

Многоликният протон¹

Игор Иванов

Изучавайки строежа на веществото, физиците разбраха от какво се състоят атомите, добраха се до атомното ядро и го разцепиха на протони и неутрони. Всички тези крачки бяха направени относително лесно – необходимо беше просто да се ускорят частиците до необходимата енергия, да се ударят една с друга и тогава те сами се разпадаха на съставните си части.

Оказа се обаче, че с протоните и неутроните този трик не върви. Макар че и те са съставни частици, не се отдава да ги “разчупим на части”, колкото и силни да са ударите между тях. Ето защо на физиците бяха необходими десетилетия, за да измислят как да надникнат вътре в протона, да видят неговото устройство и форма. Понастоящем изучаването на структурата на протона представлява една от най-активните области на физиката на елементарните частици.

Природата изпраща намеци

Историята на изучаването на структурата на протоните и неутроните води началото си от 30-те години на 20. век. Когато освен протони били открити и неутрони (1932 г.) и измерили масата им, физиците с учудване констатирани, че тя е много близка до масата на протона. Нещо повече, оказало се, че протоните и неутроните участват в ядреното взаимодействие по абсолютно еднакъв начин. Дотолкова еднакъв, че от гледна точка на ядрените сили протонът и неутронът може да се разглеждат като две прояви на една и съща частица – частицата нуклон: протон – това е нуклон с електричен заряд, а неутронът – неутрален нуклон. Заменете протоните с неутрони и обратно – и ядрените сили (почти) няма да забележат размяната.

Това свойство на природата физиците наричат симетрия – ядреното взаимодействие е симетрично по отношение замяната на протони с неутрони, така както пеперудата е симетрична по отношение на замяната на лявото с дясно. Освен че изиграла важна роля в ядрената физика, тази симетрия по същество е първият намек, че нуклоните имат интересен вътрешен строеж. Истина е обаче, че тогава – през 30-те години, физиците не схванали този намек.

Осъзнаването му настъпило по-късно. Започнало с това, че през четвъртото и петото десетилетия на века, изучавайки ударите на протони с ядрата на различни елементи, учените с изненада започнали да откриват все нови и нови частици. Не протони, не неутрони, не и откритите вече по това време пи-мезони, които свързват нуклоните в ядрата, а някакви съвсем нови частици. Въпреки цялото си разнообразие, тези нови частици притежавали две общи свойства. Първо, те, както и нуклоните, участвали в ядрените взаимодействия – сега такива частици се наричат адрони. И, второ, те били изключително нестабилни. Най-нестабилните сред тях се разпадали на други частици едва за трилионна част от наносекундата – време, за което не успяват даже да прекосят ядрото!

Дълго време “зоопаркът” на адроните представлява пълна бъркотия. В края на 50-те години обаче физиците опознали вече достатъчно много различни видове адрони, започнали да ги сравняват един с друг и неочаквано открили някаква обща симетрия, дори периодичност в свойствата им. Изказано било предположението, че във вътрешността на всички адрони (в това число и на нуклоните) има някакви прости обекти, които нарекли “кварки”. Чрез комбиниране на кварките по различни начини може да се получат различни адрони, при това именно от такъв тип и с такива свойства, каквито се наблюдават в експериментите.

¹ Превод от кн. 5, 2009 г. на сп. Квант.

Кое прави протона протон?

След като физиците открили кварковата структура на адроните и разбрали, че кварките са няколко вида, станало ясно, че от кварки може да се конструират много и различни частици. Ето защо вече никой не се удивлявал на факта, че продължаващите експерименти един след друг откривали нови адрони. Но сред всички адрони се оказало цяло семейство частици, състоящи се, точно както и протона, само от два u -кварка и един d -кварк – някакви “събратя” на протона. И тук физиците ги очаквала изненада.

