

МОДЕЛИТЕ НА АТОМНОТО ЯДРО - СЪПКА КЪМ РЕШАВАНЕ НА МНОГОЧАСТИЧНИЯ ПРОБЛЕМ

Чавдар Стоянов*

Един, общо взето, известен анекдот разказва, че в една непрогледна нощ, под проливен дъжд, сред бурно море, капитанът казал на един от моряците: разкажи нещо ободряващо. След кратка пауза морякът започнал: била тъмна нощ, валил проливен дъжд и т.н. Съвсем сигурно подобни са голяма част от емоциите, които съпътстват разговорите на физици и математици при обсъждането на проблеми свързани с динамиката на система от много тела - известно е, че дори описанието на движението на три тела, в общия случай, не е направено докрай.

За добро или за зло, природата не се съобразява с нивото на нашите знания и ни предлага нови предизвикателства. Преди един век откриването на радиоактивността ни свързва със света на микрообектите. Така към количествената характеристика - много на брой се добавя и ново качество - квантови. В момента квантовата физика е обширна наука, в която отделните области предлагат специфична интерпретация на многочастичния проблем, но голяма част от използваните методи са твърде близки.

Атомното ядро, *a priori*, се счита за система съставена от много силно взаимодействащи частици. Още през 30-те години на века е открито, че ядрото се състои от неутрони и протони, които имат почти еднаква маса, поради което са наречени с общо име нуклони. Най-лекото ядро - водородът съдържа един протон, а картата на стабилните ядра завършва при ядра в които са свързани 100 протона и 150 неутрона (фермий, менделеев и т.н.). Силно взаимодействие между нуклоните ги свързва здраво и не позволява те да се разпръскват, въпреки мощното кулоново поле. Големият брой нуклони обаче, не трябва да се отъждествява с безкраен брой. Ядрото не може да се разглежда като безкрайна ядрена материя, а по-скоро като малко късче такава материя.

И така, много, но ограничен брой, силно взаимодействащи частици - звучи респектиращо и на пръв поглед безнадеждно. Та, що за методи трябва да се използват за изучаване на такива системи.

* чл. кореспондент, ИИЯЕ, БАН

Очевидно, теорията на пертурбациите е трудно приложима. Добре изученото взаимодействие между свободните нуклони не може да се използва, тъй като големият брой частици в ядрото изкривява значително вида на това взаимодействие. Неефективни са също методи при които решенията се получават когато броят на частиците е неограничен. Но, нека перефразираме Шекспир: "Навъдиха се разни философи, които свръхестественото и загадъчното представят като изключително просто и обикновено". За атомното ядро това просто и обикновено нещо са моделите на ядрото. Моделите следват някои добре известни принципи. Те описват максимално точно характерни свойства, а останалите - приближено. Атомното ядро реагира различно на външно въздействие. При едни процеси се проявяват свойствата на отделните нуклони съставлящи ядрото, при други, то реагира като неделимо цяло. Тези особености са довели до създаване на два основни класа модели на ядрото - колективни и неколективни.

През 40-те години новооткрити свойства на ядрото показват отклонения от средното поведение при определен брой на нуклоните. Например, масата на ядрото се отклонява значително от средната тенденция на изменение при брой на протоните или неутроните равен на 20, 28, 50, 82 и т.н. Може да се направи аналогия с атомната физика, където подобни отклонения се обясняват с наличието на средно поле в което се движат електроните, запълвайки определени слоеве. Дълго време опитите да се моделира средно поле в ядрото са безуспешни. В края на 40-те години Е. Ферми съветва Г. Майер да използва силно спин-орбитално взаимодействие при построяване на средно поле. Идеята е блестяща и дава живот на може би най-използвания модел на атомното ядро - слоестият модел. Моделът се използва успешно повече от 50 години, а неговите автори Ханс Йенсен и Мария Геперт-Майер получават Нобелова награда през 1963 г.

