

Jaderné reaktory a elektrárny

Mgr. Ondřej Jašek, Ph.D., 1.10.2015

Literatura

- <http://physics.muni.cz/~blazkova/dp/index.htm>
- <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>
- <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/>
- Janča – Atomová fyzika
- Halliday, Resnick, Walker: Fyzika - Část 5 - Moderní fyzika – kapitoly 43-45

Obsah přednášky – obecně/celkově

- Složení atomu, elementární částice, struktura a vlastnosti jádra atomu
- Jaderné reakce a jejich vlastnosti
- Konstrukce jaderného reaktoru a řízení jaderné reakce v reaktoru
- Materiály jaderného reaktoru, kritické stavy a životní cyklus reaktoru a paliva
- Vliv ionizačního záření a jeho měření (LNT, proliferace, neutrina)
- Budoucí koncepty jaderných reaktorů (Gen IV, SMR, thorium) a fúze (alternativní koncepty – aneutronic atd.)
- Výzkumné reaktory, přednáška odborníka z praxe

Energetika v ČR a role jaderné energie

13. Vývoj instalovaného výkonu v ES ČR a rozdělení do jednotlivých krajů v ČR k 31. 12. 2014 [MW]

2014

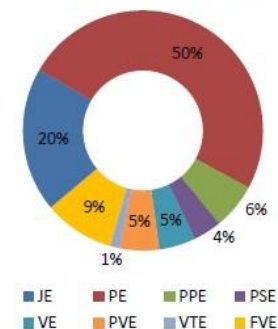
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Celkem ČR	17 412,0	17 507,1	17 561,0	17 724,2	18 325,8	20 072,9	20 250,0	20 519,5	21 079,2	21 920,3
Jaderné (JE)	3 760,0	3 760,0	3 760,0	3 760,0	3 830,0	3 900,0	3 970,0	4 040,0	4 290,0	4 290,0
Parní (PE)	10 664,0	10 690,7	10 648,1	10 685,2	10 720,1	10 769,0	10 787,5	10 644,1	10 819,5	10 836,7
Paroplynové (PPE)				569,7	560,7	590,7	590,7	520,7	518,0	1 363,0
Plynové a spalovací (PSE)	800,0	837,7	860,9	327,9	374,2	433,7	510,8	750,1	820,1	833,3
Vodní (VE)	1 019,5	1 028,5	1 029,0	1 045,3	1 036,5	1 056,1	1 054,6	1 069,2	1 082,7	1 080,4
Přečerpávací (PVE)	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 171,5
Větrné (VTE)	21,9	43,5	113,1	150,0	193,2	217,8	218,9	263,0	270,0	278,1
Fotovoltaické (FVE)	0,1	0,2	3,4	39,5	464,6	1 959,1	1 971,0	2 086,0	2 132,4	2 067,4

zdroj dat: předchozí roční zprávy, výkaz ERÚ-1, OTE, a.s.

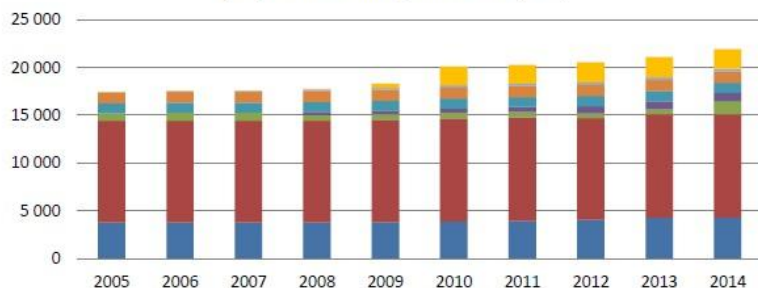
	JE	PE	PPE	PSE	VE	PVE	VTE	FVE	Celkem
Celkem ČR	4 290,0	10 836,7	1 363,0	833,3	1 080,4	1 171,5	278,1	2 067,4	21 920,3
Jihočeský	2 250,0	205,3	0,0	44,8	155,8	0,0	0,0	241,2	2 897,1
Jihomoravský	0,0	294,3	118,0	61,0	33,6	0,0	8,4	445,9	961,2
Karlovarský	0,0	549,3	400,0	13,6	7,5	0,0	52,1	13,0	1 035,5
Královéhradecký	0,0	199,6	0,0	52,1	29,3	0,0	8,0	91,0	380,0
Liberecký	0,0	9,8	0,0	27,6	25,1	0,0	24,0	107,7	194,2
Moravskoslezský	0,0	1 709,4	0,0	78,7	16,8	0,0	21,8	60,4	1 887,0
Olomoucký	0,0	10,2	0,0	94,9	12,0	650,0	43,8	110,4	921,3
Pardubický	0,0	1 276,5	0,0	50,2	28,7	0,0	15,2	94,7	1 465,2
Plzeňský	0,0	244,7	0,0	62,6	20,0	1,5	0,8	209,2	538,9
Praha	0,0	148,1	0,0	17,7	10,4	0,0	0,0	22,7	198,9
Středočeský	0,0	1 840,5	0,0	186,7	641,3	45,0	6,0	245,2	2 964,8
Ústecký	0,0	4 239,0	845,0	40,8	76,4	0,0	86,8	176,1	5 464,2
Vysočina	2 040,0	21,3	0,0	75,6	16,3	475,0	10,9	90,6	2 729,6
Zlínský	0,0	88,8	0,0	27,1	7,0	0,0	0,2	159,4	282,5

zdroj dat: výkaz ERÚ-1, OTE, a.s.

