

BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenio
XVI paskaita

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Energijos šaltinių problema

Šiuo metu svarbiausi energijos šaltiniai yra nafta, anglis, ir dujos. Deja, šių labai vertingų cheminių žaliavų kurui suvartojima vis daugiau. Buvo prognozuojama, kad šimtmečio viduryje šios iškasenos išseks ir neteksime ne tik svarbiausio energijos šaltinio, bet ir žaliavų chemijos pramonei. Reikia kurti naujas technologijas, kur vartojama mažiau energijos, taip pat ieškoti netradicinių energijos šaltinių. Alternatyvių kelių yra ne taip jau mažai, pavyzdžiui, panaudoti vandenynų potvynių ir atoslūgių energiją, Žemės gelmių šilumą, Saulės energiją, branduolinę energiją ir kt. Techniškai realiausia yra panaudoti branduolinę energiją.

Energijos šaltinių problema

Tačiau sunkiųjų branduolių dalijimosi metu išsiskirianti energija iš esmės problemos neišspręs. Mat šiuo metu žinomi branduolinių medžiagų ištekliai gali aprūpinti keliasdešimt kartų didesniu energijos kiekiu negu tradicinio kuro ištekliai, bet ne daugiau. Be to, Černobylio atominės elektrinės katastrofa pakirto žmonijos pasitikėjimą tokių elektrinių saugumu. Šiuo požiūriu daug pranašesi energijos šaltiniai, pagrįsti lengvųjų branduolių sintezės metu išsiskiriančia branduoline energija. Praktiškai vandenilio gamtoje yra labai daug. Tačiau nėra paprasta sukurti energetiškai naudingą valdomą sintezės reakciją.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- **Valdomos termobranduolinės reakcijos**
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Valdomos termobranduolinės reakcijos

Urano branduolio rimties masė didesnė už jo skeveldrų rimties masių sumą. Lengvųjų branduolių – atvirkščiai. Antai helio branduolio rimties masė kur kas didesnė už dviejų sunkiojo vandenilio branduolių, į kuriuos galima padalyti helio branduolį, rimties masių sumą.

Vadinasi, susijungus lengviesiems branduoliams, rimties masė sumažėja ir turi išsiskirti didelis energijos kiekis. Panašios lengvųjų branduolių sintezės reakcijos gali vykti tikrai labai aukštose temperatūrose. Todėl jos vadinamos *termobranduolinėmis reakcijomis*.

Termobranduolinės reakcijos – tai lengvųjų branduolių sintezės aukštoje temperatūroje reakcijos.

Valdomos termobranduolinės reakcijos

Kad susijungtų, branduoliai turi suartėti maždaug 10^{-12} cm atstumu, t.y. pakliūti į branduolinių jėgų veikimo sferą. Šiam suartėjimui trukdo branduolių Kulono stūma, kurią gali įveikti tik labai greiti branduoliai.

Termobranduolinėse reakcijose išsiskiria didesnė specifinė energija negu grandininėse branduolių dalijimosi reakcijose. Antai, susijungus sunkiajam vandeniliui – *deuteriui* – su supersunkiuoju vandenilio izotopu – *tričiu*, išsiskiria apie 3,5 MeV kiekvienam nukleonui, o skilus uranui – apytiksliai 1 MeV.

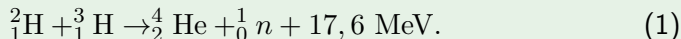
Termobranduolinės reakcijos Visatos evoliucijoje vaidina pagrindinį vaidmenį. Saulės ir žvaigždžių spinduliuojama energija yra termobranduolinės kilmės.

Valdomos termobranduolinės reakcijos

Šiuolaikiniu požiūriu pradėjusių formuotis žvaigždę sudaro daugiausia vandenilis. Jos temperatūra būna tokia aukšta, kad susijungia protonai ir susidaro helis. Po to, susijungus helio branduoliams, atsiranda ir sunkesnių elementų. Termobranduolinės reakcijos vaidina lemiamą vaidmenį Visatoje vykstančioje medžiagos cheminės sudėties evoliucijoje. Visose šiose reakcijose išsiskiria energija, kurią žvaigždės spinduliuoja milijardus metų.

Valdomos termobranduolinės reakcijos – naujas, praktiškai neišsenkamas energijos šaltinis Žemėje. Perspektyviausia iš jų yra deuterio ir tričio sintezės reakcija:

Termobranduolinė reakcija



Valdomos termobranduolinės reakcijos

Šioje reakcijoje išsiskiria 17,6 MeV energija. Tačiau tričio gamtoje nėra, todėl jis pagaminamas pačiame branduoliniame reaktoriuje iš ličio.

Kaip parodė skaičiavimai, ekonomiškai naudinga reakcija gali vykti tik įkaitinus medžiagas iki kelių šimtų milijonų laipsnių temperatūros ir esant dideliame medžiagos tankiui ($10^{14} - 10^{15}$ dalelių viename kubiniame centimetre). Tokią temperatūrą galima pasiekti sukuriant plazmoje stiprius elektros išlydžius. Pagrindinė šio metodo problema – kaip išlaikyti 0,1–1 s tokios aukštos temperatūros plazmą įrenginyje.