Нека първо да направим едно просто наблюдение. Ако имаме няколко предмета, съставени от еднакви “тухлички”, то по-тежките предмети съдържат повече “тухлички”, а по-леките – по-малко. Това е много естествен принцип, който можем да наречем принцип на комбинирането или принцип на надстрояването, и той прекрасно се изпълнява както във всекидневното, така и във физиката. Той се проявява дори в устройството на атомните ядра – нали по-тежките ядра са състоят просто от по-голям брой протони и неутрони.

На равнището на кварките обаче този принцип е абсолютно непригоден и, трябва да признаем, физиците и до сега не могат да разберат докрай защо. Оказва се, тежките събратя на протона се състоят от същите кварки, от които се състои и самият той, но въпреки това са един и половина, а понякога и два пъти по-тежки от него. Те се различават от протона (и помежду си) не по своя *състав*, а по взаимното *разположение* на кварките, по това, в какво състояние един спрямо друг се намират кварките. Достатъчно е да се промени взаимното положение на кварките, и от протона ние получаваме друга, значително по-тежка частица.

А какво ще стане, ако все пак вземем и съединим помежду им повече от три кварка? Ще се получи ли нова тежка частица? Удивителното е, че няма да се получи – кварките ще се разделят по тройки и ще се превърнат в няколко различни частици. По някаква своя си причина природата “не обича” да свързва в едно цяло много кварки! Едва съвсем скоро, буквално в последните години, се повиха намеци за това, че някои многокваркови частици все пак съществуват, но това само подчертава доколко природата не ги обича.

От тази комбинаторика следва много важен и дълбок извод – масата на адроните съвсем не е сбор от масите на кварките. Ако масата на адрона може да се увеличава или намалява чрез просто прекомбиниране на съставлящите го тухлички, това означава, че за тази маса съвсем не са отговорни самите кварки. И наистина, в последвалите опити се установи, че масата на самите кварки е само около два процента от масата на протона, а цялата останала маса възниква за сметка на силовото поле (нему отговарят специални частици – глюони), което свързва кварките заедно. Променяйки взаимното положение на кварките, например раздалечавайки ги, ние с това променяме и глюонния облак, правим го по-масивен, поради което расте и масата на адрона (фиг. 1).



Фиг. 1.: Условно изображение на протона и на няколко от неговите “събратя”. **Цветните точки** представляват кварките, които са свързани помежду си с глюонното поле (**синьото облаче**). Независимо от това, че трите частици са изградени от едни и същи кварки, те имат различни маси и различни времена на живот. Масите на частиците са изразени в енергетични единици – мегаелектронволти (MeV).

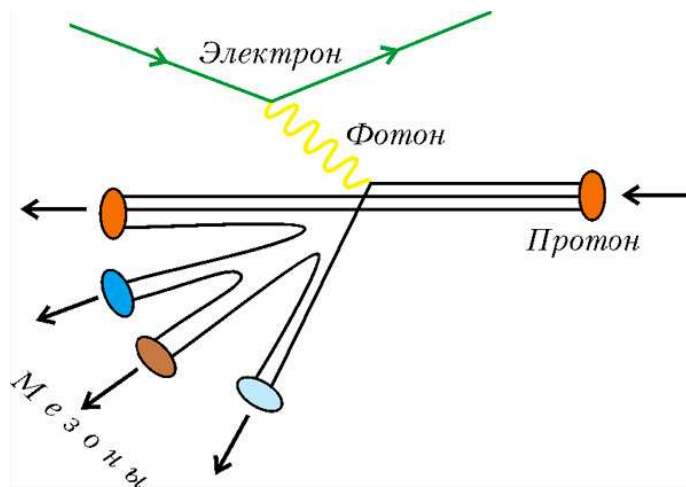
Какво става в бързо летящия протон?

Всичко описано по-горе се отнася за неподвижен протон, на езика на физиката – това е устройството на протона в неговата система на покой. Структурата на протона обаче най-напред е разкрита в експерименти при други условия – в условията на *бързо летящ* протон.

