razvoju znanosti na sve tri fronte, kao alternativu suprasudarivačima. Energija može biti kompenzirana visokom luminoznošću ubrzivača i detektorom velike moći razlučivanja. Zamjetno je i okretanje fizike čestica prema svemiru, kako putem neakceleratorских (podzemnih) pokusa, tako i putem satelitskih promatračnica. Više o tome može se pronaći u [?].

1.2.3 Identifikacija čestica i međudjelovanja

□ DETEKCIJA ČESTICA

Osnovna metoda detekcije čestica bazira se na opažanju prijenosa energije na medij (sredstvo) kroz koji one prolaze. Taj prijenos energije manifestira se putem ionizacije ili pobuđivanja atoma sredstva. Gubitak energije uslijed ionizacije opisan je Bethe-Blochovom formulom

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_0 z^2 e^4 Z}{mv^2 A} \left[\ln \left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right], \quad (1.37)$$

za česticu mase m , naboja ze , brzine v na putu (sloju) x mjenom u kg m^{-2} , u sredstvu atomskog i rednog broja Z, A (N_0 je Avogadrov broj). Ovisnost o mediju (s efektivnim ionizacijskim potencijalom $I \simeq 10Z \text{ eV}$) je slaba — malo se razlikuje od minimuma $(dE/dx)_{min} \simeq (0.1 - 0.15 \text{ MeV m}^2\text{kg}^{-1})$.

Efektu opisanom formulom (1.37) dodat će se kulonsko raspršenje na jezgama, opisano Rutherfordovom formulom (??) u četvrtom poglavlju. Za male kutne raspršenja taj je udarni presjek velik i vodi (za raspršenje lakih čestica, npr. elektrona) na značajne gubitke putem kočnog zračenja.

Detektori trebaju bilježiti ili nabijene ione (plinski brojači) ili emitirano scintilirajuće svjetlo, Čerenkovljevo zračenje — s ciljem da se utvrdi *položaj, vrijeme i identitet* neke čestice. Da bi se to postiglo jedan detektor nije dovoljan — mora se ići na kombinaciju raznih detektora, koje ćemo ovdje samo nabrojiti (za više detalja vidi [?]):

- ◇ Proporcionalni brojači ;
- ◇ vlačne (engl. *drift*) komore ;
- ◇ scintilacijski brojači ;

- ◇ komore na mjehuriće ;
- ◇ komore na iskrenje ;
- ◇ Čerenkovljevi brojači .

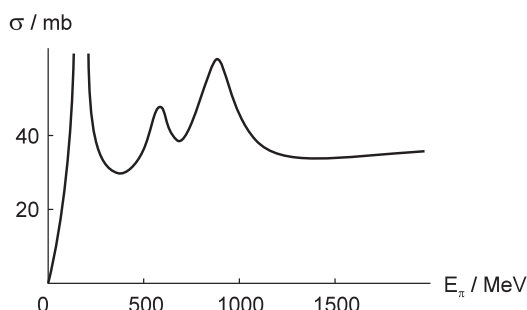
Kod visokoenergijskih međudjelovanja energija i položaj sekundarnih čestica može se utvrditi i mjerenjem ukupnih apsorpcija u detektoru velike mase u tzv. *kalorimetru*⁶:

- ◇ kalorimetri elektromagnetskih pljuskova ;
- ◇ kalorimetri hadronskih pljuskova .

Napomenimo da koliko fizika koju ćemo moći istraživati ovisi o dizajnu detektora, toliko i *očekivana* fizika uvjetuje dizajn velikih hibridnih detektora za **HERA**-u, **LEP** i posebice za već spomenuta četiri **LHC** detektora.

