

Физика на елементарните частици

Част II

Как се „ражда“ енергията, ядрени реакции. Какво знаем и какво не знаем за процесите реализиращи се в един реактор. Какви са алтернативните възможности за бъдещето на ядрената енергетика.

Въведение

Знаем , че елементарните частици се делят на две основни групи на адрони и лептони. Адроните са тежки частици, които участват в силно взаимодействие, докато лептоните са предимно леки частици, които участват главно в слабо взаимодействие. Елементарните частици се описват от своите квантови характеристики (квантови числа) и се подчиняват на различни статистики в зависимост от собствения им момент на импулса (спин). Като тези с цели спинове се наричат бозони и могат да имат едни и същи квантови числа (състояния) едновременно повече от една частица и фермиони това са частици с полуцели спинове, които пък се подчиняват на принципа на забраната на Паули и не могат да съществуват в едно и също квантово състояние по-едно и също време. Интерес за нас представляват фермионите, в чиято група попадат нуклеоните – протон и неутрон.

Протоните са положително заредени частици със заряд равен на единица и изградени от кварките (uud) два горни и един долен кварк , чийто сумарни заряди дават общия заряд на сформираната частица. В състава на ядрото протон може да се превърне в неутрон след като един от u кварките му се трансформира в d кварк.

Неутрона е частица със сумарен заряд равен на единица и е изградена от кварките (ddu) два долни кварка и един горе. Неутрона макар и да има сумарен заряд равен на нула, тъй като е изграден от по-малки частици вътрешното разпределение на зарядите показва, че всъщност неутрона е отрицателно зареден към повърхността си и положително зареден към центъра си , ако приемем, че има форма на сфера.

Силните ядрени взаимодействия възникват при разстояния съизмерими с размерите на протона и неутрона около 10^{-15}m и при такива разстояния те са сили на привличане, които са многократно по-големи от силите на Кулоново отблъскване, което доказва съществуването на атоми със повече от 90 протона в ядрото. За да може да се компенсират силите на кулоново отблъскване обема на ядрата трябва да нарасне, за сметка на това броя на неутроните достига 1,5 и 1,6 пъти броя на протоните в дадено ядро. Важно е да се отбележи, че тези сили не са централни и при разстояния по-малки от $0,6 \cdot 10^{-15}\text{m}$ са сили на отблъскване. Намаляват рязко с нарастване на разстоянието. В дадено ядро всеки нуклеон взаимодейства с нуклеоните около него, като ядрените сили на привличане се разпределят относително равномерно между частиците , като във външния слой на ядрото те са най-малки.

Процесите на в ядрата са изключително сложни и все още не са особено ясни. Теорията ни се гради на няколко опростяващи модела, като математическия модел се базира на полуемпирични зависимости. Теорията на модела се напасава със експериментални данни така, че да се получи сравнително точни методи за оценяване на дадени ядрени процеси.

Широко разпространен и общо приет модел е капковия модел на атома. За определяне на енергията на свързване на нуклеоните се прилага полуемпиричната формула на Бете-Вайцекер

1. Ядрени сили и взаимодействия:

Формула на Бете-Вайзцекер

$$B = a_{\text{об}} A - a_{\text{пов}} A^{2/3} - \frac{a_{\text{кул}} Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \frac{a_{\text{сим}} (N-Z)^2}{A} + \delta(Z, N), \text{MeV}$$

Обемна енергия – породена от силите на ядреното взаимодействие в среда, простираща се до безкрайност и съответства на средна енергия на свързване на нуклеон, породена от силно взаимодействие.