В края на 60-те години на миналия век при опитите с удари между частици в ускорителите било забелязано, че летящите със скорост, близка до скоростта на светлината протони се държат така, като че ли енергията в тях не е разпределена равномерно, а е концентрирана в отделни компактни обекти. За тези области със съгъстено вещество във вътрешността на протона знаменитият физик Ричард Файнман предложил името *партони* (от английското *part* – част).

В следващите експерименти били изучени много свойства на партоните – например техния електричен заряд, броят им и частта от енергията на протона, която носи всеки от тях. Оказва се, че заредените партони представляват кварки, а неутралните партони – глюони. Да-да, самите тези глюони, които в системата на покой на протона просто “прислужват” на кварките като ги привличат един към друг, сега, при големите скорости, се проявяват като самостоятелни партони и пренасят “вещество” и енергия. Опитите показват, че примерно половината от енергията се пада на кварките, а другата половина – на глюоните.

Най-удобно е партоните да се изучават при удари на протоните с електрони. Работата е там, че за разлика от протона, електронът не участва в силното ядрено взаимодействие и затова ударът му с протона изглежда съвсем просто: за много кратко време електронът изпуска виртуален фотон, който се врязва в заредения партон и в края на краищата ражда голям брой частици (фиг. 2). Може да се каже, че електронът играе роля само на отличен скалпел за “отваряне” на протона и разделяне на частите му – разбира се, само за много кратко време. Като се знае колко често протичат подобни процеси в ускорителя, може да се измери броят на партоните в протона и техните заряди.



Фиг. 2.: При удар на протона с електрон, между тях “прескача” квант на електромагнитното поле – фотон. Удряйки се с един от партоните в протона, той поражда много вторични адрони, например мезони.

Кои всъщност са партоните?

И тук всъщност ние приближаваме към още едно поразително откритие на физиците, направено при изучаване на ударите между елементарните частици при високи енергии.

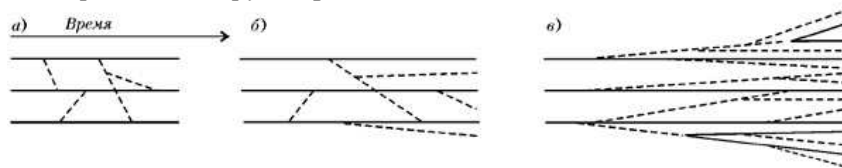
В обикновени условия въпросът за това, от какво се състои този или онзи предмет, има универсален отговор, независимо от отправната система. Например, водната молекула се състои от два атома водород и един атом кислород, и не е важно дали наблюдаваме неподвижна или движеща се молекула. Това правило обаче – на пръв поглед толкова естествено! – се нарушава, когато става дума за елементарни частици, които се движат със скорости, близки до скоростта на светлината. В една отправна система сложната частица може да се състои от един набор субчастици, а в друга отправна система – от друг. Оказва се, че съставът е *относително понятие*.

Как е възможно това? Ключова роля в случая играе едно важно свойство: броят на частиците в нашия свят не е фиксиран – частици може да се раждат и да изчезват. Например, ако се ударят два електрона с достатъчно голяма енергия, то в добавка към тези електрони може да се роди или фотон, или електрон–позитронна двойка, или още някакви други частици. Всичко това е позволено от квантовите закони и точно по този начин протича в реалните експерименти.

Този “закон за не-запазването” на частиците обаче работи *при удари* между частици. А как така един и същ протон, от различни гледни точки изглежда състоящ се от различни набори частици? Работата е там, че протонът не представлява просто три кварка, събрани заедно. Между кварките съществува силово глюонно поле. Изобщо казано, силовото поле (както например гравитационното или електричното поле) – това е определена материална “същност”, която пронизва пространството и позволява на частиците да си взаимодействат посредством сили. В квантовата теория полето също се състои от частици, наистина, от особени частици – виртуални. Техният брой не е фиксиран, те постоянно се излъчват от едни кварки и се поглъщат от други кварки.

