

ДЕФЕКТОТ НА МАСАТА НА АТОМНОТО ЈАДРО И ОСЛОБОДУВАЊЕТО НА АТОМНАТА ЕНЕРГИЈА

Ордан Печијаре

Можноста да се определат со голема точност масите на атомните јадра на различните хемиски елементи, како и масите на нивните составни честици: протоните и неутроните, покажа дека масата на атомните јадра не е еднаква на збирот на масите на нивните составни честици во слободна состојба, т.е. кога тие се најдуваат секоја засебно надвор од атомното јадро.

Со обиди се утврди дека масата на било кое атомно јадро е секогаш помала од збирот на масите на составните честици во слободна состојба. Овој факт, до кој се дојде по експериментален пат, игра извонредно важна роља при добивањето на атомната енергија.

Разликата меѓу збирот на масите на составните честици на атомното јадро, кога тие се најдуваат во слободна состојба, и масата на самото атомно јадро, се вика *дефект на масата на атомното јадро*.

Овај дефект на масата на атомното јадро е сврзан со енергијата што се ослободува при негово формирање од протони и неутрони.

За да се отстрани од атомното јадро еден протон или еден неутрон, коишто под општо име се викаат *нуклеони*, без да тие после отстранувањето имаат кинетичка енергија, треба да се изврши некоја работа, т.е. треба да се потроши некоја енергија за совладување на јадрените сили што ја држат честицата во атомното јадро. Големината на оваа енергија, согласно на законот за запазување на енергијата, не зависи од тоа по каков начин честицата е отстранета од атомното јадро. Применувајќи го горното расудување на сите честици на атомното јадро, дојдуваме до заклучок, дека за раставување на атомното јадро на неговите составни честици, без да им се соопшти енергија, треба да се изврши определена работа односно да се потроши определена енергија или како уште се вели, да му се соопшти на атомното јадро извесна енергија. Обрато пак, кога атомното јадро се формира од протони и неутрони, се ослободува исто толку енергија колку што се троши за неговото раставување на составните честици, т.е. протони и неутрони, на кои не им е соопштена никаква кинетичка енергија.

Енергијата која треба да се потроши за да се совладаат силите што ги држат честиците на атомното јадро во заедница и да се оддалечат тие едни од други, без да им се соопшти кинетичка енергија, се вика *енерија на сврзувањето на атомното јадро*.

Оваа енергија е еднаква на онаа енергија која се ослободува која атомното јадро се формира од слободни протони и неутрони.

Енергијата пак на сврзувањето на една одделна честица во атомното јадро еднаква е на онаа енергија која треба да се потроши за да таа честица се отстрани од атомното јадро, без да ѝ се соопшти било каква кинетичка енергија.

Големата устојчивост на атомното јадро, благодарение на којашто атомите на хемиските елементи си ја запазуваат својата индивидуалност и при извонредно високи температури, какви што владеат на пример во усвитените атмосфери на разните ѕвезди, каде што спектроскопски се констатирани исти хемиски елементи како и на нашава земја, јасно зборува дека енергијата на сврзувањето на атомното јадро е извонредно голема. Ова пак од друга страна покажува, дека при формирањето на атомното јадро од протони и неутрони, ќе се ослободува грамадно количество енергија.

Атомните јадра на различните хемиски елементи се состоат од различен број протони и неутрони, групирани по различен начин во атомното јадро. Sprema тоа и енергијата на сврзувањето на атомното јадро е различна за атомни јадра на различни хемиски елементи.

Енергијата на сврзувањето на атомното јадро чини засебен вид енергија и се вика *јадрена енергија*. За оваа енергија широко се употребува терминот *атомна енергија*, кој секако помалце одговара, бидејќи таа се должи на промените што стануваат во самото атомно јадро.

И за оваа енергија, како и за другите видови енергија: кинетичка, потенцијална, топлинска, електрична итн. важи законот за запазување и претворување на енергијата од еден вид во друг.

Имајќи ја во предвид врската што постои меѓу масата и енергијата не е тешко да се најде енергијата на сврзувањето на атомното јадро, ако се знае дефектот на масата. Согласно на теоријата на релативитетот, секое изменување на масата на едно тело или систем тела, сврзано е со соодветно изменување на неговата енергија. Оваа врска меѓу масата и енергијата, како што е познато, е дадена со равенката:

$$E = mc^2.$$

Sprema тоа ако масата на атомното јадро е помала од збирот на масите на формираштите го протони и неутрони во слободна состојба, тогаш е јасно дека формирањето на атомните јадра ќе биде сврзано со ослободување на енергија.