Čia jokios medžiagos sienelės netinka, nes tokioje aukštoje temperatūroje iš karto išgaruotų. Aukštos temperatūros riboto tūrio plazmą išlaikyti gali tik labai stiprūs magnetiniai laukai. Tačiau iki šiol to uždavinio visiškai įgyvendinti nepavyko dėl plazmos nepastovumo. Mat elektringosios dalelės difunduoja pro "magnetines sienes" .

Valdomos termobranduolinės reakcijos

Kad įvyktų branduolių sintezė, jie turi suartėti iki atstumo $r_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ m, nuo kurio jau ima veikti stiprioji sąveika. Tokiame atstume krūvio Z_1e ir Z_2e branduolių elektrosstatinės stūmos potencinė energija išreiškiama šitaip:

Elektrosstatinė sąveikos energija

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_0}. \quad (2)$$

Netgi vandenilio branduoliams ($Z_1 = Z_2 = 1$) dydis $V \approx 0,7$ MeV. Taigi branduolių elektrosstatinė stūma sudaro potencialinį barjerą. Apie 0,7 MeV didumo kinetinę energiją branduoliai turėtų 10^9 K temperatūroje. Tačiau praktiškai nustatyta, kad lengvųjų branduolių sintezė vyksta jau 10^7 K temperatūroje. Tai yra dėl dviejų priežasčių: (kita skaidrė)

Valdomos termobranduolinės reakcijos

- dalies atomų branduolių energija gerokai didesnė už jos vidutinę vertę;
- atomų branduolių sintezei, kaip ir α skilimui, būdingas tunelinis efektas.

Žemiausioje temperatūroje jungiasi deuterio branduoliai su tričiu. Šie vandenilio izotopai kaip tik ir sudaro termobranduolinės bombos užtaisą. Čia sintezės reakcijai reikalinga temperatūra ($\sim 10^7$ K) gaunama pirminio atominio užtaiso (pvz., ${}_{92}^{235}\text{U}$) sprogimu. Sintezės reakcija vyksta pagal schemą (1). Užtaiso rimties masė yra didesnė negu reakcijos produktų, dėl to (1) procese išsiskiria apie 17,6 MeV energijos kiekis, arba vidutiniškai 3,5 MeV/nukleonui. Tai vienam nukleonui 3,5 karto daugiau negu branduolių dalijimosi reakcijose.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

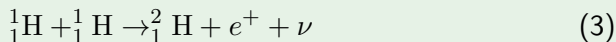
- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Žvaigždžių energija

Saulės bei žvaigždžių gelmėse medžiagos temperatūra siekia $10^7 - 10^8$ K. Esant normaliam medžiagos tankiui, šitokioje temperatūroje turėtų vykti gana intensyvi lengvųjų branduolių jungimosi reakcija. Manoma, kad šie gamtiniai procesai yra svarbiausias žvaigždžių energijos šaltinis.

Nelabai ryškiose žvaigždėse, pavyzdžiui Saulėje, termobranduolinės reakcijos gali vykti pagal vadinamąjį *protonų–protonų ciklą*. Jo pradžioje susijungia du protonai ${}^1_1\text{H}$ ir sudaro deutroną ${}^2_1\text{H}$; kartu emituojamas pozitronas e^+ ir elektroninis neutrinas ν :

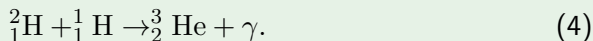
Termobranduolinė reakcija



Žvaigždžių energija

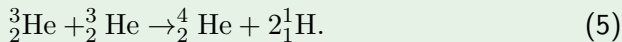
Po to deuteronas reaguoja su nauju protonu ir sudaro helio ${}^3_2\text{He}$ branduolį, o energijos perteklių išspinduliuoja γ kvantais:

Termobranduolinė reakcija



Tolimesnė šio ciklo tąsa galėtų būti šitokia:

Termobranduolinė reakcija

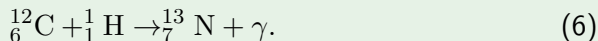


Taigi ciklo rezultatas šitoks: 4 vandenilio branduoliai susijungia į helio branduolį ir išsiskiria tam tikras energijos kiekis.

Žvaigždžių energija

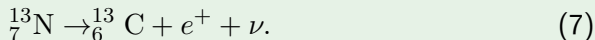
Ryškesnių už Saulę žvaigždžių temperatūra yra dar aukštesnė. Čia termobranduolinėms reakcijoms labiau tikimas 1938–1939 m. H. Betės pasiūlytas *anglies ir azoto ciklas*, arba *Betės anglies ciklas*. Jis susideda iš branduolinių reakcijų sekos: ji atvaizduojama šitokiomis schemomis:

Anglies ir azoto ciklas (1)



Gautasis azoto izotopas ${}^13_7\text{N}$ pasižymi pozitroniniu radioaktyvumu, todėl jis skyla:

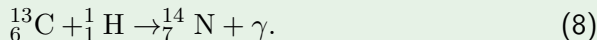
Anglies ir azoto ciklas (2)