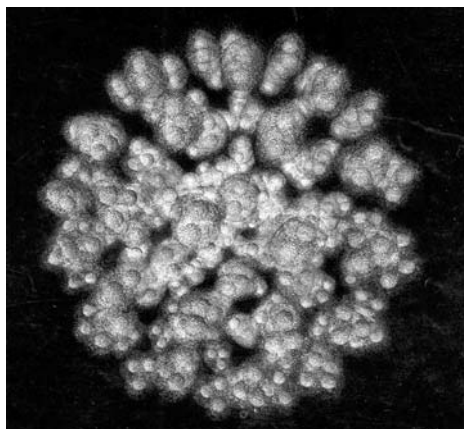
Утвърждаването на модела е свързано с разгорещени спорове. Те се отнасят към произхода на средното поле в ядрото. Аналогията с атомната физика не може да помогне. В атома съществува добре обособен център - атомното ядро, който създава средно поле. Как обаче възниква то в ядрото? Причината за това е един фундаментален закон в микросвета - принципът на Паули. Този принцип гласи, че две тъждествени частици с полуцел спин не могат да се намират едновременно в едно състояние. Такива частици са неутроните и протоните. Този факт, всъщност е едно голямо откритие направено постепенно от голяма група изследователи. Източникът на средно поле

не е определен обект, а принцип произлязъл от свойствата на частиците. Независимо от силното привличане, частиците не могат да се съсредоточат в една точка и са принудени да се движат в общо, създадено от тях самите поле.

Моделът има още една особеност. Той нарушава транслационната инвариантност, т.е. при преместване в пространството свойствата на моделната система не остават едни и същи. Това не е съществено когато външните сили въздействат само върху вътрешните степени на свобода на системата. Когато обаче външното поле води до преместване на цялото ядро, слоестият модел предсказва излишни, "духови" състояния. Е, ако се върнем към Шекспир - философите се крият зад простото, но има и проблеми. Доколко те са съществени ще видим по-нататък.

Като илюстрация на слоестия модел на фиг. 1 е показано изображение на ядрото на урана. Изображението силно се различава от традиционните представи. Образът е получен чрез графично представяне на пространството заето от нуклоните в определен момент от тяхното движение в средното поле. Състоянията, в които се намират нуклоните са получени чрез решаване на уравненията на Хартри-Фок, които описват средното поле в ядрото.

Друго интересно свойство на атомното ядро е сдвояването на нуклоните. Ефектът е известен отдавна и всички емпирични формули отразяващи зависимостта на енергията на свързване на нуклоните от масата на ядрото отчитат този ефект. Сдвояването е универсално свойство на микрообектите. През 40-те години, Ландау въвежда понятието квазичастица за обясняване на ефекта на сдвояване. Квазичастицата е формален обект твърде близък по параметри до реалната частица. Квазичастицата възниква като резултат от взаимодействието на няколко съседни частици и живее твърде кратко. През 1956 г. Н. Н. Боголюбов предлага проста математическа трансформация свързваща частиците и квазичастиците. Това е много силен теоретичен резултат, позволяващ да се използва добре разработения апарат на слоестия модел. Но, вместо средно поле в което се движат частици, ще имаме

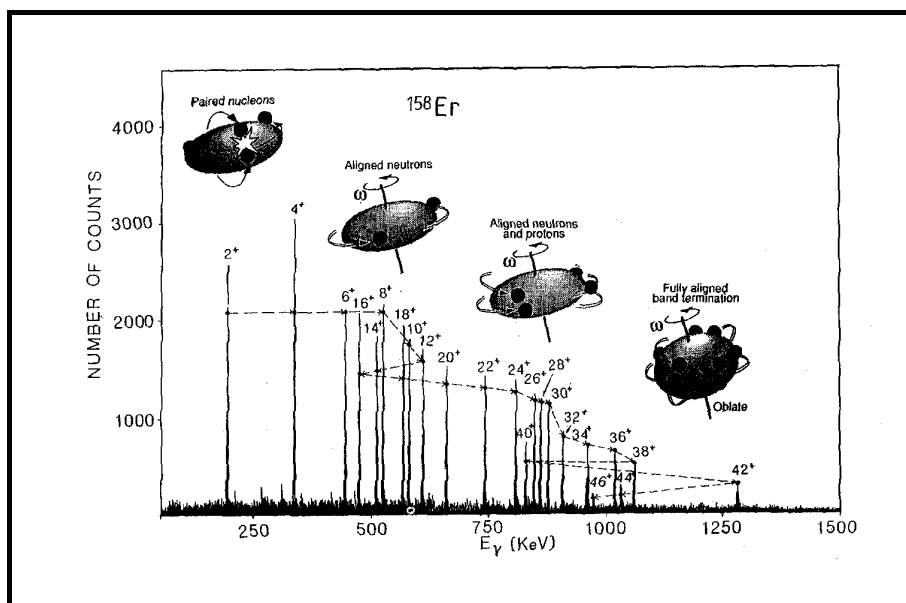


Фиг. 1.