За да се определи дефектот на масата на дадено атомно јадро, треба да се знае неговата маса како и целокупната маса на форми-

раштите го протони и неутрони кога тие се најдуваат во слободна состојба, т.е. надвор од атомното јадро. Овие маси можат да бидат определени со голема точност. Спрема тоа и дефектот на масата на атомното јадро, при сè што е многу мал, може да биде констатиран и определен. Оттука пак, спрема споменатата формула, може да се определи и енергијата на сврзувањето на атомното јадро.

Еве сега на неколку конкретни примери како се определува дефектот на масата на атомното јадро и енергијата на неговото сврзување.

Јадрото на потешкиот водороден изотоп, деутериумот, наречено *деуширон*, се состои од еден протон и еден неутрон. Масата на водородниот атом е $H_1^1 = 1,00813$ АЕМ (атомни единици за маса), а на неутронот $n_0^1 = 1,00895$ АЕМ. Збирот на масите на водородниот атом и неутронот е:

$$\begin{array}{r} H_1^1 = 1,00813 \text{ АЕМ} \\ n_0^1 = 1,00895 \text{ АЕМ} \\ \hline H_1^1 + n_0^1 = 2,01708 \text{ АЕМ} \end{array}$$

Масата пак на деутериумовиот атом $D_1^2 = 2,01473$ АЕМ. Спрема тоа атомот на деутериумот ќе има помала маса од збирот на масите на честичите од кои е составен. Дефектот на масата на неговото атомно јадро, т.е. деутронот ќе биде:

$$\Delta m = 2,01708 - 2,01473 = 0,00235 \text{ АЕМ.}$$

При пресметувањето на дефектот на масата на деутериумовото атомно јадро, т.е. деутронот, ние ја зедеме масата на водородниот атом, т.е. масата на атомното јадро, протонот, и масата на електронот, а не само масата на водородното атомно јадро — протонот. Но исто така ние ја зедеме масата на деутериумовиот атом, т.е. масата на неговото атомно јадро и електронот, а не само на неговото атомно јадро — деутронот. Затоа при пресметувањето, т.е. при одземањето, се добива ист дефект на масата на деутериумовото атомно јадро — деутронот, како и кога би се зела само масата на протонот односно деутронот, масата на електронот им е додадена на двете маси што се одземаат и затоа при одземањето отпаѓа.

Бидејќи една атомна единица за маса има $1,66035 \cdot 10^{-24}$ грама, тоа дефектот на масата на деутериумовото атомно јадро, т.е. деутронот, во грамови ќе биде:

$$\Delta m = 0,0039 \cdot 10^{-24} \text{ грама.}$$

За да ја определиме енергијата на сврзувањето на деутериумовото атомно јадро ќе се послужиме со познатата формула што ја дава врската меѓу масата и енергијата:

$$E = \Delta mc^2,$$

каде што е Δm во случајов дефектот на масата на деутериумовото атомно јадро, а c , како што е познато, брзината на светлината.

Ако дефектот на масата Δm го изразиме во грамови, а c во см/сек, тогаш енергијата на сврзувањето E на атомното јадро на деутериумот ќе биде:

$$E = 0,0039 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{-20} = 0,351 \cdot 10^{-4} \text{ ерга}^1).$$

Како пак $1 \text{ ерг} = 6,24 \cdot 10^{14} \text{ eV}$ (електрон волти), тоа енергијата на сврзувањето на деутериумовото атомно јадро изразена во електрон волти ќе биде:

$E = 0,0351 \cdot 10^{-4} \cdot 6,24 \cdot 10^{14} \text{ eV} = 0,2190 \cdot 10^7 \text{ eV} = 2,190 \text{ MeV}$ (милиони електрон волти) или $8,39 \cdot 10^{-14}$ грам калории, бидејќи $1 \text{ MeV} = 3,83 \cdot 10^{-14}$ грам калории.

Образувањето на деутериумовото атомно јадро е следено со емитување на гама фотон, кој има и маса и енергија. Неговата маса е $0,00235 \text{ АЕМ}$, а неговата енергија $2,190 \text{ MeV}$. На овој начин при образувањето на атомното јадро на деутериумот од еден протон и еден неутрон, еден дел од масата на протонот и неутронот преминува во маса на испуштениот гама фотон и соодветно на тоа еден дел од нивната енергија преминува во енергија на гама фотонот.