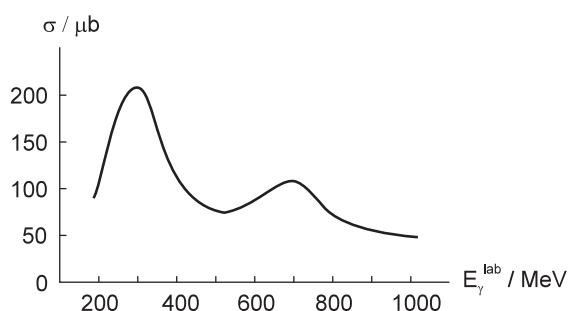
□ IDENTIFIKACIJA TEMELJNIH MEĐUDJELOVANJA

Udarni presjeci reakcija osnovni su izvor informacija o tri tipa procesa u kojima sudjeluju elementarne čestice. Navedimo ovdje tipične predstavnike jakog, elektromagnetskog i slabog međudjelovanja:

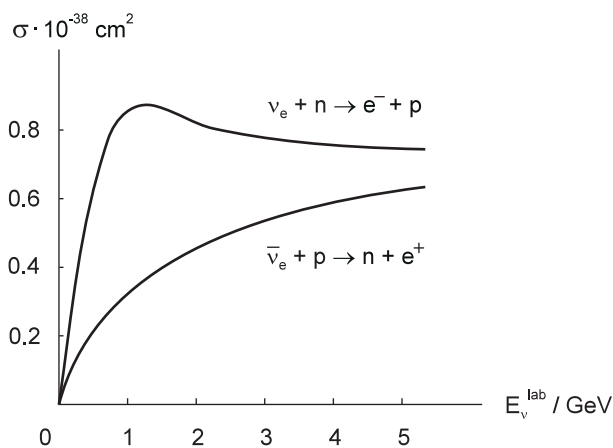


Slika 1.17: *Ukupni udarni presjek $\pi^+ + p$ raspršenja u ovisnosti o energiji piona*

- ◇ $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$ s maksimalnim udarnim presjekom $\simeq 200$ mb ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) (sl. 1.17).
- ◇ $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$ gdje udarni presjek foto-produkcije piona dostiže u maksimumu vrijednost $\simeq 200 \mu\text{b}$ (sl. 1.18).
- ◇ $\nu_e + n \rightarrow \bar{e} + p$, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ su procesi ekstremno malih udarnih presjeka $\simeq 10^{-14} \text{ b}$ (sl. 1.19).



Slika 1.18: Udarni presjek fotoprodukcije $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$ u ovisnosti o energiji fotona



Slika 1.19: Teorijski proračun raspršenja neutrina na nukleonima

Uočavamo omjer udarnih presjeka

$$1 \quad : \quad 10^{-3} \quad : \quad 10^{-12} .$$

Osim kroz gore nevedene dvočestične reakcije s karakterističnim udarnim presjecima, različita temeljna međudjelovanja manifestiraju se i putem različitih karakterističnih vremena :

jako međudjelovanje	10^{-23} s
elektromagnetsko međudjelovanje	10^{-16} s
slabo međudjelovanje	10^{-10} s

Za usporedbu, karakteristično vrijeme jakog međudjelovanja podudara se s onim dobivenim dijeljenjem karakteristične duljine jakog međudjelovanja

$$l_{jaki} = \sqrt{\sigma_{jaki}} = \sqrt{10^{-25} \text{ cm}^2} \simeq 3 \cdot 10^{-13} \text{ cm} \quad (1.38)$$

⁶to je osobito važna metoda za mjerenje energija neutralnih hadrona

brzinom svjetlosti, što daje

$$\tau_{jaki} \simeq \frac{l_{jaki}}{c} \simeq 10^{-23} \text{ s.} \quad (1.39)$$