Пресмята се по следната зависимост: $E_{\text{об}} = a_{\text{об}} A, \text{MeV}$ където известно е, че обема е пропорционален на атомната маса $V \sim A$:

Обем на сфера: $V = \frac{4\pi R^3}{3}$. От капковия модел на ядрото, радиуса на несвиваема капка

се дава във следния вид $R = r_0 \sqrt[3]{A}$

За определянето на коефициента $a_{\text{об}}$ се следното допускане:

$$\begin{cases} e \rightarrow 0 & \text{пренебрегват се силите на Кулоново отблъскване} \\ N = Z & \text{пренебрегват се силите на симетрия} \\ B \rightarrow \infty & \text{пренебрегват се силите на повърхностно напрежение} \end{cases}$$

$$a_{\text{об}} = k_F r_0 = \sqrt[3]{\frac{9\pi}{8}} ; a_{\text{об}} \sim 16 \text{MeV}$$

Още това може да се нарече принос в енергия на свързване от обемните свойства на ядрото.

Енергия на повърхностно напрежение – отчита по-слабото привличане на разположените на повърхността нуклеони – връзка отново се прави с повърхностно напрежение при течности от което следва сферичната форма на капката при течностите.

Пресмята се по следната зависимост: $E_{\text{пов}} = a_{\text{пов}} A^{2/3}, \text{MeV}$

Енергията на повърхностното напрежение на капка течност се дава от следната зависимост $E = 4\pi R^2 \sigma, J$, където

$\sigma [J / \text{cm}^2]$ - е повърхностно напрежение (за ядрена материя $\sigma = 10^{14} J / \text{cm}^2$);

Тогава аналогично след заместване на радиуса ще получим

$$E_{\text{пов}} = 4\pi r_0^2 \sigma A^{2/3} = a_{\text{пов}} A^{2/3} ; a_{\text{пов}} \sim 17 \text{MeV}$$

Сили на Кулоново отблъскване – отчита силите на електростатично отблъскване на протоните в ядрото, определя се по следната зависимост:

$$E_{\text{кул}} = \frac{6}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \frac{1}{2} Z(Z-1) = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0 k} \frac{1}{A^{1/3}} Z(Z-1) = a_{\text{кул}} \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}, \text{MeV}$$

Където : $r_{0,k}$ - константа която отчита равномерно зарядово разпределение в ядрото, която може да не съвпада с r_0

$\frac{1}{2}Z(Z-1)$ -Брой двойки протони равномерно разпределени в ядрото

$$a_{\text{кул}} \sim 0,7 \text{ MeV}$$

Енергия на симетрия – тази енергия няма класически аналог, тъй като нуклеоните в ядрото приемат определени енергетично нива. В по тежките ядра има излишък на неутрони за да може добавените ядрени сили да компенсират силите на кулоново отблъскване, но енергията е квантувана и както е известно барионите са частици с полуцел спин и се подчиняват на принципа на Паули с което има забрана да заемат едни и същи енергетични нива, по ниските енергетични нива се заемат първо и неутроните в излишък ще заемат по-слабо свързани нива, което ще намали пълната енергия на свързване. Приема, че енергията на свързване е пропорционална на симетрията в ядрото.

$B \propto \frac{(N-Z)^2}{A}$ Специфичната енергия на свързване е $\varepsilon = \frac{B}{A}$ въвежда се величината $\zeta = \frac{N-Z}{A}$, която се явява мярка за отклонение от линията на стабилните ядра.

Решава се следния ред в точка 0 където $N=Z$:

$\varepsilon(\zeta) = \varepsilon(0) + \varepsilon'(0)\zeta + \frac{1}{2}\varepsilon''(0)\zeta^2 + \dots + \frac{1}{n}\varepsilon^n(0)\zeta^n$ от тук може да се види, че първата производна е 0, което означава, че функцията има максимум, приблизително се решава, като се пренебрегват всички членове след 2-та производна.

$$\varepsilon_{\text{max}} = \varepsilon(0) + \frac{1}{2}\varepsilon''(0)\zeta^2 = \varepsilon(0) + \frac{1}{2}\varepsilon''(0)\left(\frac{N-Z}{A}\right)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B_{\text{max}} = A\varepsilon_{\text{max}}$$

