



Неутринни осцилации

Михаил Чижов

За да разберем това откритие, е необходимо да започнем отначало... предсказването на неутрино то преди 85 години, неговото детектиране и неговото изучаване.

Неутрино то, като нова елементарна частица, е предсказано от австрийския физик Волфганг Паули (Wolfgang Ernst Pauli) в неговото прочуто писмо от 4 декември 1930 г., за да спаси Закона за запазване на енергията в радиоактивния бета разпад. Бета разпадът е един от основните, т.нар. алфа, бета и гама радиоактивни лъчения, които отговарят на излъчване на алфа частици (ядра на хелий), електрони или позитрони, и гама лъчи съответно. Новата частица трябва да бъде електрически неутрална и много лека. Това означава, че тя много трудно може да бъде хваната от детектори на частици, които реагират основно на електрично заредени частици чрез електромагнитно взаимодействие, което е известно отдалеч.

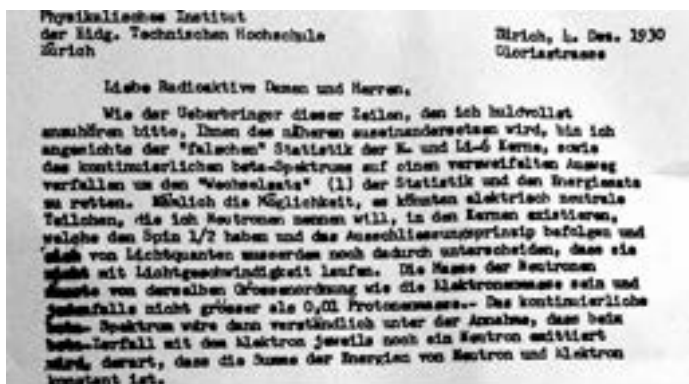
В същото време неутрино то е продукт на ново слабо взаимодействие, теорията на което предстоеше да бъде построена. Първият камък в основата на тази теория е поставен от италианеца Енрико Ферми

Нобеловата награда по физика за 2015 г. беше поделена от двама учени: японца Такааки Кажита (Takaaki Kajita) и канадчеца Артур Макдоналд (Arthur B. McDonald) за откритие на неутринните осцилации, които показват, че неутрино то има маса. Двамата учени са водещи изследователи от две международни колаборации – Супер Камиоканде (Super-Kamiokande) и СНО (Sudbury Neutrino Observatory) съответно.

(Enrico Fermi) още през 1934 г. Той измислил и названието „неутрино“ за новата хипотетична частица, заменяйки названието „неутрон“, предложено от Паули. Това било необходимо заради

откритието на неутралния компаньон на протона — неутрона, през 1932 г. Нещо повече, италианската наставка „ино“ означава умалително име, което по-точно отговаряло на свойствата на новата частица.

Освен че неутрино то е електрически неутрално, то трябва и много слабо да взаимодейства с окръжаващата ни материя, според теорията на Ферми. Например неутрино с характерна енергия на бета разпада от порядъка $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ($1 \text{ eV} \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$) е енергията, която придобива електрон, преминавайки разликата на потенциали от 1 V) е способно да премине през слонова кост с дебелина около една светлинна година (~ 10 трилиона километра), без да взаимодейства. Затова Паули така и не публикувал своята идея. Той в отчаянието си написал: „Аз направих нещо много лошо днес, като предложих частица, която не може да бъде открита; това е нещо, което никои теоретик не трябва никога да прави“.



Физически институт
на Федерален технологичен институт
Цюрих

Цюрих, 4 декември 1930 г.
Глориящрасе

Уважаеми радиоактивни дами и господа,

Като автор на тези редове, любезно моля да ме изслушате, за да ви обясня по-подробно за „грешната“ статистика на N- и Li-6 ядрата, както и за непрекъснатия бета спектър, спасявайки по отчаян начин „обменната“ статистика и закона за запазване на енергията. А именно, предполагам възможността в ядрата да съществуват електрически неутрални частици, които ще нарека неутрони, които имат спин $1/2$ и се подчиняват на принципа на изключване, а също така се различават от светлинните кванти с това, че те не се движат със скоростта на светлината. Масите на неутроните биха могли да бъдат от същия порядък, както електронните, но във всеки случай не по-големи от $0,01$ протонни маси. Непрекъснати бета спектър ще бъде разбран, като се предположи, че при β -разпад с електрона се излъчва още един неутрон, така че сумата на енергиите на неутрона и електрона е постоянна.

Превод доц. Михаил Чижов

Неутриното, като нова елементарна частица, е предсказано от австрийския физик Волфганг Паули (Wolfgang Ernst Pauli) в писмото му от 4 декември 1930 г.