Неподвижния протон наистина можем да си представяме като три кварка, между които прескачат глюони. Но ако погледнем на този протон от друга отправна система, например от прозореца на преминаващ край него “релятивистичен влак”, то ние ще видим съвсем друга картина. Онези виртуални глюони, които слепваха кварките един за друг, сега ще ни се сторят по-малко виртуални, ще ни изглеждат като “по-истински” частици. Онова, което изглежда обикновено силово поле в една отправна система, се превръща в поток от частици в друга отправна система! И забележете – ние не правим нищо със самия протон, а само го наблюдаваме от друга отправна система.

По-нататък – повече. Колкото по-близко е скоростта на нашия “релятивистичен влак” до скоростта на светлината, толкова по-чудновата картина ще видим вътре в протона. С доближаване на скоростта на светлината ще забележим, че глюоните в протона стават все по-много и по-много. Нещо повече, понякога те се делят на кварк–антикваркови двойки, които също летят заедно с другите и също се смятат за партони. В резултат на това, ултрарелятивистичният протон, т.е. протонът, движещ се спрямо нас със скорост, много близка до скоростта на светлината, ни се представя във вида на взаимно проникващи се облачета от кварки, антикварки и глюони, които летят заедно и като че ли се поддържат едно друго (фиг.3).



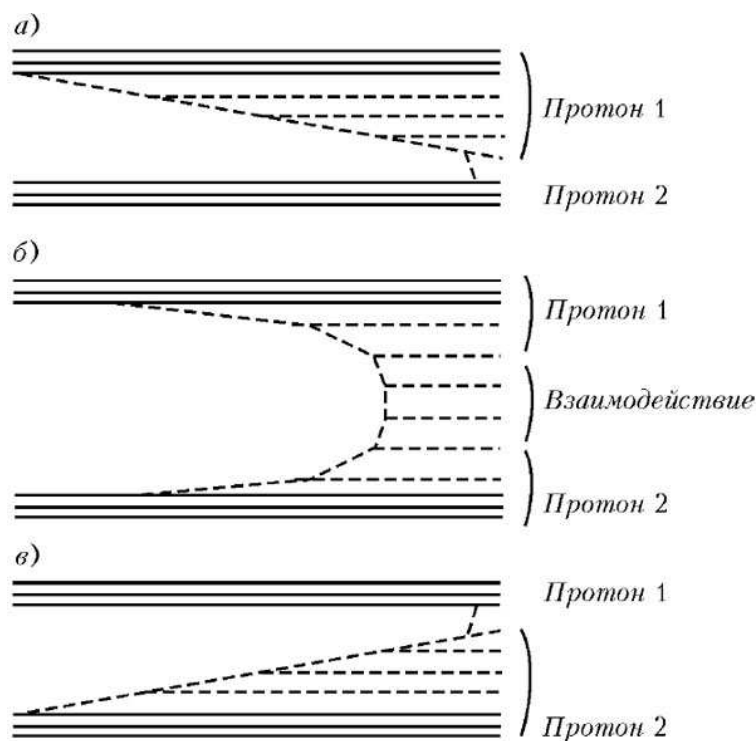
Фиг. 3: Схематично представяне на протона в различни отправни системи. Бавно движещият се протон (а) можем да представим като три кварка (**плътните линии**), свързани една с друга посредством глюони (**щрихованите линии**). В бързо движещия се протон (б) глюоните вече понякога летят заедно с кварките. При скорости на протона, много близки до скоростта на светлината (в), и глюоните, и

родените от тях кварк–антикваркови двойки се превръщат в пълноправни партони – съставни части на протона.

Запознатият с теорията на относителността читател може да започне да се безпокои: цялата физика е построена върху принципа, че всеки процес протича по един и същ начин във всички инерциални отправни системи. А тук се получава, че съставът на протона зависи от отправната система, от която го наблюдаваме?!

Да, точно така е, но това съвсем не нарушава принципа на относителността. Резултатите от физичните процеси – например какви частици и какъв брой се раждат при ударите – наистина са инвариантни, макар съставът на протона да зависи от отправната система.