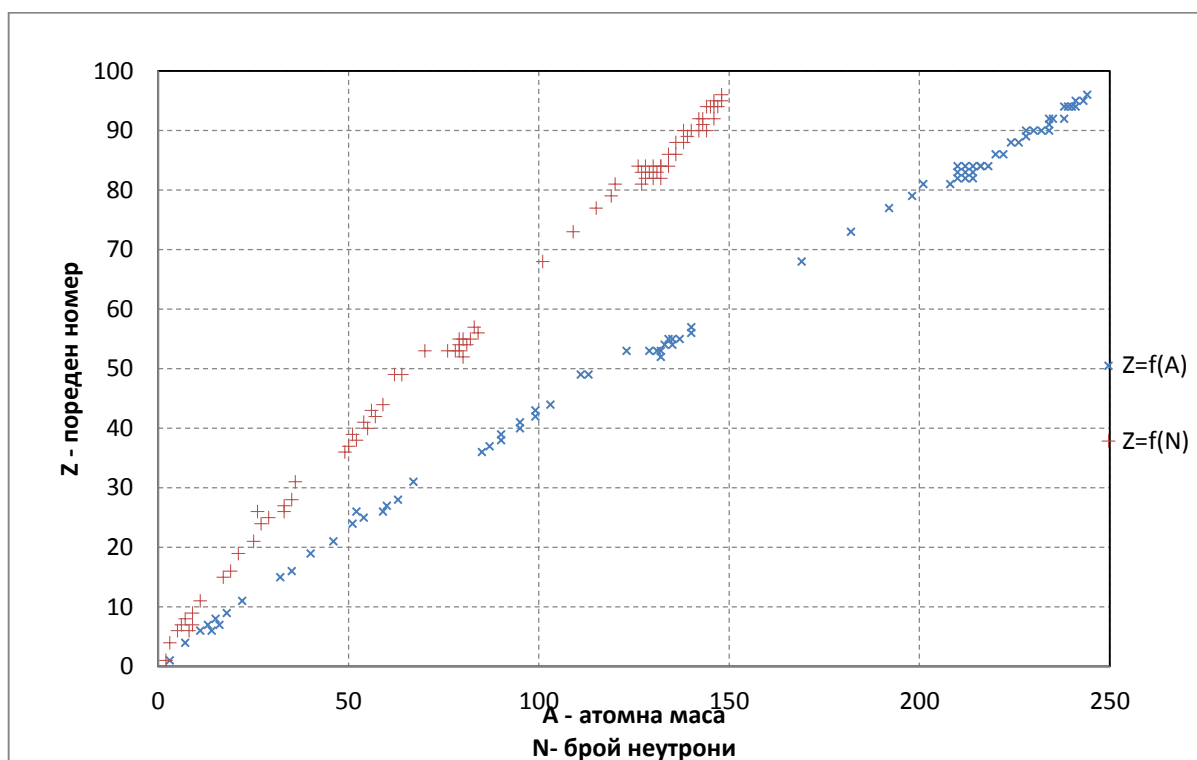
След замествания и преобразувания се достига до следното:

$$E_{\text{сим}} = a_{\text{сим}} \frac{(N-Z)^2}{A}, \text{ MeV}, \text{ където } a_{\text{сим}} \text{ е емпиричен коефициент. } a_{\text{сим}} \sim 25 \text{ MeV}$$

Енергия на сдвояването (ефект на четностите) – в ядрото нуклеоните от един и същи вид се групират по двойки с противоположно насочени моменти, тъй като ядрените сили зависят от спина, така групирането на нуклеоните може да доведе до по-силни и по-слаби ядрени взаимодействия като пример в природата има само 4 – ри стабилни четно-четни ядра, които имат малка маса и са по-силно свързани от останалите нечетно-четни ядра, тези елементи са : ${}^2_1\text{H}_1, {}^6_3\text{Li}_3, {}^{10}_5\text{B}_5, {}^{14}_7\text{N}_7$.