Žvaigždžių energija

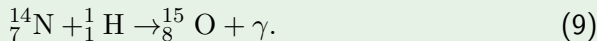
Susidaręs anglies izotopas ${}^13_6\text{C}$, absorbavęs protoną, virsta azoto izotopu ${}^{14}_7\text{N}$:

Anglies ir azoto ciklas (3)



Pastarasis, dar sugėręs protoną, virsta radioaktyviuoju deguonies izotopu ${}^{15}_8\text{O}$:

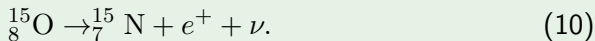
Anglies ir azoto ciklas (4)



Žvaigždžių energija

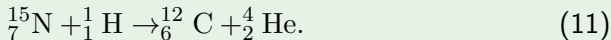
Šis, išspinduliavęs pozitroną, virsta azoto izotopu ${}_{7}^{15}\text{N}$:

Anglies ir azoto ciklas (5)



Šį azoto izotopą veikiant didelės energijos protonu, gaunama šitokia branduolinė reakcija:

Anglies ir azoto ciklas (6)



Taigi užbaigiamas protonų jungimosi į helį ciklas: gaunamas pirminis anglies izotopas ${}_{6}^{12}\text{C}$, helio branduolys (α dalelė) ir išsiskiria apie 26,7 MeV energijos kiekis. Anglies izotopo ${}_{6}^{12}\text{C}$ branduolių skaičius nepakinta, t.y. jie atlieka tik termobranduolinės reakcijos katalizatoriaus vaidmenį

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

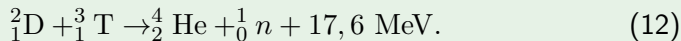
2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Termobranduolinių reakcijų valdymo problema

Perspektyviausia (pagal išskiriamą energijos kiekį) yra sunkiųjų vandenilio izotopų deuterio ir tričio virstimo heliu reakcija:

Termobranduolinė reakcija

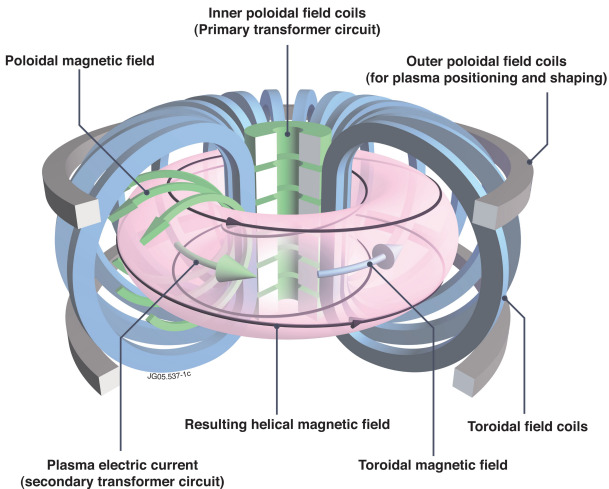


Jos metu neatsiranda radioaktyviųjų izotopų, tik vienas neutronas, tad ši reakcija kelia daug mažesnį radioaktyvaus užteršimo pavojų negu dalijimosi reakcija. Deja, ji efektyviai vyksta tik pakaitinus deutertio ir tričio mišinį ligi maždaug 100 milijonų laipsnių. Tokia reakcija vadinama *termobranduoline sinteze*.

Termobranduolinių reakcijų valdymo problema

Norint gauti valdomą termobranduolinės sintezės reakciją, visų pirma reikėjo išspręsti problemą, kur ir kaip išlaikyti medžiagą, įkaitintą ligi milijonų laipsnių. Juk tokioje temperatūroje ji virsta plazma: susiduriant atomams elektronai yra atplėšiami nuo branduolių ir susidaro elektringųjų dalelių – jonų ir elektronų – dujos. Jos labai lakios, nes elektringosios dalelės smarkiai veikia vienos kitas, bet, antra vertus, būtent tokioms dalelėms galima sukonstruoti ypatingą indą – iš magnetinio lauko linijų. Juk judanti magnetiniame lauke elektringoji dalelė (kaip elektros srovė) yra veikiamą jėgos, statmenos judėjimo kryptčiai bei magnetinio lauko kryptčiai, tad dalelė ima sukstis ratu aplink magnetinio lauko linijas.

Termobranduolinių reakcijų valdymo problema



Tokamakas.

Termobranduolinių reakcijų valdymo problema

Išmoningus magnetinius spąstus sugalvojo A. Sacharovas, rusų vandenilinės bombos kūrėjas. Deuterio ir tričio plazma yra gaunama tuščiavidurėje riostainio pavidalo kameroje. Aplink kamerą yra stiprūs magnetai, kurie verčia deuterio ir tričio branduolius nenutrūkstamai sukstis ratu. Kiti magnetai suspaudžia plazmą į siaurą žiedą riostainio centre bei indukuoja ją kaitinančias sroves. Toks įrenginys buvo pavadintas *tokamaku* (TOroidinė KAMera su MAgnetiniu lauku).