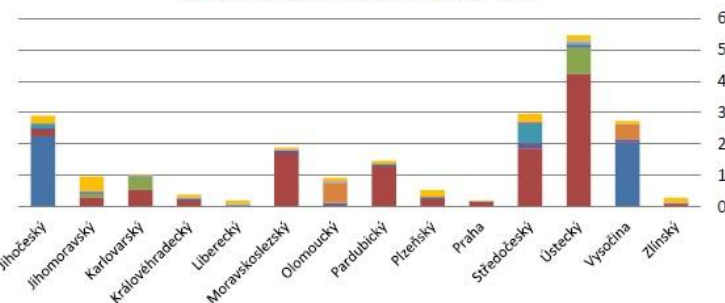
Podíl instalovaného výkonu v ES ČR - 2014



Vývoj instalovaného výkonu v ES ČR (MW)



Instalovaný výkon v krajích ČR (GW) - 2014



Energetika v ČR a role jaderné energie

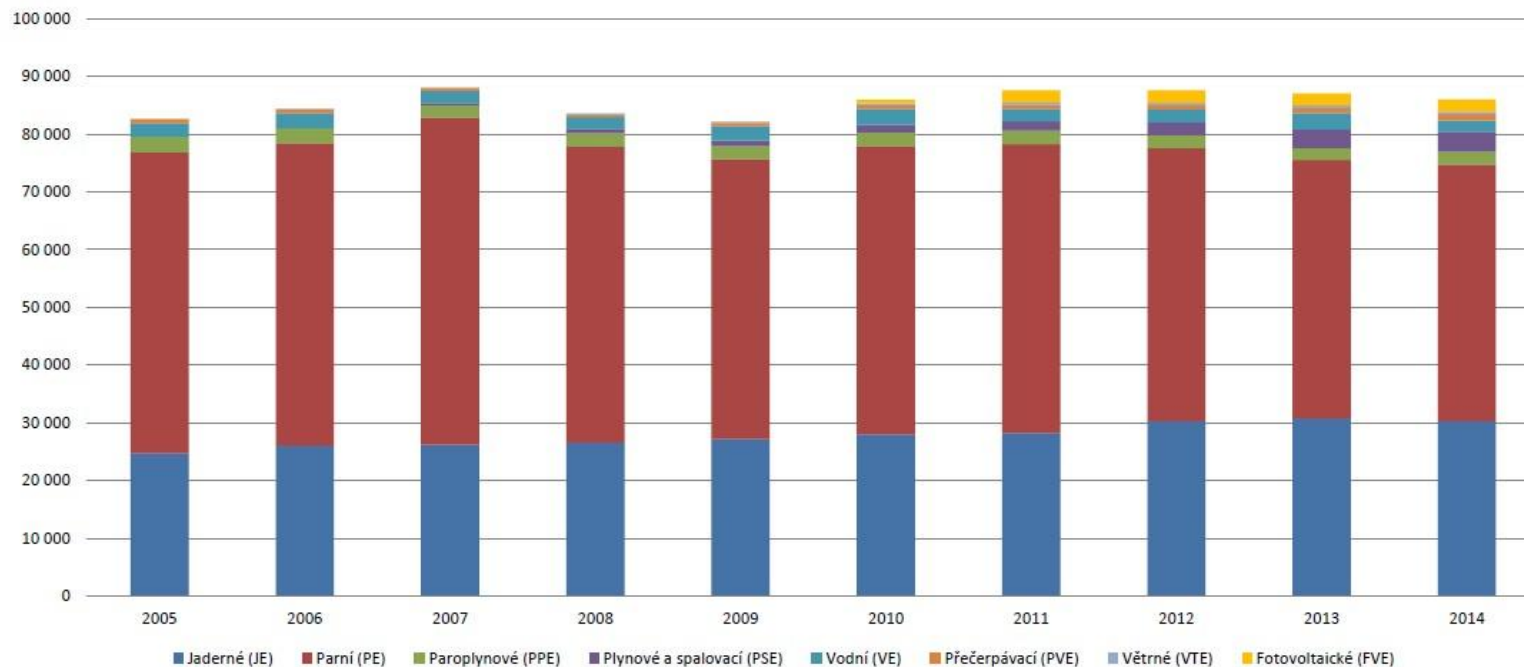
4.1 Vývoj výroby elektřiny brutto [GWh]

2014

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Výroba elektřiny brutto	82 578,6	84 360,9	88 023,8	83 516,4	82 250,0	85 900,1	87 560,6	87 573,7	87 064,9	86 003,4
Jaderné (JE)	24 727,6	26 046,5	26 172,1	26 551,0	27 207,8	27 988,2	28 282,6	30 324,2	30 745,3	30 324,9
Parní (PE)	52 137,2	52 395,4	56 728,2	51 218,8	48 457,4	49 979,7	49 973,0	47 261,0	44 737,0	44 419,3
Paroplynové (PPE)	2 665,4	2 612,1	2 097,8	2 431,7	2 250,9	2 349,6	2 344,4	2 200,4	2 092,8	2 204,7
Plynové a spalovací (PSE)			375,1	681,0	974,3	1 250,8	1 610,7	2 234,7	3 179,6	3 494,4
Vodní (VE)	2 380,0	2 550,6	2 089,6	2 024,3	2 429,6	2 789,4	2 134,1	2 231,5	2 856,4	1 909,2
Přečerpávací (PVE)	647,0	706,7	434,1	352,0	553,1	591,2	700,9	731,4	905,3	1 051,5
Větrné (VTE)	21,3	49,4	125,1	244,7	288,1	335,5	396,8	417,3	478,3	476,5
Fotovoltaické (FVE)	0,1	0,2	1,8	12,9	88,8	615,7	2 118,0	2 173,1	2 070,2	2 122,9

zdroj dat: předchozí roční zprávy, výkaz ERÚ-1, OTE, a.s.