Z	N	Стабилни ядра
четни	четни	4
четни	нечетни	50
нечетни	четни	57
нечетни	нечетни	168

Графика на изменение на атомната маса и броя на неутроните във функция от поредния номер на известните радиоизотопи



Във формулата на Бете-Вайцекер се въвежда емпиричен член δ

$$\text{Като: } \delta = \begin{cases} +\Delta(A) & A, Z - \text{четни} \\ 0 & A - \text{нечетно} \\ -\Delta(A) & A, Z - \text{нечетно} \end{cases} \quad \text{където } \Delta(A) = \frac{12}{\sqrt{A}}, \text{ MeV}$$

Където всички, коефициенти $a_{\text{об}}$, $a_{\text{пов}}$, $a_{\text{кул}}$, $a_{\text{сим}}$ са експериментално получени.

Радиоактивен разпад това е способността на ядрата на нестабилни атоми да се разпадат спонтанно с определена вероятност на елементи от по-нисък ред отделяйки енергия под формата на електромагнитно лъчение или частица.

Елстер и Хайлер установяват, че броя на атомите на чист радионуклеид намаляват по

експоненциален закон. $\frac{dN}{dt} = -\lambda N \rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt$ интегрираме двете страни

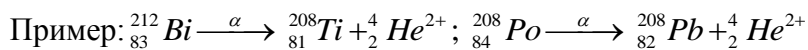
$$\int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t d\tau \Rightarrow \ln|N(t)| - \ln|N_0| = -\lambda t \rightarrow \ln\left|\frac{N(t)}{N_0}\right| = -\lambda t$$

след антилогаритмуване се получава следната зависимост: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

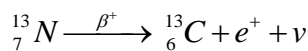
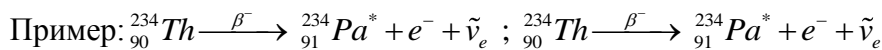
N_0 - брой на ядрата в началния момент. λ - константа на радиоактивен разпад

Видове радиоактивен разпад:

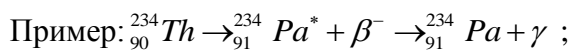
α - разпад - характеризира се с отделянето на хелиево ядро ${}^4_2\text{He}^{2+}$;



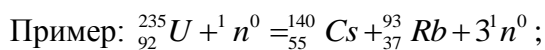
β^+, β^- - положителен и отрицателен бета разпад характеризира се с отделянето на двойка позитрон-неутрино или електрон -антинейтрино.



γ - когато ядрото е във възбудено състояние след като е протекъл ядрен захват или е ядро на радиоактивен елемент опитвайки се да достигне по-стабилно енергетично ниво ядрото излъчва електромагнитни лъчения от високочестотния спектър с много високи енергии.



n^0 - неутронен разпад при ядрена реакция на делене на ядрата е възможно изпускането с определена вероятност на неутрони (закъсняващи неутрони)



Период на полуразпад - времето за което даден елемент губи половината си маса в следствие на радиоактивен разпад.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t \Rightarrow -\ln(2) = -\lambda t \rightarrow t = \frac{\ln(2)}{\lambda} = T_{1/2}$$

Законите за разпад се базират на статистика и са статистически величини, и важат само за голям брой ядра.



Стабилност на атома – способността на даден елемент да запазва свойствата си и характеристиките си без изменение във времето.