И все пак неутриното е открито през 1956 г. от Фредерик Рейнс (Frederick Reines) и Клайд Коуан (Clyde Cowan). Обаче Рейнс получава Нобелова награда за това откритие едва през 1995 г. За да хванат поне няколко бройки от тези неуловими частици, те използвали невероятно голям брой антинеутрина, които се образуват в ядрения реактор чрез детектирането им през обратна реакция на радиоактивния бета разпад. Тук трябва да отбележим, че почти всяка елементарна частица, с малки изключения, трябва да има съответна античастица. Исторически условно е прието, че електро-

нът е частица, затова, за да се запази алгебрическата сума на частици минус античастици в реакциите, заедно с електрона трябва да се появи антинеутрино, което на свой ред може да произведе позитрон – античастицата на електрона.

Интересно, че почти веднага, през 1957 г., италианският физик Бруно Понтекорво (Bruno Pontecorvo), работещ в Обединения институт за ядрени изследвания в Дубна (Русия), предсказва неутринните осцилации, като процес на преминаване на неутрино в антинеутрино и обратно. Обаче този процес е свързан с изменение на алгебрическа-

открито едва през 2000 г. То отговаря на тау лептона, открит през 1976 г., с маса около 20 пъти по-тежка от тази на мюона. Те са представители на третото и последно досега поколение на елементарните частици.

Ние ще започнем с разглеждане на осцилациите между два типа неутрино. Въпреки че това е чисто квантов процес, ще го обясним от механична гледна точка, използвайки факта, че квантовата теория на полето, която се базира на квантовата механика и специалната теория на относителността, описва свободни елементарни частици по аналогия с хармонично механично трептене.

Нека да разгледаме системата на схема 1(а). Тя се състои от едно тяло, което е свързано със стена с безтегловна пружина и се движи по хоризонтална повърхност без триене. Ако отместим тялото от неговото равновесно състояние, то ще извършва хоризонтално периодично движение с фиксирана честота ν и дадена амплитуда. Използ-

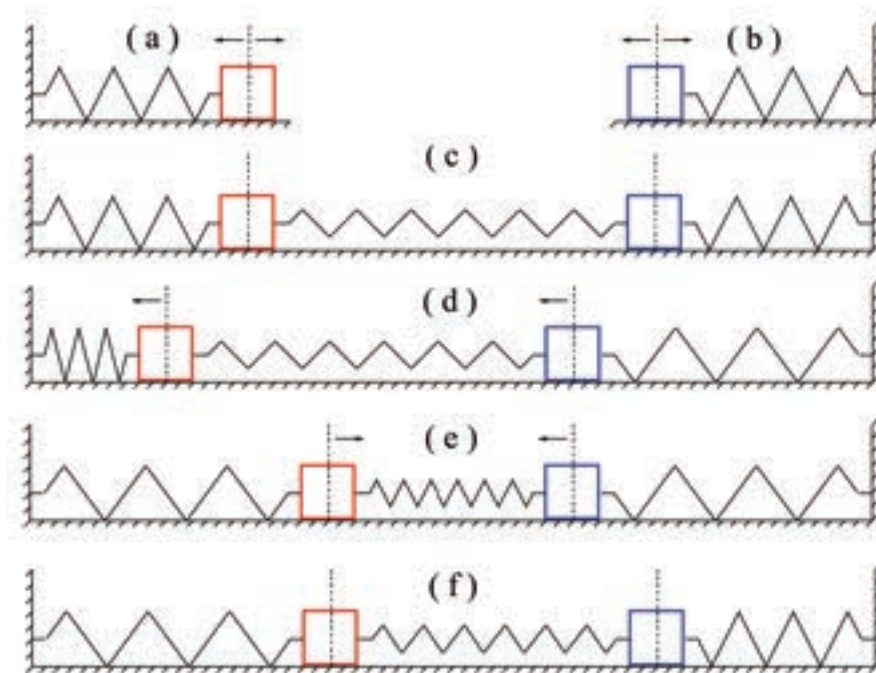


Схема 1

вайки квантови представи, можем да припишем на системата елементарен квант на енергия $E_0 = h\nu$, където $h \approx 6,6 \times 10^{-34}$ Js е константа на Планк. От друга страна, според релативистката формула на Айнщайн $E_0 = mc^2$, тази енергия може да определя и маса на елементарната частица, където $c = 299792458$ m/s е скоростта на светлината във вакуум. Така в квантовата теория на полето се дефинира масата на елементарна частица. Например масата на електрона $m_e \approx 0,5$ MeV / $c^2 \approx 9,1 \times 10^{-31}$ kg отговаря на огромна честота $\nu \approx 1,2 \times 10^{20}$ Hz. Оттук можете да оцените максималния размер на тази система, произвеждаща такава честота, смятайки c като максимална скорост, $r_e \sim c / \nu \approx 2,5 \times 10^{-12}$ m. Това е по-малко и от размера на атома. Амплитудата на хармоничните трептения е постоянна и може да се нормира на единица. Тя отговаря на вероятността за наличие на елементарната частица.