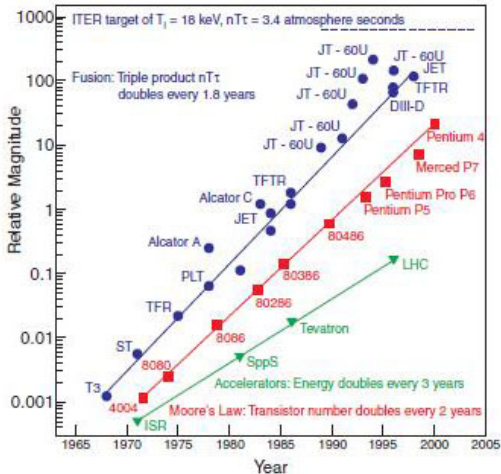
Termobranduolinių reakcijų valdymo problema

Praeito amžiaus šeštajame dešimtmetyje atrodė, kad naudojantis tokamakais bei kitomis magnetinėmis gaudyklėmis pavyks greitai gauti valdomą termobranduolinės sintezės reakciją ir ilgiems amžiams išspręsti žmonijos energijos išteklių problemą. Deja, paaiškėjo, jog šis energijos šaltinis besąs už devynių užraktų. Plazma yra nepaprastai judri ir sunkiai valdoma, o kaitinama ji tuoj pat išspinduliuoja suteiktą energiją į visas puses.

Mokslininkams teko atsisakyti staigios atakos ir pereiti į ilgą apsuptį. Savaiminės sintezės reakcijai pasiekti reikalinga ne tik labai aukšta temperatūra T , bet ir tam tikras plazmos tankis n bei jos gyvavimo trukmė τ (šių dydžių sandauga turi viršyti tam tikrą kritinę reikšmę).

Vykdomas tarptautinis projektas ITER. Tarptautinė sutartis buvo pasirašyta 2006 metais ir reaktoriaus veikimo pradžia buvo numatyta 2016 metais. Dabar jau nukelta į vėlesnius terminus, ne anksčiau 2027 metų.

Termobranduolinių reakcijų valdymo problema



Trigubos sandaugos $nT\tau$ augimas
ir jo palyginimas su kompiuterių bei greitintuvų tobulėjimu.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- **Atominis ginklas**

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Atominiis ginklas

Nors jokia iš valstybių, turinčių atominį ginklą, neinformavo apie savo atominės bombos konstrukciją, tačiau bendrų branduolio fizikos dėsnių ir ypač dalijimosi reakcijos (n, f) pažinimas leidžia sukurti jos hipotetinį modelį, kuris savo principu negali daug skirtis nuo tikrosios bombos.

Jau buvo užsiminta apie branduolinės medžiagos krizinį dydį. Norint įvykdyti branduolinį sproginimą reikia atitinkamu momentu 2 tokios medžiagos gabalus, kurių kiekvienas yra mažesnis už krizinį dydį ir kurie iš pradžių laikomi atokiau vienas nuo kito, staiga sujungti, kad bendras jų dydis pasidarytų didesnis už krizinį. Sujungimas į vieną gabalą turi būti labai staigus, nes kitaip sproginimas gali įvykti tik suartėjus, bet tuomet grandininė reakcija neapims visos masės, sproginimas bus silpnesnis, kadangi daug medžiagos bus išmėtyta į šonus, dar jai neatidavus visos galimos energijos.

Atomis ginklas

Sprogimui sustiprinti visas būsimos reakcijos tūris turi būti apsuptas atitinkamu neutronų atšvaitu, kuris didelę jų dalį grąžintų į aktyviają zoną. Kad prasidėjusi grandininė reakcija neišmėtytų besidalijančios medžiagos, o tai, suprantama, taip pat mažintų sprogimo energiją, visas būsimos reakcijos tūris turėtų būti apsuptas labai stipriu plieniniu apvalkalu.

Pirmą bandomąjį atominės bombos sprogimą įvykdė JAV 1945 m. liepos 16 d. Los Alamos vietovėje Niu Meksiko valstijoje. Mokslininkai ir kariškiai stebėjo sprogimą iš 30 km atstumo. Sušvitus supersaulei, R. Openheimeris (bombos sukūrimo projekto vadovas) prisiminė eilutes iš Bhagavatgitos, senovės indų epo, apie tūkstantį sauliu, vienu metu sužibusių danguje. Ugnies kamuoliui išaugus ligi 1,5 km ir dar didėjant, kai kurie stebėtojai išsigando, kad mokslininkai bus apsirikę ir ugnis apims visą dangų ir žemę. Tačiau dar po kelių sekundžių akinantis kamuolys virto 12 km aukščio grybo pavidalo debesiu, kuris vėliau tapo niūriu atominio sprogimo simboliu.

Atomis ginklas

Po to, kadangi dar tęsėsi karas su Japonija, 2 atominės bombos buvo numestos į Japonijos civilius objektus – Hirosimos miestą (1945 08 06), ir po 3 dienų – į Nagasakio miestą. Pirmoji bomba buvo ^{235}U , antroji – plutonio ^{239}Pu .

Sprogstančios bombos centre temperatūra trumpai akimirkai siekė 10000000°C . Susidarė ugninis besiplečiantis rutulys, kuriame, pasiekus 100 m skersmenį, temperatūra pakilo iki 7000°C . Net 3,5 km nuotoliu nuo sprogo centro visi degūs daiktai užsiliepsnojo.