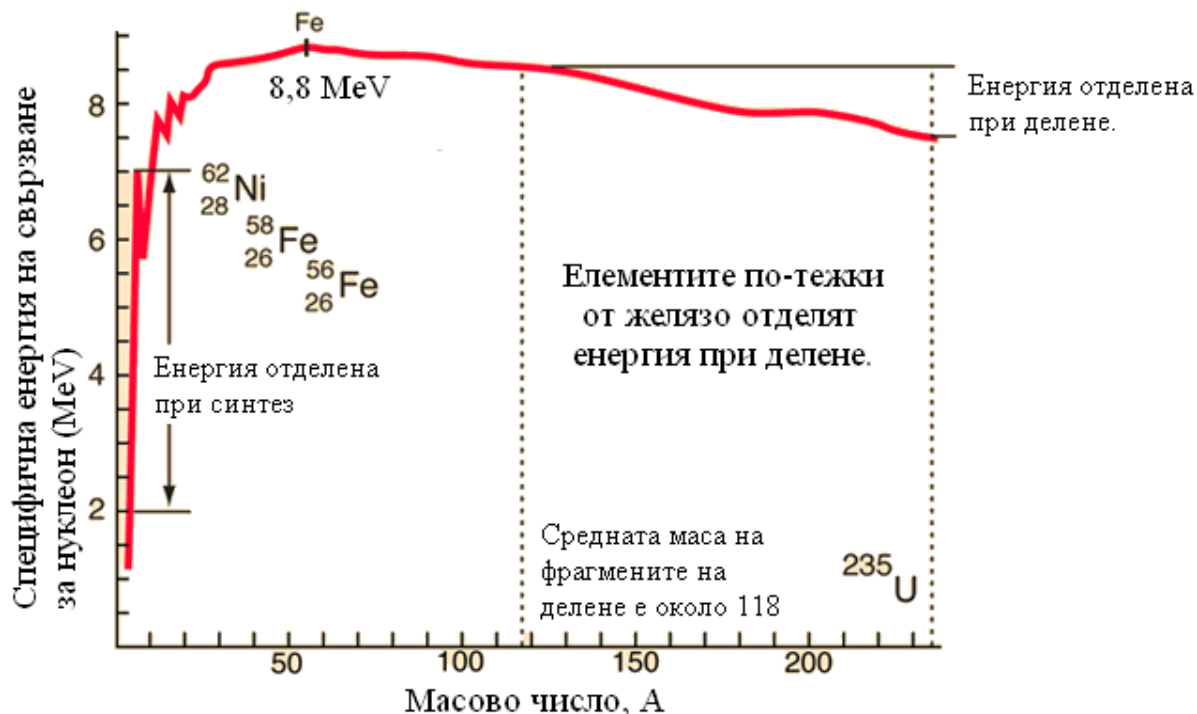
Стабилността на елементите силно зависи от вътрешната симетрия на елементите или от начина на групиране на нуклеоните в ядрото. Важна роля играе тук ефекта на четностите. Най-силни ядрени взаимодействия имат елементите, които имат четен брой неутрони и четен брой протони, но за сметка на това те са най-нестабилни. - Стабилно ядро е ядро, което няма радиоактивно излъчване.

Най-стабилните ядра са тези на нечетно-нечетните елементи между тях остават тези с четен брой протони и нечетен брой неутрони, които са по-нестабилни от тези с нечетен брой протони и четен брой неутрони.

По леките ядра често имат равен брой протони и неутрони, а по тежките ядра имат по голям брой неутрони с цел преодоляване на кулоновото отблъскване. Тъй като това са ядра със излишък от неутрони те са склонни на бета-отрицателен радиоактивен разпад. Тези с недостиг на неутрони пък са склонни към бета-положителен разпад

Устойчиво ядро може да бъде получено не от произволно количество нуклеони. Потенциалната енергия на свързване на нуклеоните приема строго определени стойности, които са характерни за точно определено ядро или ядрото може да бъде устойчиво в определени енергийни нива.

Специфичната енергия на свързване във функция от масовото число (A):