средно поле в което се движат квазичастици. Тази интерпретация води до създаване на свръхтекущия модел на атомното ядро. Моделът утвърждава представата, че протонната система в ядрото се намира в свръхпроводяща фаза, докато neutronите са в състояние на свръхфлуидност. Отново е достигнато нещо относително просто. Но, трябва да сме внимателни. Опитът придобит от слоестия модел показва, че простотата се постига с цената на нещо съществено. Какво е то при свръхтекущия модел? Трансформацията на Боголюбов не запазва броя на частиците в ядрото. Използвайки я в моделните пресмятания ние не можем да сме сигурни, че изучаваме ядро с Z протона и N неутрона. В действителност, ние изследваме група ядра, чиито среден брой неурони е N , а протони Z .

Ефектите, които са следствие от сдвояването в ядрото са многобройни, но много трудно могат да се онагледяват. Ще се опитаме да направим това на фиг. 2. На фигурата в горната лява част е показано ядро и две двойки сдвоени нуклони, които се движат около деформирана сърцевина. Спектърът, който се наблюдава е показан като функция на енергията на възбуждане. При увеличаване на скоростта на въртене на сърцевината, по-големи стойности на ъгловия момент се наблюдават при по-високи енергии на възбуждане. На фигурата това се вижда за състоянията от 2^+ до 12^+ . При определена стойност на ъгловата скорост една от двойките се разкъсва и това води до изменение в реда, който следват възбудените състояния. Състоянието 14^+ има по-ниска енергия на възбуждане от 12^+ . Когато ъгловата скорост се увеличава, все повече двойки се разкъсват и това

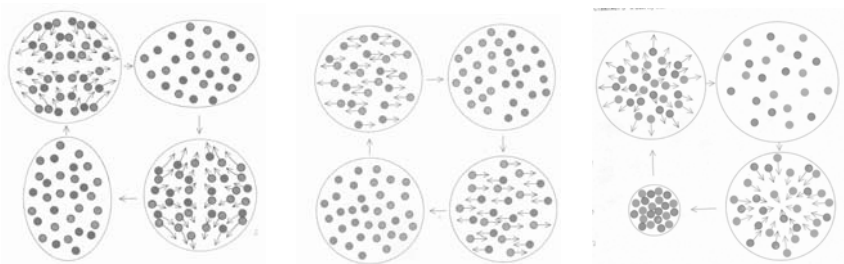
води до промени в последователността на възбудените състояния в спектъра. При голям брой разкъсани двойки се появява ново качество. Това е показано в дясната част на фиг. 2. Деформираната сърцевина вече не съществува. Тя е преминала в сферическа.



Фиг. 2.

Колективните свойства на атомното ядро са основа на друг тип ядрени модели. Интересен процес е възбуждането на гигантски резонанси. Гигантските резонанси са резултат от вибрации на ядрото с твърде голяма честота. Типична за този процес честота е 10^{21} херца. В този тип движение участват всички нуклони в ядрото. Съществуват различни видове гигантски резонанси - монополни, диполни, квадруполни, магнитни и т.н. На фиг. 3 са показани няколко типа гигантски резонанси. Първият открит гигантски резонанс е диполният. Любопитна подробност е, че възможността в ядрото да се възбуди гигантски диполен резонанс е предсказана теоретически през 1944 г. и чак в началото на 50-те години резонансът е открит експериментално. Гигантските диполни колебания се възбуждат при взаимодействието на ядрата с високоенергетически фотони. Всичките протони в ядрото (фиг. 3а) се ускоряват от електрическото поле на фотоните в една посока. Електрическото поле не засяга неутроните, но те започват да се движат в посока обратна на протоните, за да може центърът на масата

на ядрото да остане неподвижен както се изисква от закона за запазване на импулса. Силното взаимодействие между нуклоните в ядрото поражда възстановяваща сила, която в определен момент променя движението на неутроните и протоните. Честотата на тези вибрации може лесно да се пресметне като се знаят инертността на нуклоните, възстановяващата сила и законите на класическата механика. Инертността е пропорционална на броя на нуклоните, възстановяващата сила е пропорционална на обема на ядрото. Пресмятията показват, че честотата на вибрациите зависи обратно пропорционално на радиуса на ядрото. Експерименталните данни удивително точно следват тази зависимост. Типична честота за диполните вибрации е 5×10^{21} херца.