Нека втората елементарна частица да бъде представена от аналогична система на схема 1(b) със същите параметри. По този начин имаме две различни частици с еднакви параметри. За да опишем осцилациите, трябва да свържем телата с безтегловна мека междинна пружина (схема 1c). Ясно е, че като цяло новата система не отговаря на предишното описание на две отделни частици с равни маси. Междинната връзка ще пречи амплитудите и на двете тела да бъдат постоянни. Обаче в тази затворена система броят на частиците трябва да се запазва. Следователно ние трябва да намерим две нови състояния на системата, които имат постоянни честоти и амплитуди.

Първото състояние е очевидно и отговаря на синхронни трептения на двете тела наляво и надясно, запазвайки разстоянието между тях постоянно (схема 1d). По този начин междинната пружина няма как да окаже влияние върху тях. Това състояние ще съответства на елементарната частица



Доц. д.ф.м.н. Михаил Чижев е завършил Московския държавен университет. Работил в Лабораторията по теоретична физика на Обединения институт за ядрени изследвания (ОИЯИ) в Дубна, Русия, до 1990 г. От 25 години е доцент във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“. Автор е на няколко нови теоретични предсказания във Физиката на елементарните частици и Квантовата теория на полето. Съвместно с Д. П. Кирилова (ИА с НАО, БАН) откриват нови космологични ефекти на неутринните осцилации и получават прецизни ограничения върху неутринните параметри. В съавторство със С. Т. Петков (SISSA, Триест) предсказват нов ефект на неутринните осцилации в Земята и въвеждат широко използваното днес понятие за осцилограма на Земята. Неговият физичен модел успешно описва масите на съществуващи и новооткрити мезони. От 2009 г. е член на колаборацията АТЛАС на Големия адронен колайдер (ГЛК) в ЦЕРН от ОИЯИ. Автор е на повече от 600 научни публикации с висока цитируемост. Предсказанията от него нови елементарни частици в момента се търсят на ГЛК.

със същата маса, защото трептенията ще се извършват със собствената честота на отделните системи. Второто състояние, което запазва честотата и амплитудите и на двете тела постоянни, също отговаря на синхронни трептения на двете тела, оба-

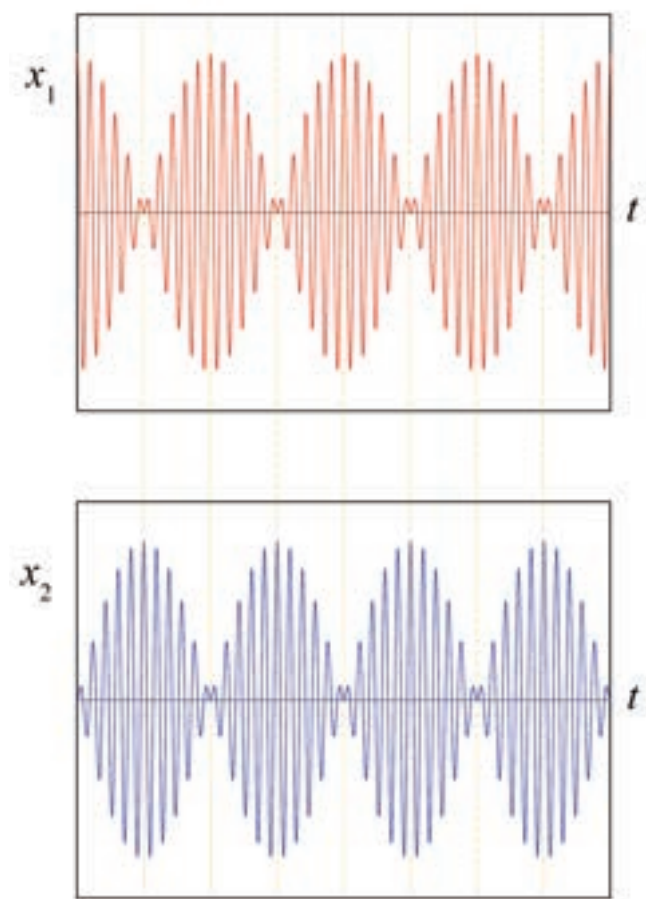


Схема 2

че едно срещу друго (схема 1е). Ясно е, че в този случай честотата на системата трябва да е по-висока от предишната, защото междинната пружина създава допълнителна ригидност. Това състояние ще съответства на втора елементарната частица, но с друга маса, по-голяма от предишната. Ако междинната връзка е много мека, системата ще описва две частици с почти еднакви маси (както и би трябвало в предела на нулева еластичност на междинната връзка или при липса на такава). Това е пример, когато различни колективни трептения отговарят на различни частици с определени маси.