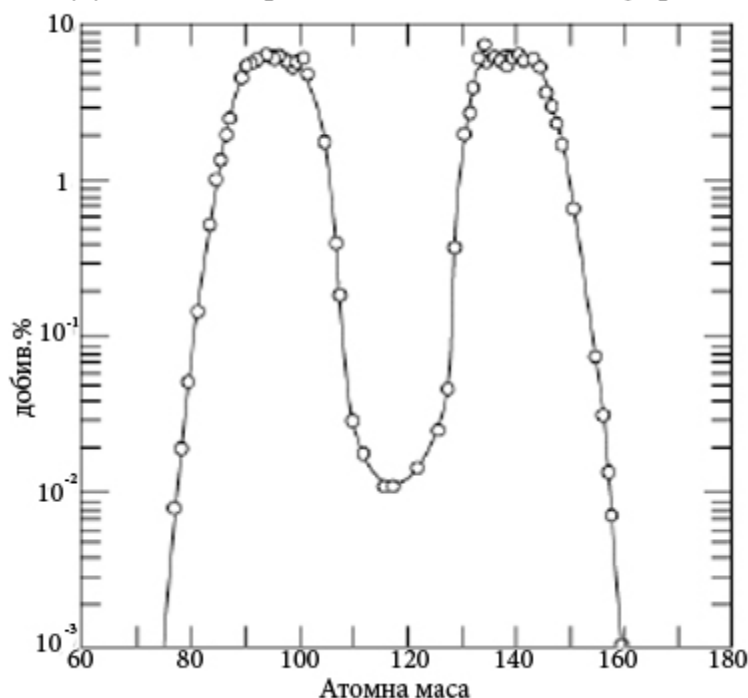
Специфичната енергия на свързване нараства и има максимум за ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ 8,8 MeV за ядрата след това се колебае около 8 MeV. От това може да се съди, че ядрените сили се насищат, тъй като с нарастване на нуклеоните в ядрото специфичната енергия остава да се колебае около тези стойности. Кое показва, че колкото повече расте броя на нуклеоните толкова по-малки ще са ядрените сили на взаимодействие между тях, поради разпределението им между с нарастване на обема ще нарасне и разстоянието между частиците, което води до заключението, че след определена атомна маса, ядрата стават нестабилни и ще се стремят да търсят по-стабилно енергетично ниво разпадайки се на по-леки ядра или отделяйки частици в следствие на радиоактивни лъчения.

Делене на ядрата – енергията получена от делене може да се представи във следния вид: $Q = B_1(A, Z) + B_2(A, Z) - B(A, Z), \text{MeV}$

- Симетрично делене – имаме когато $M_1(A_1, Z_1) = M_2(A_2, Z_2) = M(A/2, Z/2)$ - при деленето на даден елемент получава две еднакви ядра чиято сума на масите отговаря на масата на ядрото първоизточник. Така получената енергия ще бъде:

$$Q = 2B(A/2, Z/2) - B(A, Z) \approx [E_{\text{пов}}(A, Z) + E_{\text{кул}}(A, Z)] - 2[E_{\text{пов}}(A/2, Z/2) + E_{\text{кул}}(A/2, Z/2)]$$
 вероятността за симетрично делене е от порядъка на 0,01%
- Несиметрично делене – това е делене при което $M_1(A_1, Z_1) \neq M_2(A_2, Z_2)$ Във фрагментите на деленето се получават едно леко ядро и едно тежко ядро с маси в порядъка: $A_1 = 135 \pm 15u$ и $A_2 = 95 \pm 15u$ вероятност за получаване на продукти на делене във функция от тяхната атомна маса при делене на уран-235 се дава от следната графика:

Делене на Уран-235 с топлинни неутрони



Важна характеристика отговаряща за зарядовото разпределение в ядрото и играещ важна роля за описването на формата на ядрата, определящ взаимодействието на ядрата е електрическият квадруполен момент, който се дава от следната зависимост.

$eQ = \int \rho(\vec{r})(3z^2 - r^2)dV$ където $\rho(\vec{r})$ - плътност на заряда в определена точка в ядрото, като z се избира така, че Q да приема максимални стойности по абсолютна стойност. От където следва, че когато Q клони към 0 ядрото ще има сферично разпределение на заряда. От тук следва, че електрическият квадруполен момент представлява мярка за отклонение от несферичното разпределение на заряда в ядрото:

$\int \rho(\vec{r})x^2dV = \int \rho(\vec{r})y^2dV = \int \rho(\vec{r})z^2dV = \frac{1}{3} \int \rho(\vec{r})r^2dV$ квадруполния момент разделен на заряда се измерва в барнове.

Всичко това до тук дава приблизителната ни представа за това, какво горе-долу се случва в ядрото и в частност какви последствията при ядрена реакция.