Фиг. 3

Гигантските квадруполни вибрации (фиг. 3б) могат да се възбудят, ако ядрото се бомбардира с частици взаимодействащи по един и същ начин с протоните и неутроните. Такива са например, алфа частиците. Взаимодействието предизвиква изменение на формата на ядрото - от сферически симетрична, тя става елипсоидна и след това отново сферически симетрична и т.н. Типична честота на гигантските квадруполни вибрации е 3×10^{21} херца.

Трети и може би най-интересен тип гигантски резонанс е монополният - показан на фиг. 3в. Той се нарича също "дихателен" резонанс. Монополните вибрации са особено трудни за наблюдение, тъй като нуклоните се движат заедно към центъра на ядрото или се отдалечават от него. Очевидно е, че за да се предизвика такова движение е необходимо или да се "притиска" ядрото от всички страни едновременно или обратно да се "разтегли". Това налага особени изисквания при облъчване на ядрото. Бомбардиращата частица не трябва да се удря в ядрото, а само леко да засегне неговата повърхност.

Падащата вълна увлича ядрената повърхност след себе си предизвиквайки разтягане на ядрото. Очевидно е, че при този тип вибрации плътността на ядрото ту се увеличава, ту намалява. От това свойство следва и големия интерес към този вид резонанс. Неговата енергия (честотата на монополните вибрации) зависи от една фундаментална величина - коефициента на свиваемост на ядрената материя. Точното определяне на този коефициент е от голямо значение за много области на физиката. Например, процесите които стават в неутронните звезди и други екзотични звездни обекти, а също еволюцията на звездните системи са свързани с точното определяне на този коефициент. В края на живота на звездата се нарушава баланса между свиващите я гравитационни сили и издуващото я налягане на високотемпературните газове, получавани от ядрени реакции. Гравитацията свива звездата до плътността на ядреното вещество и тази плътност противодейства на гравитационния колапс. Известно е, че в зависимост от свиваемостта на ядрената материя гравитационния колапс може да доведе до образуване на черна дупка или до пораждаване на ударна вълна предизвикваща взрив на свръхнова звезда. Тези интересни феномени могат да се разберат само, ако експериментално добре се познават и теоретично прецизно се описват свойствата на гигантските мултиполни резонанси в атомните ядра.

Енергията на възбуждане при която се наблюдават гигантските резонанси е между 12 и 14 MeV. Това е висока енергия на възбуждане за атомното ядро. В този енергетически интервал има различни видове възбудени състояния на ядрото. Разстоянието между тези състояния е само няколко електронволта. Ширината на резонанса е 3 - 4 MeV. Това показва, че той е разположен сред огромно количество (няколко милиона) възбудени състояния от различен вид. Очевидно, праволинейното решаване на задачата за описание на свойствата на резонанса е безнадеждно. Може да се предположи, че механизмът на възбуждане протича на няколко етапа. Първоначално се възбужда колективно състояние. Това състояние се получава когато под влияние на външно поле, нуклон напуска заеманото от него състояние и преминава на орбита с по-голяма енергия , т.е. образува се двойка частица-дупка. Колективното състояние е породено от образуване на много частично-дупчести възбуждания. Такова възбудено състояние се именува фонон. Важна особеност на фонона е, че той е образование с

цял спин, т.е. бозон.¹ Следващият етап от възбуждането на гигантските резонанси се състои във взаимодействието на фононите със следващите по-сложност конфигурации. Това са двуфононни конфигурации. Те от своя страна взаимодействат с още по-сложни конфигурации и т.н. Процесът продължава докато системата заеме равновесно положение, което се наблюдава експериментално като широк максимум в сечението на фотопоглъщане (възбуждане на диполен резонанс) или друг ядрен процес.