Na vremenskoj skali jake sile, elektromagnetski raspadi su puno duljeg trajanja (reda 10^{-16} s za raspad $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, ili reda 10^{-14} s za raspad $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda\gamma$). Kao što je za elektromagnetski proces karakteristično pojavljivanje fotona, tako su procesi u kojima se pojavljuju neutrini nedvojbeno slabi (npr. $\Lambda \rightarrow pe^-\nu_e^-$). No i procesi u kojima ne sudjeluju neutrini, npr. raspad Λ -hiperona ($\Lambda \rightarrow p\pi^-$), ili kratkoživućeg neutralnog K mezona ($K_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$), odvija se sa životom

$$\tau_{\Lambda, K_s} \simeq 10^{-10} \text{ s,} \quad (1.40)$$

znatno dužim od života karakterističnog za elektromagnetsko međudjelovanje. Da su ova vremena samo orijentacijska otkrit će nam pažljiviji pogled na tablice u dodatku A. Naime, osim o jakosti međudjelovanja, vremena raspada ovisit će i o *faznom prostoru* koji je na raspolaganju produktima raspada. Ekstremni je primjer β -raspad neutrona ($n \rightarrow p+e^-+\nu_e^-$), gdje sićušna energija koja se oslobađa u tom procesu uvjetuje jako produžen život, 10^3 s u usporedbi s gore navedenih 10^{-10} s.

□ KLASIFIKACIJA ČESTICA (Mendeljejeva tablica naših dana)

Ovo poglavlje završit ćemo kratkim pregledom skupa elementarnih čestica. Najprije ćemo izdvojiti čestice medijatore sile. Primjena Yukawinog načela medijatora vodi na očekivanje različitih medijatora za razne sile. Precizna identifikacija tih medijatora bit će moguća tek po uvođenju *baždarnog principa* — zahtjeva lokalne simetrije pridružene prijenosnicima temeljnih sila. Kao rezultat proizašla je današnja “standardna teorija” s 12 baždarnih bozona, 4 elektroslaba (γ, W^\pm, Z^0) i 8 gluona jakog međudjelovanja. Postojanju svega tri vrste procesa suprotstavljeno je toliko mnoštvo “elementarnih čestica”, da epitet elementarnosti postaje upitan. Korak dalje je moguć shvatimo li same čestice kao energijske razine, od kojih su neke više, a neke manje degenerirane. Time se otvaraju nove mogućnosti klasifikacije čestica, koje se oslanjaju na približne simetrije čestičnog spektra. Gornja identifikacija triju temeljnih međudjelovanja bit će polazište pri klasifikaciji čestica odnosno pri slaganju tablica koje bi ih trebale što zornije i preglednije predočiti.

Prema sudjelovanju u procesima uočit ćemo istaknutu grupu čestica - *leptone*, (“lake”) čestice koje ne sudjeluju u jakim interakcijama. *Hadrone*, (“teške”) čestice koje sudjeluju u jakim međudjelovanjima, razdvojit ćemo na *barione* (polucijelog spina) i *mezone* (cijelog spina). Iz ovoga je jasno da su očuvane veličine, energija i impuls vrtnje, uporišta na kojima počiva naše razumijevanje prirode.

Tada masi i spinu možemo dodati još neke veličine koje se pokazuju očuvanima pri svim poznatim reakcijama između elementarnih čestica. To je očuvanje električnog naboja Q (npr. ne opažamo prijelaz $n \rightarrow p + \gamma$), očuvanje barionskog broja B (npr. ne opažamo raspad protona, $p \rightarrow e^+ + \gamma$), te očuvanja zasebnih leptonskih brojeva L_e, L_μ, L_τ (npr. ne opažamo $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$).

Pokazuje se da iza očuvanih veličina u fizici stoji moćno načelo simetrija. U stvari, upravo putem izučavanja simetrija dospjelo se do današnje "standardne teorije" čestica i sila .

□ **Seminarske teme :**

Boyd, R. N. , and I. Tanihata, "Physics with Radioactive Nuclear Beams", Physics Today, Lipanj 1992, str. 44.

Breuker, H. , H. Drevermann, C. Grab, A. A. Rademakers, and H. Stone, "Tracking and Imaging Elementary Particles", Scientific American, Kolovoz 1991, str. 58.