Тази на пръв поглед необикновена, но удовлетворяваща всички физични закони ситуация, е илюстрирана на фиг. 4. Там е показано как изглежда ударът между два протона с големи енергии в различни отправни системи: в система на покой на единия протон, в система на центъра на масите и в система на покой на другия протон. Взаимодействието между протоните се осъществява посредством каскада от разцепващи се глюони, но в единия случай тази каскада се разглежда като “вътрешност на единия протон, в другия случай – като част от другия протон, а в третия – това е просто някакъв обект, който обменят двата протона. Тази каскада съществува, тя е реална, но към коя част от процеса ще я отнесем – това вече зависи от отправната система.



Фиг. 4: Схематично представяне на удар между два протона при много високи енергии: в системата на покой на втория протон (а), в системата на центъра на масите (б), в системата на покой на първия протон (в). И в трите случая взаимодействието се осъществява посредством обмен на “дърво от глюони”, но към кой именно ще го отнесем (към първия или към втория протон, или ще го смятаме отделно взаимодействие) – зависи от отправната система.

Тримерен портрет на протона

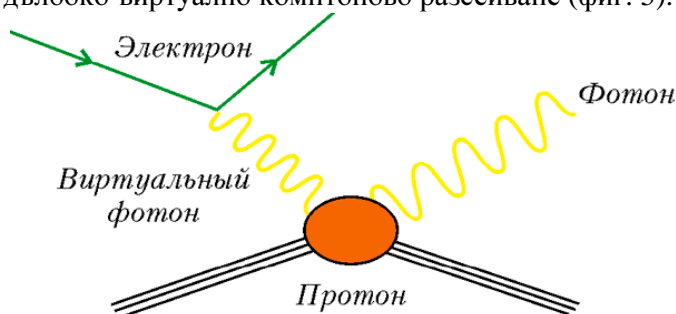
Всички резултати, за които разказахме току що, се основават на опити, проведени отдавна – през 60-те и 70-те години на миналия век. Би могло да се помисли, че от тогава до сега всичко би трябвало да бъде изучено и всички въпроси да получат своите отговори. Да, ама не – устройството на протона, както и преди, остава една от най-интересните теми във физиката на елементарните частици. Нещо повече – през последните години интересът към нея отново нарасна, тъй като физиците разбраха как да получат “тримерен” портрет на бързо движещия се протон, който се оказва по-сложен от портрета на неподвижния протон.

Класическите опити с удрящи се протони разказват само за броя на партоните и тяхното разпределение по енергии. В такива експерименти партоните участват като независими обекти и, значи, от тях не може да се разбере как партоните са разположени един спрямо друг, как точно са събрани в протона. Може да се каже, че дълго време за физиците бе достъпен само “едномерен” портрет на бързо летящия протон.

За да се построи истински, тримерен портрет на протона, и да се разбере разпределението на партоните в пространството, са необходими експерименти, много по-тънки от онези, които бяха възможни преди 40 години. Физиците се научиха да поставят такива експерименти съвсем отскоро, буквално през последните десет години. Те разбраха, че сред огромния брой различни реакции има една особена реакция – *дълбоко-виртуалното комптоново разсейване* – което може да разкаже за тримерната структура на протона.

Казано изобщо, комптоново разсейване, или ефект на Комптън, наричат нееластичния удар на фотон с някаква частица, например с протон. Такъв удар изглежда по следния начин: долита фотонът, поглъща се от протона, който за кратко време преминава във възбудено състояние, а след това се връща в изходното състояние, като изпуска фотон в някаква посока.

Комптоновото разсейване на обикновени светлинни фотони не води до нищо интересно – това е просто отражение на светлина от протон. За да “влезе в играта” вътрешната структура на протона и “да се почувства” разпределението на кварките, трябва да се използват фотони с много високи енергии – милиарди пъти повече, отколкото в обикновената светлина. А точно такива фотони, вярно – виртуални, лесно поражда един налитащ електрон. Ако сега едното се обедини с другото, то се получава споменатото дълбоко-виртуално комптоново разсейване (фиг. 5).