2. Какво **НЕ** знаем и какви са ни перспективите в бъдеще.

- **Какво е теорията и какво ни дава науката:**

- Теорията е висшата форма на разбиране на природата описвайки законите пораждащи фактически измервания и експерименти. Наблюдавайки природата ние виждаме определени закономерности и можем да измерим дадени величини, но теорията е едно от най-силните оръжия с които разполага науката, тя ни дава възможността да предвиждаме, да очакваме определени събития, което ни позволява да наложим някаква форма на контрол върху тези събития предопределяйки тяхното развитие. Инженерът като създател на машините упражняващи контрол върху природните феномени впрягащи невидимите сили около нас, се нуждаят от силни теоретични сведения и високо познание и разбиране на природните закони. Науката водена от математиката и всички дялове на физиката описваща фактите и събитията трябва да дава една стабилна база, на която ще е възможно изграждането на по-ефективни и по-безопасни машини, които да улесняват всекидневния ни живот, които и да подсигурият дългосрочно бъдещето ни без да оказват драстично влияние върху околната среда и живота на планетата.
- Теорията ни се гради на базата на вече познати модели, които претърпяват частични изменения в зависимост от спецификата на даденото явление. Всичко в природата се подчинява на определени закономерности и следва модели на развитие, ние трябва да открием начина, при който ще можем да ги разберем до такава степен, че да можем да предвиждаме с точност тяхното реализиране.
- Теорията в ядрената физика се базира на опростени модели на вече познати физически процеси, които с някои мощни математически модели успяваме да впрегнем силите и енергиите генерирани в най-малките частици в природата. Но това не променя факта, че ние не сме сигурно и не знаем, какво се случва в ядрото, нямаме точна теория, при което се облягаме на полуемпирични зависимости, които ни дават приблизителна представа за дадени процеси. На помощ идва и теорията на вероятностите и статистиката, който ни помагат да предвиждаме с дадена точност бъдещите събития, но те внасят голяма доза неопределеност в процесите, което оказва влияние на технологията на процесите и необходимостта от презастраховане от към безопасност при експлоатация.

- **Някои основни проблеми пред които се изправя ядрената енергетика:**

- Неопределеността внесена от липса на точна теория и ясна представа за ядрените взаимодействия, която води до редица опростявания водещи до силното отклоняват от реалните събития в даден реактор.
- Управлението на процесите в реактора и потенциалната опасност от неизправност, което води до високите изисквания към безопасност.
- Генерирането на радиоактивни отпадъци и неспособността за тяхното пълно трансформиране и дезактивиране.
- Контролът базиран на случайност води до висока неопределеност при определянето на рисковете.
- Многократната трансформация на ядрената енергия до електрически и загубите от разсейването и в околната среда.
- Липсата на достатъчно експерименти и изследвания в областта

Ние **НЕ** знаем, какво се случва, наистина, в ядрата и поради сложната природа и взаимодействия между множество от величини в един реактор ни налага необходимостта от твърде много опростяващи допускания и на практика оценяваме косвено събитията. (Ние съдим за външния вид на човек наблюдавайки сянката му). В крайна сметка ние не управляваме нищо, създава се една илюзия за контрол. Ние не управляваме ядрената реакция, а само нейната интензивност. Всичко друго се базира на случайни взаимодействия и техните последствия.

От какво се нуждаем:

- ✓ **От нов подход и идеи свързани с нови теории, както и стабилен математически модел премахващ емпириката.**
- ✓ **От увеличаване на ядрените експерименти**

Ясната представа за процесите и пълния контрол върху ядрената реакция ще ни дадат:

- *Възможността от по безопасно и ефективно извличане на ядрената енергия.*
- *Възможност за пълната дезактивация на генерирания ядрен отпадък във вече съществуващите ядрени съоръжения.*
- *Извличането и генерирането на ценни елементи.*
- *Възможност за създаването на нови елементи.*
- *Стабилен в дългосрочен план източник на енергия*