Atominis ginklas

Termobranduolinė bomba, termobranduolinis užtaisas, masinio naikinimo ginklas, kurio veikimas pagrįstas brandulių sintezės termobranduoline reakcija. Jai sukelti reikalinga dešimčių milijonų laipsnių temperatūra, kuri sukuriama pirminio atominio užtaiso sprogitu. Sintezės reakcijai vartojami vandenilio izotopai (deuteris ir tritis), litis ir kiti elementai. Termobranduolinio sprogitimo galią lengviau reguliuoti negu atominės bombos, nes nereikia kritinės užtaiso masės. Ta galia prilygsta tūkstančių ir milijonų tonų trinitrotoluolio sprogitimo galiai. Ji dar padidinama, panaudojus urano ^{238}U kevalinį užtaisą.

Pirmąją termobranduolinę bombą 1953 m. išbandė Sovietų Sąjunga; vėliau tai padarė JAV (1954) ir kt. šalys.

Atominis ginklas, kaip žiauriausioji žmonių naikinimo priemonė, susilaukė visos žmonijos pasmerkimo ir turi būti dedamos visos pastangos, kad jo naudojimas būtų uždraustas ir jis būtų sunaikintas.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Elementariosios dalelės

Kai 1932 m. buvo atrastas neutronas ir paaiškėjo, kad atomai yra sudaryti iš protonų, neutronų ir elektronų, atrodė, kad tos dalelės ir yra pagrindinės materijos dalys; jos buvo pavadintos elementariosiomis dalelėmis. Iš tikrųjų gamta pasirodė esanti žymiai sudėtingesė.

Dar 1929 m. buvo pastebėta, kad radioaktyviajam radonui sleidžiant beta spindulius (elektronus), jie iš vienodų branduolių išlekia su įvairiomis energijomis. Tai prieštaravo energijos tvermės dėsniiui – branduolinės reakcijos metu turėtų išsiskirti visada ta pati energija. Kai kurie fizikai, tarp jų net N. Boras, buvo linkę patikėti, kad keistame mikropasaulyje gali negalėti net energijos tvermės dėsnis. V. Paulis 1931 m. rado kitą išeitį: jis iškėlė hipotezę, kad iš radono branduolio kartu su elektronu išlekia dar viena elementarioji dalelė, išsinešanti dalį energijos. Norint paaiškinti, kodėl ji nebuvo pastebėta, teko padaryti prielaidą, kad ši dalelė neturi elektros krūvio, o jo masė labai maža. Ta paslaptingoji dalelė buvo pavadinta *neutrinu*; ją pavyko aptikti tik po 25 metų.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės

1931 m. P. Dirakas (*Dirac*), pamėginęs suderinti kvantinę mechaniką su reliatyvumo teorija, priėjo išvadą, kad turi egzistuoti dar viena elementarioji dalelė – *pozitronas*. Jo masė turėjo būti lygi elektrono masei, o elektros krūvis priešingo ženklo – teigiamas. Po metų pozitronas buvo atrastas eksperimentiškai.

Pozitronas buvo aptiktas naudojantis Vilsono kamera, esančia magnetiniame lauke, – pagal pozitrono trajektoriją buvo galima nustatyti ne tik jo krūvį, bet ir masę.

Paaiškėjo, kad pozitronas yra elektrono *antidalelė*. Tai reiškia, kad pozitronui susidūrus su elektronu, jie abu anihiliuoja (išnyksta), o jų vietoje atsiranda didelės energijos fotonas (dažniausiai – keli fotonai, nes virsmui turi galioti tvermės dėsniai): (žr. kitą skaidrę)

Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės

Elektrono ir pozitrono anihiliacija

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow h\nu. \quad (13)$$

Tai pati galingiausia reakcija, nes jos metu išsiskiria visa energija, kuri pagal Einšteino formulę $E = mc^2$ slypi medžiagoje (šiuo atveju – elektrone ir pozitrone iki susidūrimo). Galima ir priešinga reakcija – fotono virtimas elektrono ir pozitrono pora: aišku tai įmanoma tik tada, kai fotono energija viršija 1,02 MeV – elektrono ir pozitrono rimties energijų sumą.

Vėliau paaiškėjo, kad protonas, neutronas bei kitos elementariosios dalelės irgi turi antidaleles. Dalelė ir antidalelė visada yra vienodos masės, bet skiriasi elektros krūvio (bei kitų specialiųjų krūvių, įvedamų elementariųjų dalelių fizikoje) ženklais.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

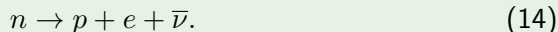
2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- **Elementariųjų dalelių virsmai**
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Elementariųjų dalelių virsmai

Galimybė fotonui virsti dalelės ir antidalelės pora nereiškia, kad tos dalelės buvo jo viduje. Tas pat pasakytina apie kitas elementariųjų dalelių reakcijas. Pavyzdžiui, neutronas yra stabilus tik branduolyje, o laisvas jis savaime virsta (vidutinė gyvavimo trukmė – 15 minučių) protonu, elektronu ir antineutrinu $\bar{\nu}$:

Neutrono virtimas protonu



Tai nereiškia, kad neutronas yra sudėtinė dalelė, o protonas ir elektronas – elementariosios dalelės; visos jos yra elementarios. Tai būdingas elementariųjų dalelių pasaulio bruožas.