Ќе напоменеме дека енергијата на сврзувањето на деутериумовото атомно јадро може да се најде и со мерење на честотата на зрачењето што го следи неговото образување, т.е. со мерење на честотата на испуштениот гама фотон. Во овој случај енергијата на иззрчениот гама фотон односно енергијата на сврзувањето на деутериумовото атомно јадро ќе биде дадена со формулата:

$$E = h\nu,$$

каде што е h Планковата константа, а ν честотата на гама фотонот. И на овој начин најдената енергија, како и масата што ѝ одговара, се совпаднаваат со предодно најдените вредности.

За брзо преминување од едни единици кон други, како на пример од MeV кон масени единици, ергови, калории, грамови итн., што е честа потреба во јадрената физика, ја даваме таблицата I, во која се дадени потребните коефициенти за преминување од едни единици кон други.

Дефектот на масата и енергијата на сврзувањето на хелиумовото атомно јадро ќе го најдеме по сличен начин како и кај деутериумовото атомно јадро.

Атомното јадро на хелиумовиот атом се состои од два протони и два неутрони. И овде ние ќе ја земиме при пресметувањето масата на водородниот атом, т.е. масата на атомното јадро (прото-

¹⁾ Брзината на светлината е земена округло $3 \cdot 10^{10}$ см/сек.

нот) заедно со масата на електронот. Во конкретниов случај масата на двете водородни атомни јадара и двата електрони. Но исто така ние ќе ја земиме наместо масата на хелиумовото атомно јадро, масата на хелиумовиот атом, т.е. масата на неговото атомно јадро и на двата електрони. При пресметувањето и овде масите на електроните ќе отпаднат.

ТАБЛИЦА I

	MeV (милион електрон -волти)	AEM (атомна единица за маса)	ерг	г (грам))	кГ-м (килогр. -метар)	г. кал. (грам-ка- лорија)
1 MeV =	1	$1,07390 \times 10^{-3}$	$1,602 \times 10^{-6}$	$1,782 \times 10^{-27}$	$1,634 \times 10^{-14}$	$3,827 \times 10^{-14}$
1 AEM =	$9,3172 \times 10^2$	1	$1,492 \times 10^{-3}$	$1,660 \times 10^{-24}$	$1,521 \times 10^{-11}$	$3,565 \times 10^{-11}$
1 ерг =	$6,24 \times 10^5$	$6,70 \times 10^2$	1	$1,11276 \times 10^{-21}$	$1,01972 \times 10^{-8}$	$2,3892 \times 10^{-8}$
1 г =	$5,61 \times 10^{26}$	$6,02 \times 10^{23}$	$8,9864 \times 10^{20}$	1	$0,91651 \times 10^{13}$	$2,1474 \times 10^{13}$
1 кГ-м =	$6,12 \times 10^{13}$	$6,57 \times 10^{10}$	$0,98067 \times 10^8$	$1,09112 \times 10^{-13}$	1	2,3430
1 г. кал. =	$2,612 \times 10^{13}$	$2,804 \times 10^{10}$	$4,1855 \times 10^7$	$4,6576 \times 10^{-14}$	0,42680	1

Масата на двата водородни атоми и на двата неутрони ќе биде:

$$2H_1^1 = 2.1,00813 = 2,01626 \text{ AEM}$$

$$2n_0^1 = 2.1,00895 = 2,01790 \text{ AEM}$$

$$2H_1^1 + 2n_0^1 = 4,03416 \text{ AEM}$$

Масата на хелиумовиот атом е: $He_2^4 = 4,00389 \text{ AEM}$. Спрема тоа дефектот на масата на хелиумовото атомно јадро ќе биде:

$$\Delta m = 4,03416 - 4,00389 = 0,03027 \text{ AEM.}$$

Имајќи во предвод дека на 1 AEM ѝ одговара енергија од $9,317 \cdot 10^2 \text{ MeV}$, спрема таблицата I, тогаш енергијата на сврзувањето на атомното јадро на хелиумот ќе биде:

$$E = 0,03027 \cdot 9,317 \cdot 10^2 \approx 28 \text{ MeV.}$$

Дефектот на масата на хелиумовото атомно јадро, како и на било кое друго атомно јадро, може да се изрази не само во атомни

единици за маса, туку и во грамови. За таа цел треба масите на протоните, неутроните и хелиумовото атомно јадро да се изразат во грамкви.