Vývoj výroby elektřiny brutto (GWh)



Energetika v ČR a role jaderné energie

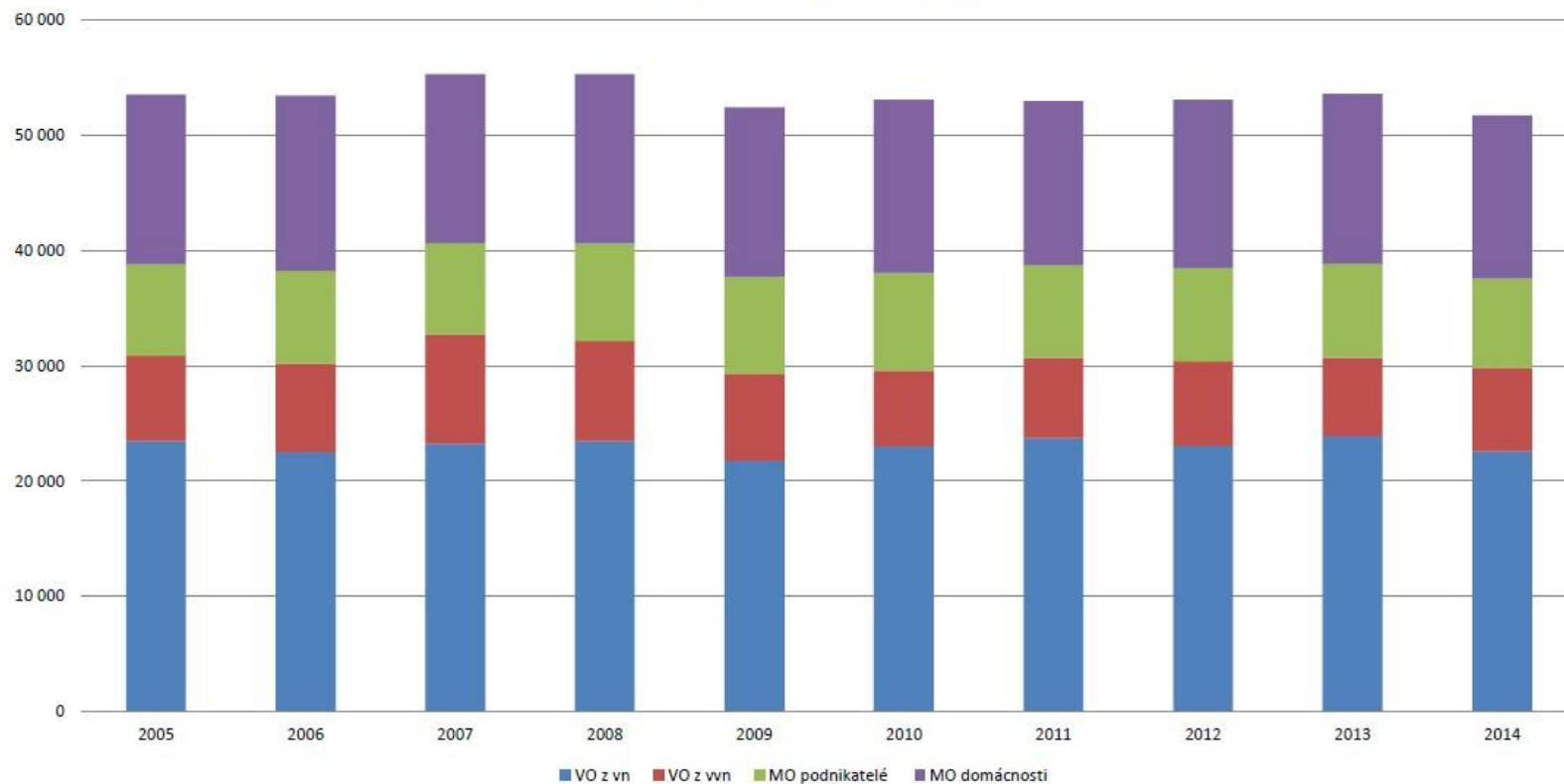
4.3 Vývoj spotřeby elektřiny VO a MO [GWh]

2014

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Celkem	53 514,0	53 435,0	55 305,9	55 320,5	52 409,7	53 070,1	52 961,1	53 081,9	53 575,0	51 711,8
VO z vn	23 468,0	22 512,0	23 225,2	23 469,9	21 737,0	23 013,2	23 724,3	23 057,1	23 896,0	22 587,5
VO z vvn	7 428,0	7 663,0	9 517,2	8 677,3	7 595,4	6 551,2	6 985,9	7 343,6	6 791,0	7 266,1
MO podnikatelé	7 899,0	8 062,0	7 917,7	8 470,4	8 390,1	8 478,2	8 050,5	8 100,6	8 172,0	7 733,7
MO domácnosti	14 719,0	15 198,0	14 645,8	14 702,9	14 687,2	15 027,5	14 200,3	14 580,7	14 716,0	14 124,6