Описаният сложен механизъм се възпроизвежда успешно от квази-частично-фононния модел на ядрото, създаден в Дубна през 70-те години. Моделното взаимодействие е конструирано да следва описаната по-горе етапна процедура. Любопитно е, че това взаимодействие се оказва доста универсално и позволява описание на свойствата на възбудените състояния в широк диапазон на енергията на възбуждане. Е, отново стигаме до проста картина, която внася яснота в сложното взаимодействие на няколко милиона компоненти. Но, спомняйки си за слоестия и свръхтекущия модели, следва да се отнесем критично към предлаганата простота. Къде се крие уловката? Фононът, който е основна градивна единица на модела е съставен от нуклони, т.е. фермиони. Взаимодействието между фононите пренебрегва този факт и по този начин се нарушава принципа на Паули.

Разгледаните примери са достатъчни да покажат как се строят и използват моделите на атомното ядро. Но, трябва да си зададем въпроса - дали пренебрегването от моделите на важни принципи и отклонението им от основни параметри на ядрената система не води до нееднозначност или недостоверност на получените резултати, или както казва българската поговорка: "Който зяпа по небето пада в кладенеца". Специалистите са изследвали подробно този въпрос. Разработени са теоретични методи, позволяващи възстановяване на нарушените симетрии - транслационна инвариантност, брой на частиците, принципа на Паули. Тези методи са сложни и не се използват често. Обикновено едно, две пресмятания са достатъчни за да се убедим до каква степен основните симетрии се нарушават в конкретен процес. Много често отговорът е в полза на моделите. Нещо повече, показано е, че нарушаването на транслационната инвариантност успешно се компенсира просто чрез въвеждане на

¹ Фононите, подобно на квазичастиците са формални обекти и се използват в много области на теоретичната физика.

ефективен заряд, а броят на частиците лесно се възстановява чрез леки промени на някои параметри използвани в моделните пресмятания.

Така, теорията за възстановяване на нарушените симетрии ни зарежда с положителни емоции. В някои книги с анекдоти за физици може да се прочете обявление публикувано в провинциален английски вестник в началото на 19-ти век: "Някой си, изобретил Система, основана на математически Принципи, чрез която се премахват Затруднения и се поправят Грешки". Това обявление като че ли се отнася към методите за възстановяване на симетриите. Тези методи изглеждат създадени, за да подчертаят положителните страни на моделите и да опровергават скептиците. Ако оставим обаче шегите настрана, не може да не ни впечатли ефективността на теоретичните подходи в ядрената физика основани върху съвременните модели на атомното ядро.

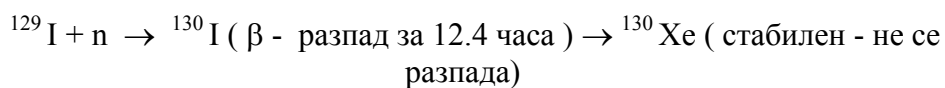
Тук е мястото да поставим един въпрос, който много често се задава в науката. Какво представляват моделите на ядрото? Това е една изящна мисловна конструкция, която елегантно обяснява сложни природни явления или може да се използва за непосредствени приложения. Да си припомним отново една българска поговорка : " Овца без облага , никому не е драга". За щастие, моделите на атомното ядро са достигнали нивото на едно дълбоко и цялостно описание на ядрената система. Това ги прави използвани в редица приложения свързани с решаване на технологични проблеми. Като пример ще разкажем за приложението на някои модели при решаване на екологични проблеми на ядрената енергетика.

Известно е, че при работа на енергетическите ядрени реактори се натрупват големи количества радиоактивни отпадъци. Те трябва да се събират и съхраняват в специални хранилища безкрайно дълго време, тъй като някои радиоактивни изотопи имат период на полуразпад милиони години. Тези хранилища са изключително скъпи, защото системите за предпазване от вредното въздействие на радиоактивността трябва да работят стабилно много дълъг период от време. Възможно ли е този проблем да бъде преодолян? Ако отговорът е положителен това би предало нов облик на цялата ядрена енергетика, би повдигнало "рейтинга" и сред големи групи от населението.

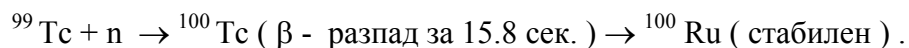
През последните години усилията на редица специалисти са насочени към решаването на този проблем. Идеята е съвсем проста и се основава на принципа на трансмутацията (преобразуване) на елементите. Тази идея е много стара и е осъществена практически от

Ръдърфорд през 1919 година, който е облъчвал ^{14}N с алфа частици и е получил ^{17}O . Праволинейното използване на този принцип обаче, е твърде неизгодно икономически. Изразходваната енергия за трансмутиране на определен елемент е твърде голяма, което означава, че процесът е много скъп.