Масата на протонот е: $1,67248 \cdot 10^{-24}$ г.

Масата на неутронот е: $1,6749 \cdot 10^{-24}$ г., а на хелиумовото атомно јадро: $6,64422 \cdot 10^{-24}$ г.

Одовдека масата на двата протони и на двата неутрони ќе биде:

$$2p_1^1 = 2 \cdot 1,67248 \cdot 10^{-24} = 3,34496 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

$$2n_0^1 = 2 \cdot 1,6749 \cdot 10^{-24} = 3,3498 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

$$2p_1^1 + 2n_0^1 = 6,69476 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Спрема тоа дефектот на масата на хелиумовото атомно јадро изразен во грамови ќе биде:

$\Delta m = 6,69476 \cdot 10^{-24} - 6,64422 \cdot 10^{-24} = 0,05054 \cdot 10^{-24}$ г., а неговата енергија на сврзувањето:

$E = \Delta mc^2 = 0,05054 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20} = 4,5486 \cdot 10^{-5}$ ерга, или имајќи во предвид дека $1 \text{ epi} = 6,24 \cdot 10^5 \text{ MeV}$, добиваме:

$$E = 4,5486 \cdot 10^{-5} \cdot 6,24 \cdot 10^5 \approx 28 \text{ MeV.}$$

Значи дефектот на масата на хелиумовото атомно јадро е $0,03027 \text{ AEM}$, а енергијата на неговото сврзување околу 28 MeV .

Ова ни покажува, дека при формирањето на хелиумовото атомно јадро од два протони и два неутрони масата се намалува за $0,03027 \text{ AEM}$ и при тоа се ослободува околу 28 MeV енергија.

Оваа маса и енергија што ја губат протоните и неутроните, образувајќи хелиумово атомно јадро, *преминува во маса и енергија на други честички односно шела*. Значи, ни масата ни енергијата при формирањето на атомните јадра не се губат, туку само преминуваат во маса и енергија на други честички односно шела.

Ослободената енергија при образувањето на едно атомно јадро не е голема. Но ако се пресмета енергијата што би се добила при образувањето на еден грам-атом атомни јадра, т.е. при образувањето на Авогадров број атомни јадра ($6,02 \cdot 10^{23}$), тогаш се добива грамадно количество енергија. Така на пример целокупната енергија што се ослободува при образувањето на Авогадров број хелиумови атомни јадра, т.е. еден грам-атом хелиумови атомни јадра, што е еднакво на околу 4 грама хелиум, ќе биде:

$$28 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 169 \cdot 10^{23} \text{ MeV или}$$

$$(169 \cdot 10^{23}) : (6,24 \cdot 10^5) \approx 27 \cdot 10^{18} \text{ ерга или}$$

$$27 \cdot 10^{18} \cdot 2,3892 \cdot 10^{-9} \approx 64,5 \cdot 10^{10} \text{ грам калории}$$

$$\text{или приближно } 64,5 \cdot 10^7 \text{ кило калории.}$$

Пресметана пак на еден грам хелиумови атомни јадра, што се добива кога горната цифра се подели со 4,003, колку што е приближно масата на хелиумовото атомно јадро, ослободената енергија ќе биде околу

$$16,11 \cdot 10^7 \text{ кило калории.}$$

Значи кога се формира еден грам хелиумови атомни јадра од слободни протони и неутрони, се ослободува енергија околу 161,1 милиони кило калории. Оваа енергија пак е достаточна да загрее 1611 тона вода од 1 до 100°C. За да пак истото количество вода се загрее за истиот број степени, ќе треба 20138 килограми најквалитетен камен-кумур, т.е. со калоричност од 8000 к. кал/кг. Спрема тоа при формирањето на еден грам хелиумови атомни јадра од слободни протони и неутрони се ослободува околу 20 милионипати повеќе енергија отколку при изгорувањето на 1 грам најквалитетен камен-кумур.

Обратно пак, за да се растават сите хелиумови атомни јадра чија што маса е еден грам, на слободни протони и неутрони, потребно е да се вложи исто толку енергија.