zdroj dat: předchozí roční zprávy, výkaz ERU-2

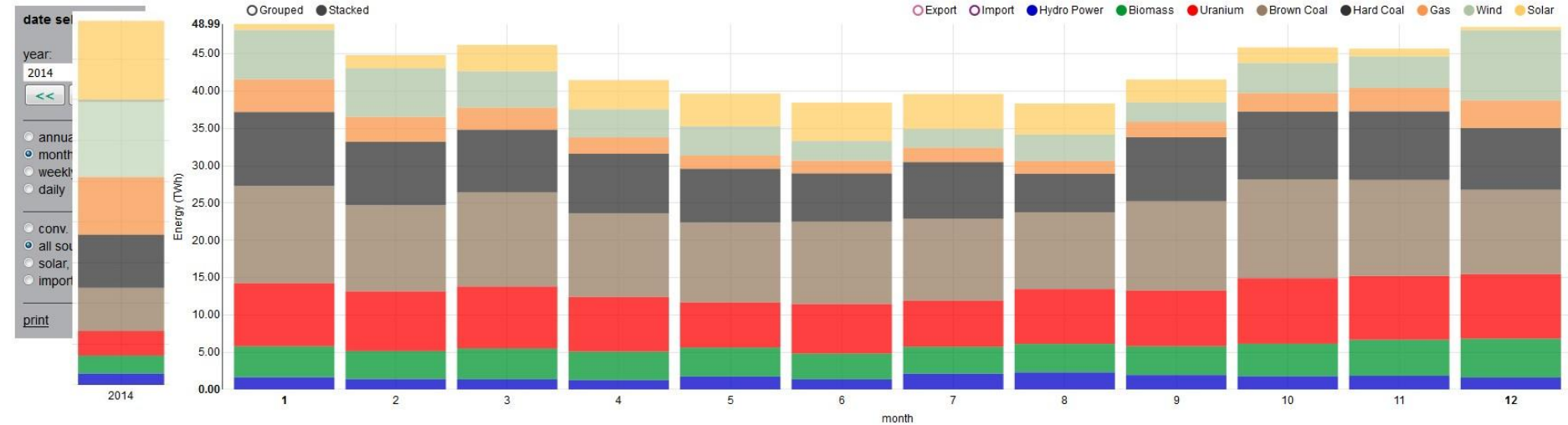
Vývoj spotřeby elektřiny VO a MO (GWh)



Energetika v ČR a role jaderné energie

Monthly electricity generation in Germany in 2014

usage tips



Last update: 12 Mar 2015 22:09

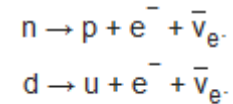
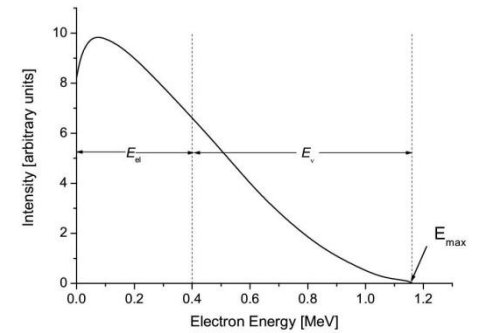
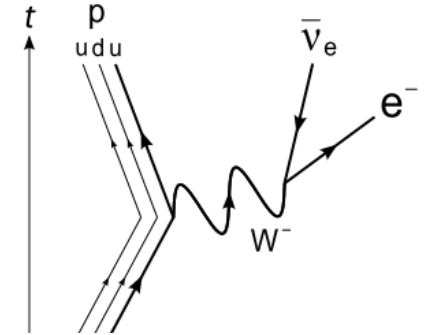
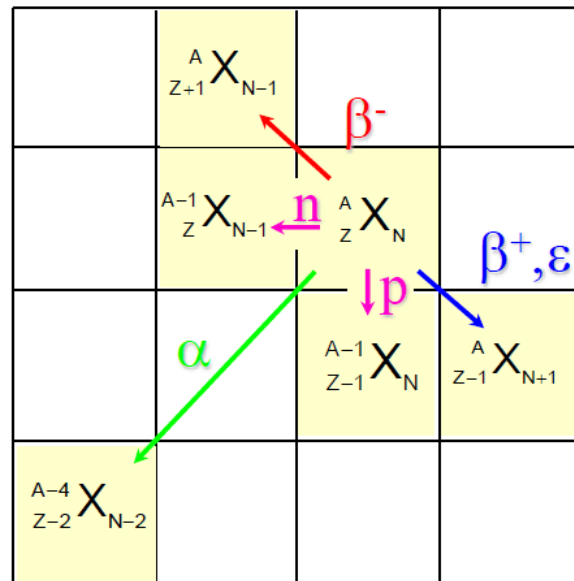
<https://www.energy-charts.de/power.htm>

Vazby v jádře atomu

- Silná interakce -> u nukleonů v jádře se efektivně projevuje jako jaderná síla
- Vlastnosti silné interakce – SU(3), barva-gluon, asymptotic freedom
- Výměna mezonů mezi nukleony
- Radioaktivní rozpad – alfa, beta+, beta-, gama, p,n,K-záchyt