Как може да се осъществи трансмутация? Ядрото може да се облъчва с фотони, неутрони, леки и тежки заредени частици. Ефектът от облъчването с фотони е твърде слаб, а проникването на заредените частици в ядрото е затруднено от неговото силно кулоново поле. Така че, единствено възможен, енергетически най-изгоден вариант остава използването на неутрони. В ядрените реактори се натрупват големи количества от радиоактивните изотопи ^{99}Tc и ^{129}I . Първият има период на полуразпад 2×10^5 години, вторият 1.57×10^7 години. Тези числа показват колко дълго трябва да издържа на земетресения и други природни стихии едно хранилище на тези изотопи, ако искаме да се освободим от тях чрез този класически способ на предпазване. От друга старана, ако неутрон се залови от ^{129}I се получава:



т.е. по съвсем прост начин се освобождаваме от вредната в случая радиоактивност. Подобна реакция може да се извърши и с ^{99}Tc :



Изумително просто !! Но, да спестим емоциите. Огромните количества от йод и технеций които произвеждат реакторите, изискват много мощни (плътни) неутронни потоци за трансмутация. Оценките показват, че ефективност на процеса може да се постигне при неутронни потоци с плътност 10^{16} неутрони за секунда на квадратен сантиметър. Такива потоци от неутрони няма даже в самите реактори. На това място погледите се обръщат към моделите на ядрото. Има ли такъв процес, който моделите предсказват, чрез който може да се получи необходимото количество неутрони? Какво можем да научим например от слоестия модел? Ако високоенергетичен протон (с енергия около 1 GeV) удари тежко ядро (например олово) той избива

от ядрото (поради слоестата структура) неутрони или протони също с висока енергия. В дебела мишена новопоявилите се частици продължават този процес докато не излязат извън мишената или енергията им намалее значително. Това е обаче, само първата стъпка. Следващият интересен процес е свързан с ударените ядра, които вече са загубили по един нуклон. Тези дъщерни ядра са в силновъзбудено състояние или казано на научен жаргон са нагreti или термализирани. Тъй като енергията им на възбуждане е много висока започва т.н. охлаждане чрез изпаряване на неутрони. Количеството изпарени неутрони лесно се пресмята по формули на изпарителния модел на ядрото. Но, да не забравяме, че ядрото има слоеста структура. Охлаждайки се, то може да попадне в състояние съответстващо на някоя от възможните слоести структури (например гигантски резонанс). Влиянието на структурата е сложно. В зависимост от нейната природа броят на излъчените неутрони може да се увеличи или намалее. Този ефект може също да се оцени, например използвайки квазичастично-фононния модел на ядрото. Оказва се, че разполагаме с пълен теоретичен апарат позволяващ да се определи броят на излъчените неутрони. Моделните пресмятания предсказват между 13 и 16 излъчени неутрона за всеки паднал върху мишената протон. Направените измервания уточняват това число - на един протон се падат средно 15 излъчени неутрона. Това удивително съвпадение показва, че използваните модели са обхванали изцяло многообразието на процеса.

Но какво стана с трансмутацията? Възможна ли е тя? Разгледаният пример показва, че проблемът се премества. Получаването на плътни неутронни снопове е възможно, ако успеем евтино да получим плътни снопове високоенергетически протони. Някои последни разработки в областта на ускорителната техника показват, че и това е възможно. Широкомащабни програми в тази област се изпълняват в ЦЕРН, Лабораторията в Лос Аламос, Института "Курчатов ". Следователно трябва да сме оптимисти за бъдещето на екологичната ядрена енергетика.

Ядрената физика е една многопланова наука, боравеща с широк набор от методи. Може би се убедихме, че моделите на атомното ядро заемат централно място сред тези методи. Трябва да се отбележи, че широко се използват и други видове модели построени на различни от описаните принципи. Известни са геометрични, алгебрични и др. модели. Всеки от тях разкрива част от процесите, които протичат

когато много силновзаимодействащи частици са събрани в миниатюрен обем. Както казва една поговорка: тълпата се образува от много отделни групи. Така всеки нов модел ни приближава към по-прецизни представи за структурата на атомното ядро, а от там и към цялостна теория за описание на процесите ставащи в система съставена от много тела.