Elementariosios dalelės

Skildamos ar susidurdamos vienos su kitomis elementariosios dalelės ne subyra į sudėtines dalis, o virsta kitomis elementariosiomis dalelėmis.

Elementariųjų dalelių virsmai

Taigi mikropasaulyje egzistuoja dalelių "demokratija". Dviejų dalelių susidūrimo rezultatas labai priklauso nuo jų greičių – kuo didesnė susidūrimo energija, tuo daugiau ir tuo masyvesnių dalelių gali atsirasti. Čia įprastas dalykas "dviem pelėms pagimdyti dramblių", nes elementariųjų dalelių reakcijose masė ir energija nuolat pereina viena į kitą.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- **Elementariųjų dalelių įvairovė**
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Elementariųjų dalelių įvairovė

Pagrindinė informacija apie elementariąsias daleles gaunama nagrinėjant jų tarpusavio smūgius. Kuo stipriau susiduria dalelės, tuo daugiau ir masyvesnių naujų dalelių atsiranda. Be to, kiekvienai dalelei būdingos ir bangos savybės; didėjant dalelės greičiui ir kartu masei, jos bangos ilgis mažėja. Kai jis pasidaro mažesnis už kitos dalelės matmenis, smūgio rezultatai ima priklausyti nuo dalelės-taikinio struktūros, ir panaudojami jai tirti.

Labai greitos elementriosios dalelės susidaro kosminiams spinduliams veikiant Žemės atmosferos atomus. Tokiu būdu 1937 m. buvo atrasta dalelė, panaši į elektroną, bet turinti masę, 207 kartų didesnę už elektrono masę, ir gyvuojanti maždaug 10^{-6} s – ji iš pradžių buvo pavadinta miu mezonu (graikiškai mezos – vidutinis; čia turėta galvoje, kad dalelės masė yra tarp elektrono ir protono masių), o vėliau buvo perkrikštyta miujonu. 1947 m. buvo atrasti net keli (skirtingo elektros krūvio) pi mezonai, truputį masyvesni ir dar trumpiau gyvuojantys už miujoną.

Elementariųjų dalelių įvairovė

Fizikams nusibodo kantriai laukti kosminių spindulių malonės, kol jie reikiamoje vietoje – elementariųjų dalelių registravimo prietaise – sukurs naują dalelę, tad imta konstruoti elementariųjų dalelių greitintuvus, suteikiančius dalelėms vis didesnę energiją. Ir atradimai pasipylė lyg iš gausybės rago – per porą dešimtmečių buvo atrasta daugiau kaip šimtas naujų elementariųjų dalelių.

Aišku, mokslininkai nesiryžo tuoj pat atsakyti į klausimą, kam gamtai reikia šitiek elementariųjų dalelių, o pradėjo sistemingai tyrinėti jų savybes, klasifikuoti daleles. Jos buvo suskirstytos į kelias skirtingas šeimas.

Elementariųjų dalelių įvairovė

Elektronas, neutrinai, miujonas bei miu neutrinai (atsiranda reakcijoje kartu su miujonu), taip pat jų antidalelės, buvo išskirti į *leptonų* šeimą. Jų pavadinimas, kilęs iš graikiško žodžio "lengvas", vėliau, atradus antrąjį elektrono giminių – tau leptoną, sunkesnę už protoną, išliko tik istorinis. Esminė leptonų savybė – jų *neveikia stiprioji sąveika*. Reakcijose dalyvaujančių leptonų ir jų antidalelių skaičiaus skirtumas yra pastovus dydis; tuo remiantis buvo įvestas *leptoninis krūvis*, kurio vertė $+1$ šios šeimos dalelei ir -1 – antidalelei.

Elementariųjų dalelių įvairovė

Pati gausiausia ir įvairiausia yra *hadronų šeima* – jų pavadinimas reiškia stipriai sąveikaujančias daleles, t.y. dalyvaujančias stipriosiose sąveikose. Beveik visi hadronai, išskyrus protoną ir neutroną, yra labai trumpai gyvuojančios dalelės, o kai kurių amžius siekia vos 10^{-23} s. Hadronai yra gana masyvios dalelės – daugelio iš jų masės 2-3 tūkstančius kartų viršija elektrono masę.

Šioje šeimoje išskiriamos kelios dalelių grupės. Antai yra *keistųjų dalelių grupė* – jos visada gimsta poromis, tad joms buvo priskirta nauja kvantinė savybė – *keistumas*, ir įvestas keistumo tvermės dėsnis. Septintajame dešimtmetyje buvo atrasta dar viena didelė hadronų grupė – *žavingosios dalelės* (aišku, žavesys yra speciali dalelių charakteristika, neutrinti nieko bendra su įprastine šio žodžio reikšme).