Different types of radioactivity

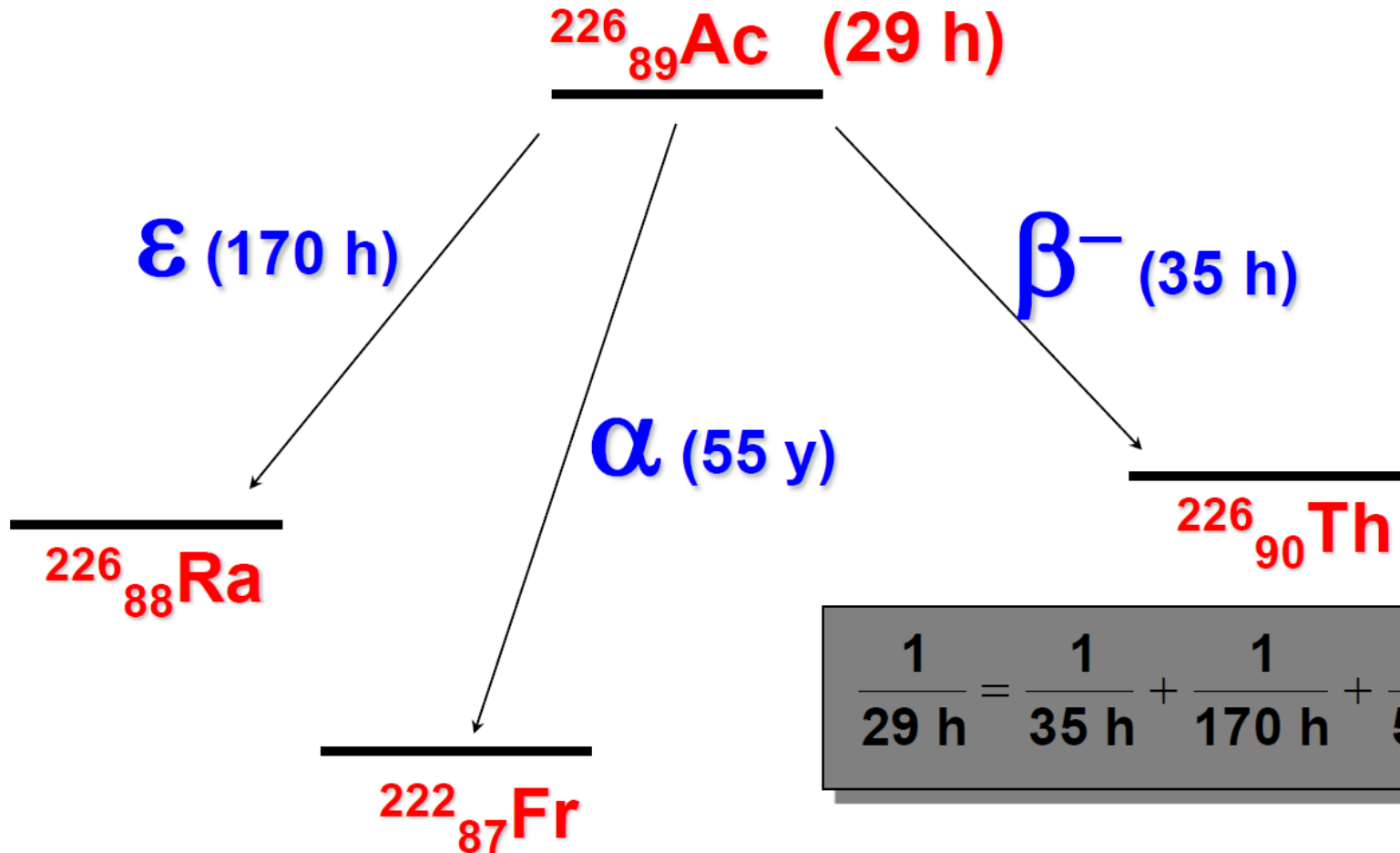
Protons



Cabibbo–Kobayashi–Maskawa matrix mixing mezi u-d ~ 0.97

Neutrons

Total versus partial life times



$$\frac{1}{29 \text{ h}} = \frac{1}{35 \text{ h}} + \frac{1}{170 \text{ h}} + \frac{1}{55 \text{ y}}$$