Фиг. 5.: Схема на дълбоко-виртуално комптоново разсейване. Налитащият електрон изпуска виртуален фотон, който се разсейва от протона както при ефекта на Комптън.

Главната особеност на тази реакция е в това, че тя не разрушава протона. Налитащият фотон не просто удря протона, а като че ли внимателно го опипва и после отлита. Това, в каква посока той отлита и каква част от енергията му е отнел протонът, зависи от устройството на последния, от взаимното разположение на партоните в него.

Ето защо, изучавайки този процес, можем да възстановим тримерния образ на протона, като да “налепим негова скулптура”.

Наистина, това съвсем не е проста задача за физика–експериментатор. Необходимият процес протича достатъчно рядко, а да се регистрира е трудно. Първите опитни данни за тази реакция бяха получени едва през 2001 г. на ускорителя HERA в немския ускорителен комплекс DESY в Хамбург; сега експериментаторите обработват нова серия данни. Впрочем, въз основа на първите данни теоретиците вече рисуват тримерното разпределение на кварките и глюоните в протона. Физичната величина, за която физиците по-рано правеха само предположения, започна да се “очертава” от опитите.

Дали ни очакват някакви неочаквани открития в тази област? Много вероятно – да. Като илюстрация ще споменем, че през ноември 2008 г. се появи интересна теоретична статия, в която се твърди, че бързо летящият протон трябва да има вид не на плосък диск, а на двойно вдлъбната леща. Това се дължи на факта, че партоните от централната област на протона се свиват в надлъжно направление по-силно, отколкото партоните по краищата. Би било много интересно да се проверят опитно тези теоретични предсказания.

Защо всичко това е интересно за физиците?

Защо въобще им е необходимо на физиците да знаят как точно е разпределено веществото в протоните и неутроните?

Преди всичко, това се изисква от самата логика на развитието на физиката. По света има много поразително сложни системи, с които съвременната теоретична физика все още не може да се справи напълно. Адроните са една от тези системи. Като се занимаваме с устройството на адроните, ние усъвършенстваме способностите на теоретичната физика, които, няма да бъде изненада, ако се окажат универсални и е възможно да ни помогнат в нещо съвсем друго – например при изучаване на свръхпроводниците или на други материали с необикновени свойства.

На второ място, тук има пряка полза за ядрената физика. Въпреки почти вековната история на изучаването на атомните ядра, теоретиците и до днес не знаят точния закон на взаимодействие между протоните и неутроните. На тях им се налага отчасти да отгатват този закон, изхождайки от опитните данни, отчасти да го конструират на основа на знанията за структурата на нуклоните. Именно тук може да помогнат и новите данни за тримерното устройство на нуклоните.

Трето, преди няколко години физиците успяха да получат ни повече, ни по-малко ново състояние на веществото – кварк–глюонна плазма. В това състояние кварките не стоят вътре в отделни протони и неутрони, а свободно се разхождат из ядреното вещество. Това може да се постигне примерно така: тежки ядра се ускоряват в ускорителя до скорости, много близки до скоростта на светлината и след това се сблъскват челно. При такъв удар за кратко време възниква температура от трилиони градуси, която разтапя ядрата и ги превръща в кварк–глюонна плазма. Та, оказва се, теоретичните пресмятания на това ядрено топене изискват добро познаване на тримерното устройство на нуклоните.

Накрая, тези данни са много необходими на астрофизиката. Когато в края на живота си тежките звезди избухват, от тях често остават необикновено компактни обекти – неутронни и, възможно, кваркови звезди. Сърцевината на тези звезди изцяло се състои от неутрони, а може би и от студена кварк–глюонна плазма. Такива звезди отдавна вече са открити, но какво става във вътрешността им – можем само да гадаем. Така че доброто разбиране на кварковите разпределения може да доведе до напредък и в астрофизиката.