По сличен начин како што се пресметува дефектот на масата односно енергијата на сврзувањето на деутериумовото и хелиумовото атомно јадро, може да се пресмета и дефектот на масата односно енергијата на сврзувањето и на другите атомни јадра.

Ако полната енергија на сврзувањето E на атомното јадро се подели со бројот честици A во атомното јадро, т.е. со масениот број, ќе се добие *средната енергија E/A на сврзувањето* на една честица во даденото атомно јадро. Така на пример средната енергија на сврзувањето на една честица во хелиумовото атомно јадро, спрема изнесените податоци, ќе биде:

$$\frac{E}{A} = \frac{28}{4} = 7 \text{ MeV.}$$

Дефектот на масата, а во врска со тоа и енергијата на сврзувањето, за разни атомни јадра се различни.

Во таблицата II се дадени примери за полната енергија на сврзувањето E на разни атомни јадра, како и средната енергија на сврзувањето E/A за поодделни честици, нуклеони, на соодветните атомни јадра.

Како што се гледа од приложената таблица, полната енергија на сврзувањето на атомното јадро расте со растењето на бројот честици во атомното јадро. Средната енергија пак на сврзувањето на една честица во атомното јадро покажува отпрвин извесни периодски промени, достигнувајќи извесни максимуми кај He_2^4 , C_6^{12} , и O_8^{16} .

ТАБЛИЦА II

Атомно јадро	E (MeV)	E/A (MeV)	Атомно јадро	E (MeV)	E/A (MeV)
n_0^1	0	0	B_5^{11}	75,71	6,88
H_1^1	0	0	C_6^{12}	91,66	7,64
D (H_1^2)	2,18	1,09	C_6^{13}	96,54	7,43
T (H_1^3)	8,33	2,78	N_7^{14}	104,10	7,44
He_2^3	7,60	2,53	N_7^{15}	114,85	7,66
He_2^4	28,38	7,03	O_8^{16}	126,96	7,94
Li_3^6	31,81	5,30	Ne_{10}^{20}	159,85	7,99
Li_3^7	38,96	5,57	$Ar_{18}^{40} - Sn_{50}^{120}$	—	$\approx 8,6$
Be_4^8	57,80	6,42	U_{92}^{238}	1780	7,5
B_5^{10}	64,29	6,43			

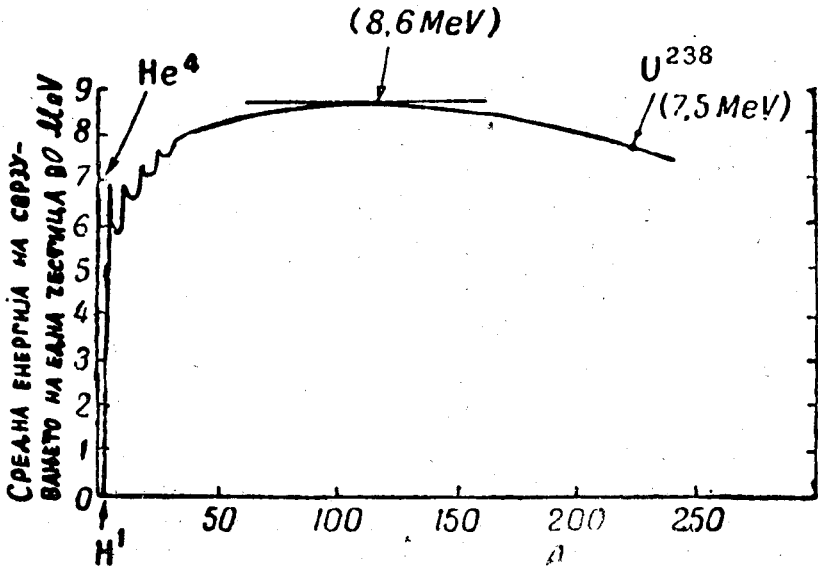
Почнувајќи од Ar_{18}^{40} па се до Sn_{50}^{120} , средната енергија на сврзувањето на една честица во атомното јадро приближно е иста и е околу $8,6 MeV$. Одејќи пак од оваа област на атомните јадра кон потешките атомни јадра, средната енергија на сврзувањето на една честица во атомното јадро постепено намалива, така да за атомното јадро на U_{92}^{238} е $7,5 MeV$.