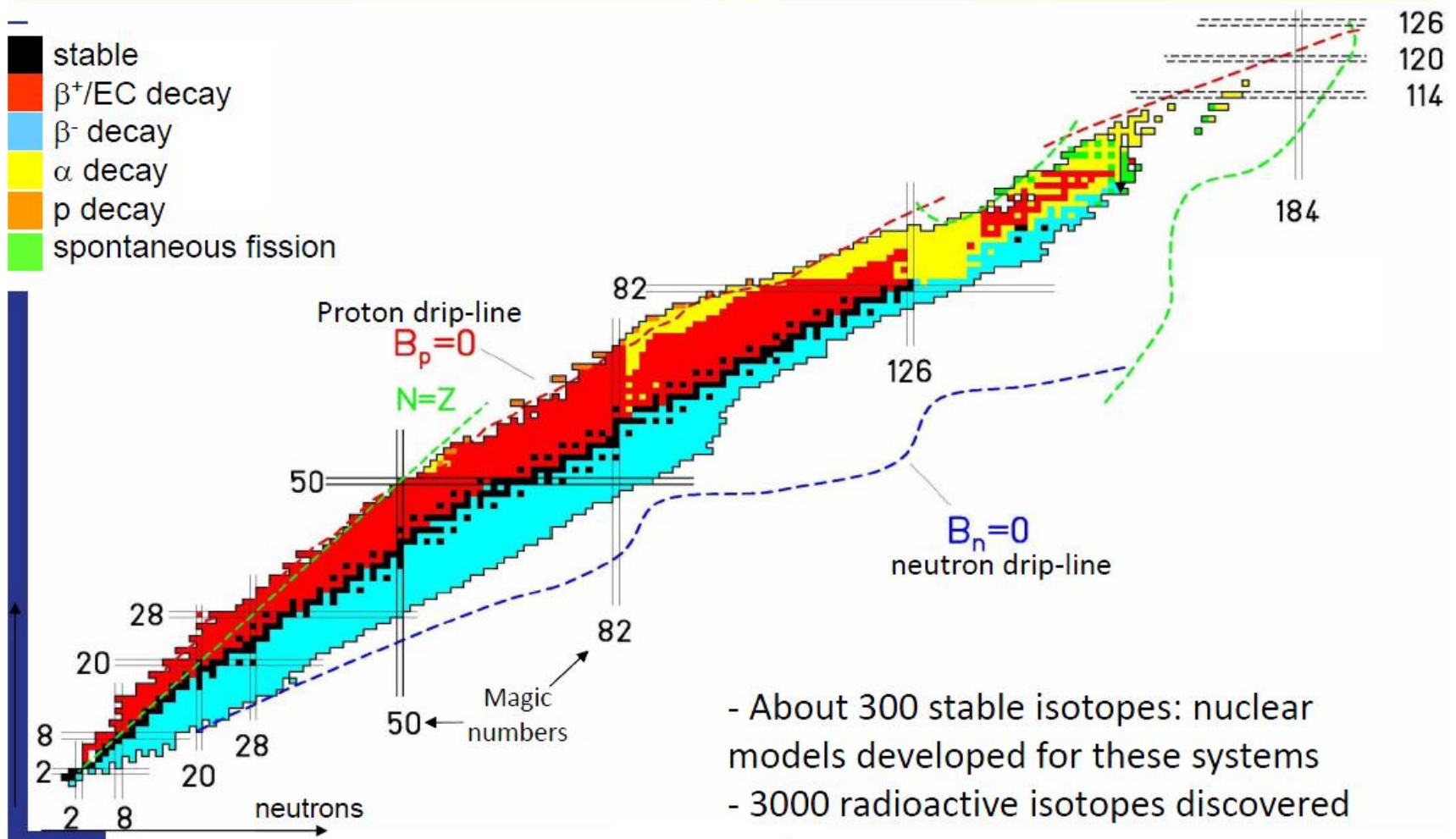
Vlastnosti jaderných sil

- Jsou krátko dosahové 10^{-15} m, na malých vzdálenostech odpudivé na větších přitažlivé
- $U(r) = -g e^{-\alpha r}/r$
- Jsou nasycené – nukleony interagují jen z určitým počtem sousedních nukleonů
- Nezávislé na typu nukleonu p,n
- Spinově závislé – rozdílné pro paralelní a antiparalelní spiny mezi nukleony
- Mají tenzorový charakter – závisí na úhlu mezi spinem a spojnici dvou nukleonů

Vlastnosti jader atomů

- Spin podle nukleonů
- Magnetický moment jader jako důsledek nenulového spinu, $\mu = g\mu_j J$
- $\mu_j = eh/4\pi m_p c$, g jaderný g-faktor
- Magnetický dipolový moment se projeví rozštěpením energetických hladin v jádře
- Elektrický multipolový moment – dipolový moment je většinou nulový nebo velmi malý, kvadrupolový moment může být velký podle tvaru jádra $Q = 25Z(c^2 - a^2)$ hlavně pro velký počet nukleonů $A > 225$, parametr deformace $\delta = (c - a)/R$

Nuclear landscape

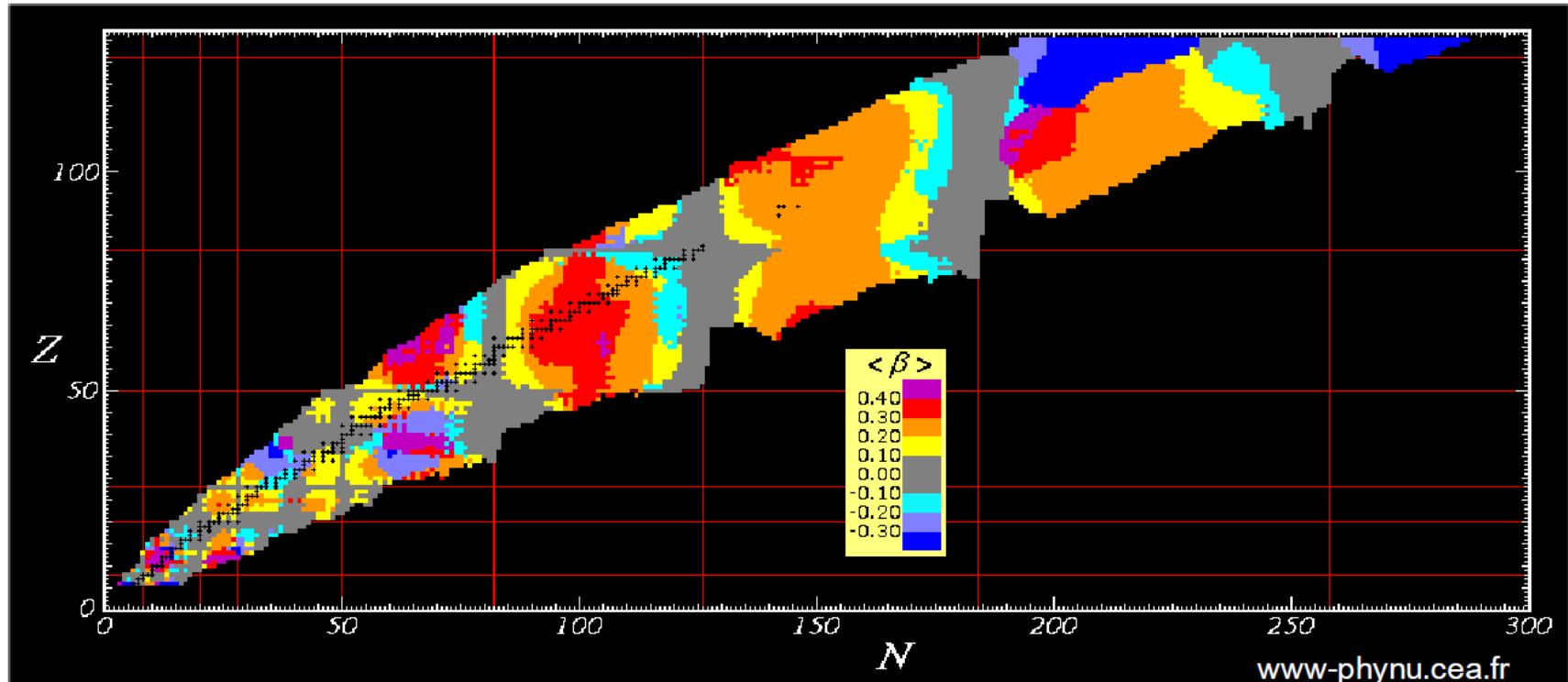


- About 300 stable isotopes: nuclear models developed for these systems
- 3000 radioactive isotopes discovered up to now



features of the nucleus : shape

Ground-state nuclear deformation predicted with the Hartree-Fock-Bogoliubov approach with the Gogny force