Cline, D. B. , and C. Rubbia, "Antiproton/Proton Colliders and Intermediate Bosons", Physics Today, Kolovoz 1980, str. 44.

Cline, D. B. , "Low-Energy Ways to Observe High-Energy Phenomena", Scientific American, Rujan 1994, str. 26.

Crawford, H. J. & C. H. Greiner, "The Search for Strange Matter", Scientific American, Siječanj 1994, str. 58

Cronin, J. W. , T. K. Gaisser & S. P. Swordy, "Cosmic Rays at the Energy Frontier", Scientific American, Siječanj 1997, str. 44

Dawson, J. M. , "Plasma Particle Accelerators", Scientific American, Ožujak 1989, str. 54.

Fraser, G. , ed. "Applying the Accelerator", CERN Courier Special Issue, 35/5, Srpanj/Kolovoz 1995

Gabrielse, G. , "Extremely Cold Antiprotons", Scientific American, Prosinac 1992, str. 78.

Golub, R. , W. Mampe, J. M. Pendlebury, and P. Ageron, "Ultracold Neutrons", Scientific American, Lipanj 1979, str. 34.

Greiner, W. , and H. Stöcker, "Hot Nuclear Matter," Scientific American, Siječanj 1985, str. 76.

Gutbrod, H. , and H. Stöcker, "The Nuclear Equation of State. " Scientific American, Studeni 1991, str. 58.

Horgan, J. "Particle Metaphysics", Scientific American, Veljača 1994, str. 70.

Jackson, J. D. , M. Tigner, and S. Wojcicki, "The Superconducting Super-collider", Scientific American, Ožujak 1986, str. 66.

Lederman, L. M. , "The Tevatron", Scientific American, Ožujak 1991, str. 48.

Litke, A. M. & A. S. Schwarz, "The Silicon Microstrip Detector", Scientific American, Svibanj 1995, str. 56.

Nagle, D. E. , M. B. Johnson, and D. F. Measday, "Pion Physics at the Meson Factories," Physics Today, Travanj 1987, str. 56.

Perl, M. L. , "Popular and Unpopular Ideas in Particle Physics," Physics Today, Prosinac 1986, str. 24.

Rees, J. R. , "The Stanford Linear Collider," Scientific American, Listopad 1989, str. 58.

Sessler, A. M. , "New Particle Acceleration Techniques," Physics Today, Siječanj 1988, str. 26.

Wilson, R. R. , "The Next Generation of Particle Accelerators," Scientific American, Siječanj 1980, str. 42.

□ **Zadaci :**

Zadatak 1.1 *Izračunati pomoću tablica klasični polumjer elektrona.*

Rješenje : *Iz klasične elektrodinamike je poznato da vlastita energija divergira za točkasti naboj pa se zato uvodi njegov (klasični) polumjer. Ako je masa elektrona posljedica elektromagnetske energije, tj.*

$$mc^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (1.41)$$

dobije se

$$r \cong 2.82 \times 10^{-15} \text{ m.} \quad (1.42)$$

Mjerenja su pokazala, međutim, da je elektron točkast, uzevši u obzir rezoluciju za više redova veličina veću od r !

Zadatak 1.2 Pokazati da je u prirodnom sustavu jedinica Bohrov polumjer vodikovog atoma jednak $(\alpha m)^{-1}$, a brzina elektrona jednaka α (m je masa elektrona, a α je konstanta fine strukture).

Rješenje : Uz Bohrov kvantni uvjet

$$L = rmv = n\hbar \quad (1.43)$$

i jednakost sila na elektron

$$\frac{mv^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}, \quad (1.44)$$

gdje je $k = 1/4\pi\epsilon_0$, dobije se traženi polumjer što daje

$$r_1 = \frac{1}{mc\alpha}, \quad (1.45)$$

gdje je

$$\alpha = \frac{ke^2}{\hbar c} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}. \quad (1.46)$$

Iz početka gornjeg računa dobije se

$$r_1 = \frac{\hbar}{mv} \quad (1.47)$$

i daljim uvrštavanjem

$$v = c\alpha\hbar, \quad (1.48)$$

odnosno $v = \alpha$.