Нека да разгледаме сега трептенията на отделните тела, които смятахме за час-

тици, преди да наложим връзката. Ако отместим едното тяло от негово равновесно състояние, задържайки другото в негово равновесно състояние (схема 1f), и после оставим системата да еволюира, ще получим осцилационна картина, когато ту едното, ту другото тяло последователно започват и спират трептенията си (схема 2). Техните амплитуди ще характеризират вероятностите за наличие на съответните състояния, които вече не отговарят на реални частици с определени маси. Те осцилират, преминавайки едно в друго.

Ще покажем, че те са смесица от реални частици с различни маси. Нека x_1 и x_2 са координати на първото и второто тяло. Тогава

колективното трептение, което отговаря на първата реална частица, може да бъде описано с трептение на центъра на тежестта на двете тела $r_1 = (x_2 + x_1)/2$, а втората, например, с половината от разликата на разстоянието между тях $r_2 = (x_2 - x_1)/2$. Обратно, можем да изразим координатите на телата като смесица от координатите, отговарящи на реалните частици $x_1 = r_1 - r_2$ и $x_2 = r_1 + r_2$. Оттук следват два много важни извода. Първо, осцилациите са възможни само между състояния, които са смесица от реални частици, и второ, че те трябва да имат различни маси. Това означава, че поне една от тези частици има ненулева маса.

Осцилациите бяха открити за пръв път през 1998 г. в т.нар. атмосферни неутрина от колаборацията Супер Камиоканде. Тези неутрина и антинейтрино, основно електронните и мюонните, се образуват в ядрените реакции на високо енергетични космични лъчи с частици от земната атмосфера. Беше твърдо установено, че само мюонните неутрина, които идват отдолу, преминавайки голямо разстояние през Земята, са по-малко на брой от тези, които идват отгоре. Потоците на електронни-

те неутрина бяха според очакванията. Този проблем бе известен като атмосферна неутринна аномалия. От това, разбира се, не следва веднага изводът, че мюонните неутрина осцилират. Много по-късно бе установено, че това се дължи на осцилациите на мюонните и тау неутрината.

Другата аномалия, свързана с недостатъка на електронни неутрина от Слънцето, е известна отдавна. Пълното нейно разрешаване обаче стана възможно едва през 2002 г. в експеримента СНО, когато част от електронните неутрина от Слънцето, които преминават в мюонно и тау неутрино, бяха регистрирани в експеримента. По този начин бе доказано, че неутринният поток от Слънцето е в съответствие с теоретичните предсказания, а недостигът на електронни неутрина се дължи на техните осцилации в други типове неутрина.

Обобщавайки казаното, можем да заключим, че електронното, мюонното и тау неутрината са смесени състояния на много леки, но масивни неутрина ν_1 , ν_2 и ν_3 от различни поколения. В природата съществуват осцилации между всички типове неутрино. ■

Елементарните частици и субатомната структура					
кварки			лептони		бозони
2,3 MeV $u^{2/3}$ up - quark	4,8 MeV $d^{-1/3}$ down - quark	I	<1 eV ν_1^0 first neutrino	0,511 MeV e^- electron	0 eV γ^0 photon
1,275 GeV $c^{2/3}$ charm - quark	95 MeV $s^{-1/3}$ strange - quark	II	<1 eV ν_2^0 second neutrino	105,66 MeV μ^- muon	80,4 GeV $W^\pm$ W - boson
173,2 GeV $t^{2/3}$ top - quark	4,18 GeV $b^{-1/3}$ bottom - quark	III	<1 eV ν_3^0 third neutrino	1776,8 MeV τ^- tau - lepton	91,2 GeV Z^0 Z - boson
					0 eV g^a gluon
					0 eV G^0 graviton
					125,1 GeV h^0 Higgs - boson

На рисунката са показани всички открити (освен гравитона) елементарни частици, които представляват основата на вече построената теория за техните взаимодействия. Неутрината са най-малко изучени между тях. Така, със сигурност, ни чакат още нови Нобелови награди в тази област