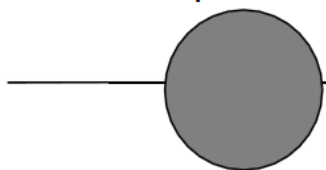
Nuclei are predicted to be either:

spherical

prolate

or

oblate



Vazebná energie atomového jádra na jeden nukleon

- $E_V(Z,A) = (Zm_p + Nm_n - m_x)c^2$

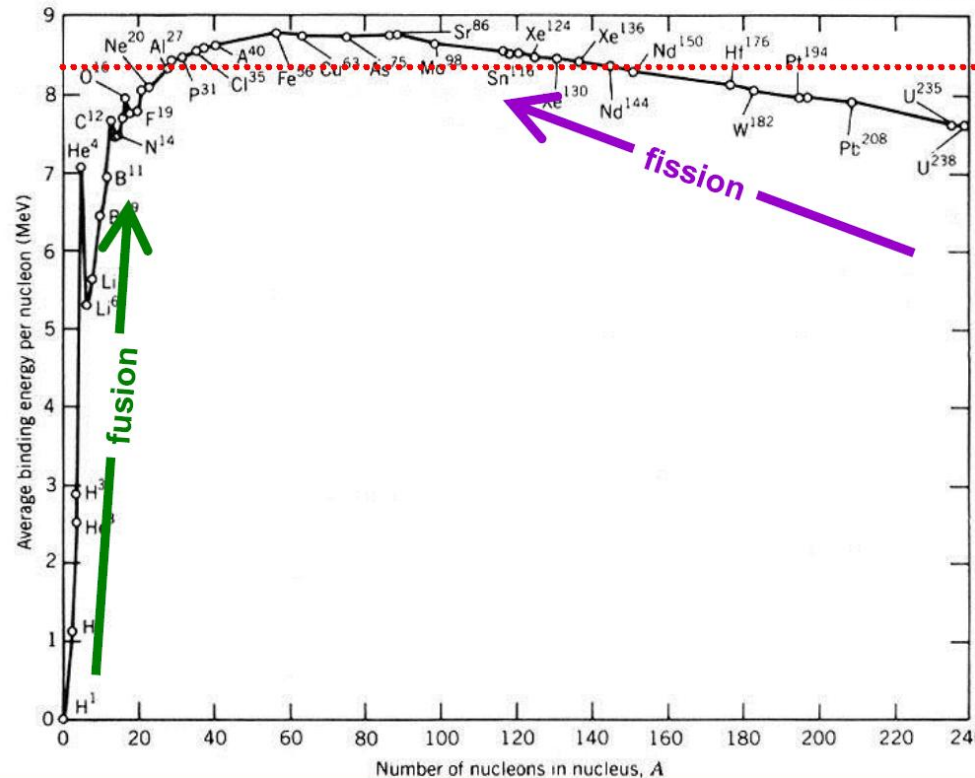


features of the nucleus : binding energy



energie atomique • energies atomiques

Binding energy per nucleon:
 $B(A,Z)/A \approx 8 \text{ MeV}$

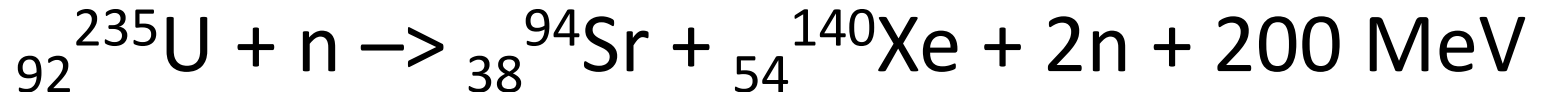


Vazebná energie atomového jádra

- Máme tedy dvě možnosti
- Fúze, slučování jader jako např.