Овој факт што средната енергија на сврзувањето E/A на една честица кај атомните јадра со среден масен број A е за околу $1 MeV$ поголема отколку за тешкото атомно јадро на U_{92}^{238} , игра вонредно важна ролја при ослободувањето на јадрената енергија односно атомната енергија, што се постигнува при расцепувањето на урановите атомни јадра на два приближно еднакви дела.

Ако на апсцисната оска на еден правоаголен координатен систем се пренесат масените броеви на стабилните атомни јадра, а на ординатната оска средната енергија на сврзувањето, на една честица во атомното јадро за стабилните атомни јадра, тогаш ќе се добие еден дијаграм претставен на сликата 1.

Како што се гледа од сликата, скоро сите вредности за средната енергија на сврзувањето на една честица во атомното јадро, лежат на една крива линија или се најдуваат во нејзината непосредна близина. Поголеми отстапувања прават вредностите за: He_2^4 , C_6^{12} и O_8^{16} . Од самата крива се гледа, дека почнувајќи од најлесното атомно јадро, средната енергија на сврзувањето на една честица во атомното јадро, отпрвн брзо расте. Растењето после успорува и се достигнува еден широк максимум околу вредноста $8,6 MeV$, што одговара на атомните јадра со масени броеви од 40 до 120.

Од овој максимум пак средната енергија на сврзувањето на една честица во атомното јадро бавно опаѓа одејќи кон потешките атомни јадра.



Сл. 1. Средната енергија на сврзување на еден нуклеон кај стабилните атоми јадра претставена во зависност од месениот број.

Самиот обод на кривата линија ни покажува, дека вистинската енергија на сврзувањето на секоја честица во атомното јадро не е иста за секоја честица. До максимумот на кривата линија секој протон односно неутрон што се додава на атомното јадро е појакно сврзан од предодниот и затоа средната енергија на сврзувањето расте. Од максимумот на кривата линија секој протон односно неутрон, што се додава на атомното јадро, е послабо сврзан од предодниот и затоа средната енергија на сврзувањето на една честица опаѓа.

Од сето ова што го кажавме досега излегува, дека најјакно се сврзани во атомните јадра протоните и неутроните на атомните јадра со масени броеви од 40 до 120. Ова пак од своја страна значи, дека при нивното формирање на било кој начин, се добива најголем дефект на масата и се ослободува најголема енергија.

Спрема тоа за најголемо добивање на јадрена енергија, позната обично под името атомна енергија, треба да се иде кон синтетицизирање на атомни јадра со масени броеви од 40 до 120 и полесните атомни јадра или пак кон добивање на атомни јадра со масен број од 40 до 120 со расцепување на тежок атомни јадра.

Но поголема или помала енергија би се добила, како што покажува кривата, не само при формирање на атомни јадра со масени броеви

од 40 до 120 од њолесни или њолешки аџомни јадра, њуку и њолеш кои се формираат њолешки аџомни јадра од њолесни, чија средна енерџија на сврзувањето на една честџица во аџомното јадро леџи на качува-шџиото дел на криваџа, на џримеџ при добџвањето на хелиумови аџомни јадра од водородни или џак кои се добџваат њолесни аџомни јадра од њолешки, чија шџо средна енерџија на сврзувањето на една честџица леџи во џадашџиото дел на криваџа. Во остварувањето на сџоменатџаџа можност се состоџи и целиот џроблем за ослободување на јадрената енерџија џ. е. аџомнатџа енерџија.

И двата споменати начини за добџвање на атомна енерџија денеска се остварени. Освен тоа, првиот начин се остварува и на усвитените небесни тела сам по себе и е извор на нивната енерџија и висока температура, а вториот начин го имаме при природната и вештачка радиоактивност.

Сџабилностџа на едно аџомно јадро дошолку е њолеша доколку е њолеша и среднатџа енерџија на сврзувањето на една честџица во неџо. Спрема тоа атомните јадра со масени броеви од 40 до 120 се нај-стабилни. Атомните јадра со помали масеви броеви од 40, како и оние со поголеми од 120, се помалце стабилни. Одовдека пак извлекуваме заклучок, дека џреминувањето на еден њомалце сџабилен хемиски елемент во друџ џостабилен е сврзано со ослободување на аџомна енерџија.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Шпольский, *Атомная физика*, том II, 1951.
2. К. Н. Елизаров, *Основы учения о строении атома*, 1953.
3. S. Glasstone, *Sourcebook on atomic energy*, 1950.
4. R. Stephenson, *Introduction to nuclear engineering*, 1954.