Elementariųjų dalelių įvairovė

Fotonas ilgą laiką pats vienas sudarė atskirą šeimą (jis neturi net antidalelės). Kaip žinome, fotonas yra elektromagnetinių bangų kvantas. Kvantinės teorijos požiūriu elektringosios dalelės sąveikauja keisdamosi fotonais. Kaip tokiu būdu gali atsirasti trauka ar stūma, labai apytiksliai iliustruoja toks mums įprastesnis pavyzdys. Tarkime, du vaikai su riedučiais mėtosi pagalvėmis, Pagavęs jam mestą pagalvę, berniukas ima riedėti atgal, tarsi jo draugas veiktų jį stūmos jėga. O stengdamiesi atimti vienas iš kito pagalvę, berniukai veikia vienas kitą traukos jėga.

Elementariųjų dalelių įvairovė

Kitos fundamentinės jėgos irgi turėtų būti perduodamos elementariosiomis dalelėmis. Visuotinę traukos jėgą perduodanti dalelė netgi turi pavadinimą – *gravitonas*. Silpnąją sąveiką perduoda net trys dalelės, pavadintos W^+ , W^- ir Z^0 bozonais; jie buvo atrasti tik devintajame praeito amžiaus dešimtmetyje, nes yra labai masyvūs – beveik šimtą kartų masyvesni už vandenilio branduolį. Gliuonai perduoda stipriąją sąveiką.

Visos tos dalelės, perduodančios sąveikas, tarp jų ir fotonas, priskiriamos trečiajai – *bozonų* šeimai.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- **Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos**
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos

Vis daugėjant elementariųjų dalelių, tapo aišku, jog jos visos negali būti pirminės dalelės. Leptonai visuose bandymuose elgėsi kaip taškinės dalelės, o bandymai su hadronais parodė, kad jie turi vidinę struktūrą.

1963 m. teoretikai M. Gel-Manas (Gell-Mann) ir D. Cveigas (Zweig) nepriklausomai vienas nuo kito iškėlė hipotezę, kad visi hadronai yra sudaryti iš trijų fundamentaliųjų dalelių, kurios buvo pavadintos *kvarkais*. Kvarkams teko priskirti trupmeninį elektros krūvį ($2/3$ ir $-1/3$ elektrono krūvio). Jie buvo pavadinti viršutiniu, žemutiniu ir keistuoju kvarkais ir žymimi pirmosiomis atitinkamų anglišių žodžių raidėmis *u*, *d* ir *s*.

Protonas ir neutronas sudaryti iš trijų kvarkų, kai kurie lengvesnieji hadronai – iš dviejų kvarkų, taigi iš kvarkų savybių pavyko išvesti visų žinomų hadronų savybes.

Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos

Deja, daug įvairių bandymų atrasti laisvus kvarkus buvo nesėkmingi. Ir vis dėlto kvarkai kartu su leptonais buvo įteisinti fizikoje kaip pirminės fundamentaliosios dalelės (atsisakyti kvarkų jau buvo neįmanoma dėl daugelio eksperimentiškai patvirtintų išvadų, išplaukiančių iš jų hipotezės). Gamtai būdinga simetrija, todėl buvo padaryta prielaida, kad leptonų ir kvarkų skaičius turi būti vienodas. Tuo metu buvo žinomi keturi leptonai, tad buvo įvestas ir ketvirtasis kvarkas – žavingasis (c). Iš tikrųjų netrukus buvo aptikta visa žavingųjų dalelių grupė, į kurią įėjo ir žavingasis kvarkas.

Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos

Sakoma, kad elektronas, elektrinis neutrinas ir u , d kvarkai sudaro pirmąją fundamentaliųjų dalelių *kartą*, o miujonas, miu neutrinas, c ir s kvarkai priskiriami antrajai kartai.

Viena karta nuo kitos skiriasi mase – ji dažniausiai išauga kelis ar net keliasdešimt kartų, kai daugelis kitų savybių išlieka tos pačios.

Vėliau atradus dar du naujus leptonus – tau leptoną ir tau neutriną – paaiškėjo, kad gamtai nepakako dviejų fundamentaliųjų dalelių kartų, – prireikė ir trečiosios. Tad fizikams teko įvesti naujus kvarkus – žemiausiąjį ir aukščiausiąjį, žymimus b ir t . Po atkaklių bandymų, naudojantis galingiausiais greitintuvais, pavyko įrodyti ir jų egzistavimą; tiesa, vėl – elementariųjų dalelių viduje.

Turinys

1 Termobranduolinės reakcijos

- Energijos šaltinių problema
- Valdomos termobranduolinės reakcijos
- Žvaigždžių energija
- Termobranduolinių reakcijų valdymo problema
- Atominis ginklas

2 Elementariosios dalelės

- Pozitrono atradimas. Dalelės ir antidalelės
- Elementariųjų dalelių virsmai
- Elementariųjų dalelių įvairovė
- Fundamentaliosios dalelės ir jų kartos
- Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Anot šiuolaikinės fizikos, gamtą valdo keturios fundamentinės jėgos, arba sąveikos. Visos kitos jėgos yra tų fundamentinių jėgų pasireiškimas. Apibendrinkime žinias apie tas pagrindines jėgas.