nebo štěpení těžkých jader



V porovnání s klasickým spalováním

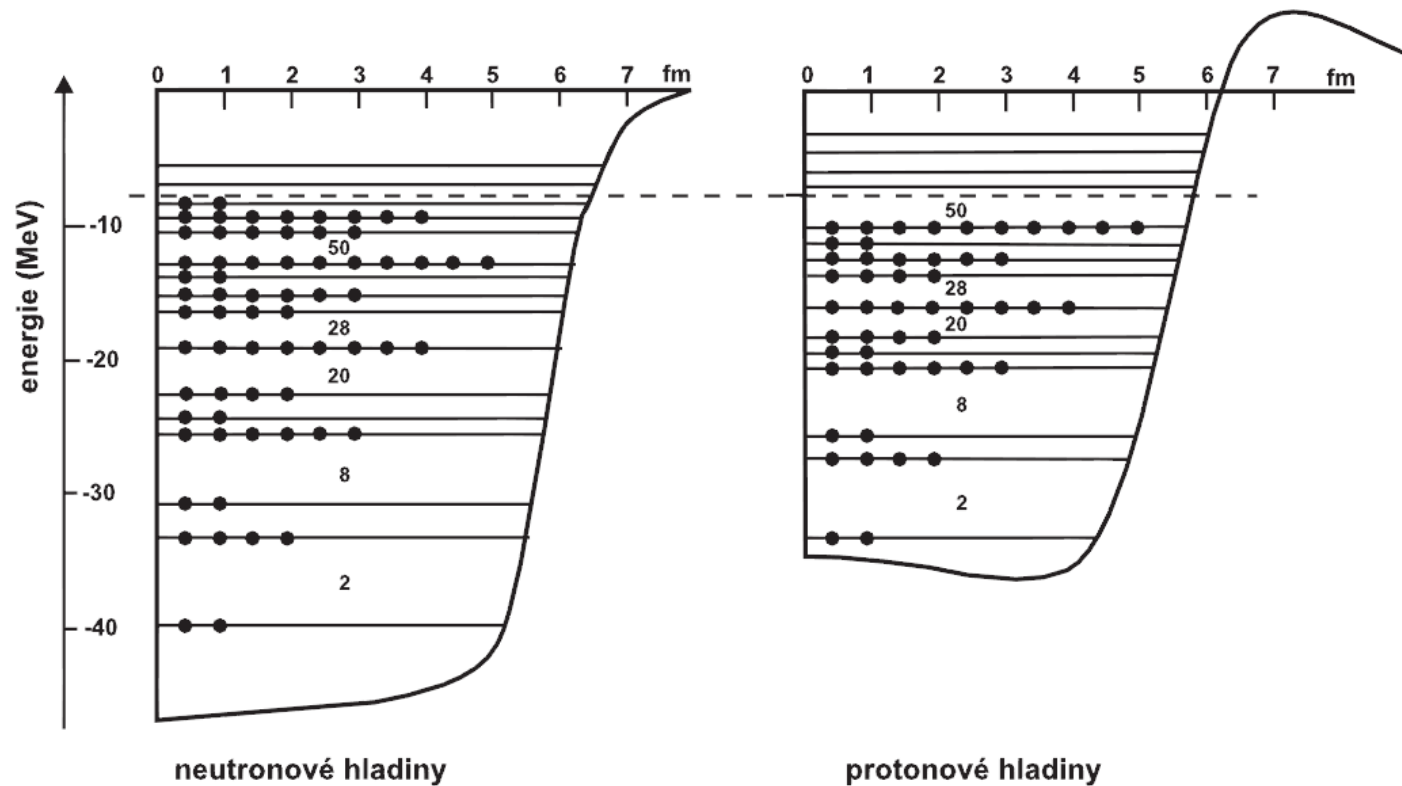


Modely atomového jádra

- Kapkový model – kapka nestlačitelné kapaliny tvořené protony a neutrony s průměrnými hodnotami energie apod. Lze určit dobře rovnovážné stavy a popsat štěpení.
- Slupkový model – model popisuje stav jádra pomocí jednotlivých energetických hladin a pomocí vazby mezi momentem hybnosti nukleonu a spinem nukleonu. Energetické rozdíly v rámci slupek jsou mnohem menší než mezi slupkami. Umožňuje objasnit stavy s tzv. magickými čísly tj. počtem protonů nebo neutronů s čísly (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126), které jsou mimořádně stabilní. Tento model umožňuje věrněji zachytit vlastnosti jader.

Slupkový model jádra

Energiové hladiny v jádře $^{116}_{50}\text{Sn}$



Jaderné reakce

účinný průřez σ

má rozměr plochy, jednotky jsou m^2 , resp. $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$

čím větší je účinný průřez, tím větší je pravděpodobnost dané reakce

dále zavádíme celkový účinný průřez

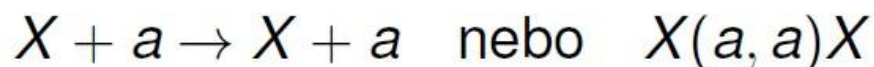
$$\sigma_t = \sum \sigma_i$$

a pravděpodobnost i -tého druhu srážky je

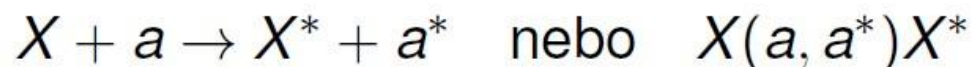
$$P = \frac{\sigma_i}{\sigma_t}$$

Jaderné reakce

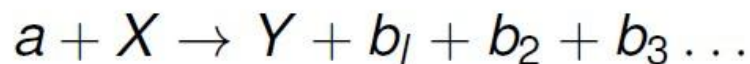
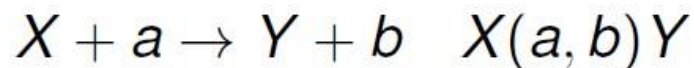
- pružný rozptyl



- nepružný rozptyl



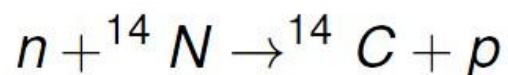
- prostá reakce



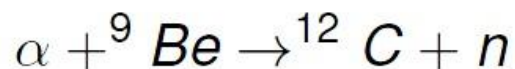
Jaderné reakce

Příklady

- v zemské atmosféře díky kosmickému záření (převážně protony) probíhají jaderné reakce, např.

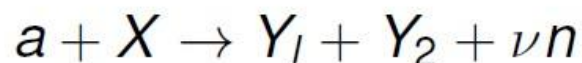


- zdroj neutronů

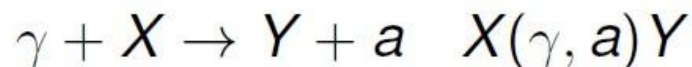


Jaderné reakce

- štěpení jader



- tříštění jader
- fotojaderná reakce



- γ – záchyt