Zadatak 1.3 Na temelju prethodnog zadatka pokažite da je vodikov atom slabo vezani sustav, čije će energijske razine biti dobro opisane nerelativističkom Schrödingerovom jednačinom.

Zadatak 1.4 U prirodnom sustavu jedinica izraziti pomoću GeV-a: a) 1 kg; b) 1m; c) 1 s.

Rješenje : a) Budući da je prema formuli

$$E = mc^2 \quad (1.49)$$

energija 1 kg jednaka

$$E = 9 \times 10^{16} \text{ J} = (9/1.6) \times 10^{16} \times 10^{19} \quad (1.50)$$

to je

$$1\text{kg} = 5.61 \times 10^{26} \text{ GeV}, \quad (1.51)$$

a stvarna jedinica je GeV/c^2 ,

$$m(\text{kg}) = 1.78348 \times 10^{-30} m(\text{MeV}) . \quad (1.52)$$

b) Iz relacije 1.26 znamo da je

$$\hbar c = 1.973 \times 10^{-13} \text{ MeV m} = 1.973 \times 10^{-16} \text{ GeV m} \quad (1.53)$$

i kako je $\hbar c = 1 = 1.973 \times 10^{-16} \text{ GeV m}$, dobijemo da je

$$1 \text{ m} = (1.973 \times 10^{-16} \text{ GeV})^{-1} = 5.07 \times 10^{15} \text{ GeV}^{-1} , \quad (1.54)$$

a stvarna jedinica je $\hbar c/\text{GeV}$,

$$l(\text{m}) = 1.97329 \times 10^{-13} l(\text{MeV}^{-1}) . \quad (1.55)$$

c) Znamo da je

$$\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J s} = 6.582 \times 10^{-22} \text{ MeV s} = 6.582 \times 10^{-25} \text{ GeV s} \quad (1.56)$$

pa je

$$1 \text{ s} = (6.582 \times 10^{-25} \text{ GeV})^{-1} \quad (1.57)$$

odnosno

$$1 \text{ s} = 1.52 \times 10^{24} \text{ GeV}^{-1} , \quad (1.58)$$

a stvarna jedinica je \hbar/GeV ,

$$t(\text{s}) = 6.58217 \times 10^{-22} t(\text{MeV}^{-1}) . \quad (1.59)$$

Zadatak 1.5 Vrijeme života parapozitronija (nestabilnog vezanog stanja elektrona i pozitrona) dano je u prirodnim jedinicama izrazom

$$\tau = \frac{2}{m_e \alpha^5} . \quad (1.60)$$

Obnoviti na temelju dimenzija faktore \hbar i c i izračunati τ u sekundama.

Rješenje : Zahtjevom da

$$\tau = \frac{2}{m_e \alpha^5} \hbar^a c^b \quad (1.61)$$

ima dimenziju vremena dobivamo $a = 1$ i $b = -2$, odnosno $\tau = 1.245 \cdot 10^{-10} \text{ s}$.

Zadatak 1.6 Naći energiju u sustavu centra mase (težišta) iz dane energije snopa za

◇ ubrzivač s fiksiranom metom na Fermilabu i SPS na CERNu,

- ◇ fiksiranu metu i za sudarivač na tevatronu,
- ◇ za **LEP** i za **LHC** na **CERN**-u.

Zadatak 1.7 Naći De Broglijevu valnu dužinu λ_{DeB} koja odgovara impulsima pridruženim CM vrijednostima energija iz prethodnog zadatka (uzimajući čestice bezmasenima). To će nam dati osjećaj za udaljenosti koje možemo sondirati na navednim ubrzivačima.