Gravitacijos, arba visuotinės traukos, jėga veikia tarp bet kokių dviejų kūnų, turinčių masę. Ji yra labai silpna palyginti su kitomis jėgomis tarp mikrodalelių (elementarių dalelių, atomų, molekulių) ir net tarp mus supančių kūnų, tačiau tampa labai stipria, pagrindine jėga tarp kosminių kūnų, turinčių milžiniškas mases. Ji lemia planetų, žvaigždžių ir galaktikų, netgi Visatos evoliuciją.

Elektromagnetinė jėga veikia tarp bet kokių kūnų, turinčių elektros krūvį, taip pat elektros srovių ir magnetų. Ši jėga vyrauja mus supančiame pasaulyje, ji nulemia visa, ką mes girdime, jaučiame, ragaujame, užuodžiame ir matome aplinkui.

Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Stiprioji jėga, arba sąveika, veikia labai mažais atstumais (apie 10^{-15} m) tarp kvarkų bei iš jų sudarytų protonų, neutronų ir kitų hadronų. Ji suriša nukleonus į atomų branduolius ir užtikrina jų stabilumą, kol, didėjant protonų skaičiui branduolyje, šios jėgos neįveikia silpnesnė, bet toliausiekė elektromagnetinė jėga. Būtent stiprioji sąveika suteikia galimybę išsiskirti didelėms energijoms branduolinių reakcijų metu.

Silpnoji jėga, arba sąveika, veikia daugelį elementariųjų dalelių – hadronus ir leptonus. Ji pasireiškia dar mažesniuose atstumuose negu stiprioji sąveika, sukelia kai kuriuose atomų ir elementariųjų dalelių virsmus. Jei nebūtų šios sąveikos, tai neišžiiebtų žvaigždės, nes nevyktų vandenilio virtimo heliu reakcija, o Visatoje būtų paplitę miujonai, keistosios ir žavingosios dalelės, kurios suyra dėl silpnosios sąveikos.

Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Kiekviena iš šių keturių fundamentinių jėgų turi savo svarbią veikimo sritį, jos papildo viena kitą ir visos kartu nulemia pasaulio sandarą ir stebimą reiškinių įvairovę.

Ar gali būti dar nežinomų fundamentinių jėgų? Jų egzistavimas mokslo ištirtoje reiškinių srityje yra praktiškai neįtikėtinas, nes fizikai, atliekantys matavimus ir skaičiavimus dideliu tikslumu, būtų pastebėję tokių jėgų veikimą ar jų sukeltus reiškinius. Antra vertus, nėra žinoma jokio draudimo egzistuoti kitoms fundamentinėms jėgoms, tad skverbiantis į neištirtas sritis, iš principo gali būti aptiktos dar nežinomos jėgos.

Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Plėtojant fiziką buvo ne tik atrandamos naujos jėgos, bet ir suvienijamos žinomos jėgos, paaiškėdavo ryšiai tarp jų. I. Niutonas sujungė Žemės trauką ir dangaus jėgas į visuotinę gravitaciją. Dž. Maksvelas įrodė, kad elektros, magnetizmo ir šviesos reiškiniai yra glaudžiai susiję tarpusavyje ir sąlygoti vieno tipo elektromagnetinės jėgos. A. Einšteinas ilgai ir atkakliai bandė įgyvendinti savo idėją – įrodyti, kad visos fundamentinės jėgos turi vieningą prigimtį, tačiau tuo metu buvo atrastos naujos jėgos tarp elementariųjų dalelių, ir šios itin sudėtingos problemos sprendimą teko atidėti.

Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Tik XX a. septintajame dešimtmetyje S. Veinbergui (Weinberg) ir A. Salamui (Salam) pavyko įrodyti, kad elektromagnetinė ir silpnoji jėgos yra vienos ir tos pačios jėgos, pavadintos elektrosilpnąja jėga, skirtingi pasireiškimai. Vieninga jėga būtų stebima esant nepaprastai didelėms sąveikaujančių dalelių energijoms, o mums įprastame pasaulyje elektrosilpnoji jėga savaiminiu būdu išsiskiria dvi skirtingas jėgas. Ši gana sudėtinga teorija susilaukė pripažinimo (beje, ir Nobelio premija jos kūrėjams), kai teorijos išvados buvo sėkmingai patvirtintos bandymais.

Keturios fundamentinės jėgos ir jų suvienijimas

Dabar mėginama atlikti Didįjį suvienijimą – sujungti elektrosilpnąją ir stipriąją jėgas. Jos turėtų supanašėti esant dar didesnėms dalelių energijoms, kai dalelės suartėja ligi 10^{-31} m. Iš tos teorijos išplauktų išvada, kad kvarkas gali virsti leptonu ir atvirkščiai, pasikeisdami elementariąja dalele, kurios masė lygi net 10^{15} protono masių. Deja, aptikti tokią dalelę kol kas nėra jokių vilčių. Lengviau patikrinama kita tos teorijos išvada, kad protonas turėtų būti nestabili, nors ir labai ilgai gyvuojanti dalelė. Kol kas visi bandymai pastebėti protono skilimą nebuvo sėkmingi.

O suvienyti visas keturias fundamentines jėgas yra tolimos ateities tikslas. Jį pasiekus, matyt, paaiškėtų, kodėl pasaulis yra toks, koks jis yra.