

Úvodem

Milé řešitelky, milí řešitelé,

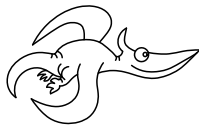
tak jsme se opět dočkali a máme tu tentokrát půlkulatý ročník FYKOSu! Ano, je to již po třicáté páté, co začátkem prázdnin zveřejňujeme první sérii plnou neobvyklých a zajímavých příkladů nejen z oblasti fyziky. Mimo tradičního soustředění pro nejlepší řešitele FYKOS také pořádá akce jako je DSEF (Den S Experimentální Fyzikou), Fyziklání Online či Fyziklání v Praze. O všech těchto akcích budeme včas informovat na webu fykos.cz nebo na našich sociálních sítích - @fykosak & @FYKOS.

Na co se můžete těšit v první sérii? Začneme s dopravou. Vyřešíme komplikovanou situaci s pravidlem dvou sekund, zazávodníme si s auty a nakonec budeme brzdit na ledu. V rámci experimentální úlohy budeme zkoumat závislost varu vody na objemu.

Během září proběhne také podzimní soustředění pro nejlepší řešitele II. pololetí 34. ročníku. Jen prozradíme, že se máte opravdu na co těšit!

Nakonec bychom vám chtěli popřát co nejlepší start do nového školního roku, pevné zdraví a budeme se těšit na nějaké z našich akcí na viděnou!

Organizátoři



Zadání I. série

Termín uploadu: 12. 10. 2021 23.59

Termín odeslání: 11. 10. 2021

Úloha I.1 ... auta

3 body

Dvě auta vyjedou ve stejný čas ze stejného bodu rychlostmi $v_1 = 100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a $v_2 = 60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Je možné, aby se auta od sebe vzdalovala některými z následujících rychlostí? Pokud ano, příslušné situace načrtněte.

$$v_a = 160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}, \quad v_b = 40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1},$$

$$v_c = 30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}, \quad v_d = 90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$$

Úloha I.2 ... pravidlo dvou sekund

3 body

Pravidlo dvou sekund je pomůcka pro řidiče, která tvrdí, že bezpečný rozestup dvou vozidel jsou minimálně dvě sekundy. Mějme dopravní uzel, ve kterém n_1 -proudá silnice přechází v n_2 -proudou. Maximální povolená rychlost v prvním úseku je v_1 . Jaká může být nejmenší možná maximální povolená rychlost v_2 ve druhém úseku, aby se v něm netvořily zácpy a všichni měli možnost dodržet pravidlo dvou sekund? Průměrná délka jednoho auta je l a předpokládáme, že svoji rychlost dokáže měnit skokově.

Úloha I.3 ... zastavit na bruslích

5 bodů

Na bruslích se dá brzdít metodou „parallel slide“, při které se nože obou bruslí natočí kolmo na směr pohybu, což výrazně zvýší tření s podložkou. Aby bruslař nespádl, musí se naklonit o úhel $\varphi = 35^\circ$ od svislého směru. Předpokládejte, že člověk vážící $m = 70$ kg je i s bruslemi vysoký $H = 1,8$ m, přičemž těžiště má ve výšce $h = 1,1$ m nad ledem. Spočítejte, na jak dlouhé dráze zastaví z počáteční rychlosti $v_0 = 15$ km·h⁻¹.

Úloha I.4 ... klesá ke dnu

7 bodů

Kapsle válcového tvaru (Puddle Jumper – Stargate) s průměrem $d = 4$ m, délkou $l = 10$ m a vodotěsnou přepážkou v polovině délky je ponořena pod hladinu oceánu a rychlostí $v = 20$ ft·min⁻¹ klesá ke dnu. V hloubce $h = 1\,200$ ft praskne sklo na přední podstavě a příslušná polovina kapsle se zaplní vodou. Jakou rychlostí bude nyní klesat? Za jak dlouho klesne až na dno v hloubce $H = 3\,000$ ft? Osa válce má před prasknutím skla horizontální směr. Předpokládejte, že stěny kapsle jsou vůči jejím rozměrům tenké.

Úloha I.5 ... mechanicky (ne)stabilní kondenzátor

8 bodů

Představme si nabitý deskový kondenzátor, jehož jedna vodorovná deska je ve fixní pozici a druhá levituje přímo pod ní v rovnovážné pozici. Spodní deska není nijak mechanicky fixována. Jaká bude kapacita takového kondenzátoru v závislosti na přiloženém napětí? Je tento kondenzátor mechanicky stabilní?

Úloha I.P ... uff, to je vedro

10 bodů

Možná jste si všimli, že sopky na Zemi nemají univerzální tvar – navzájem se mohou dost lišit. Srovnajte například fotografie havajské sopky Mauna Loa a italského Vesuvu. Liší se nejen strmostí stěn, ale i stylem erupcí. Obě tyto vlastnosti úzce souvisí s viskozitou magmatu. Jak viskozita magmatu ovlivňuje styl a nebezpečnost erupcí? Souvisí to nějak s geografickou polohou sopek?

Úloha I.E ... Kdy už budou ty těstoviny?

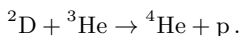
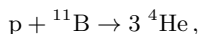
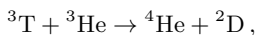
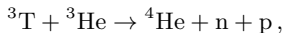
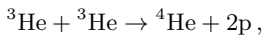
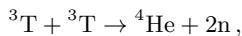
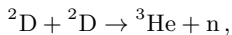
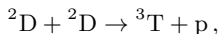
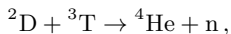
14 bodů

Změřte závislost času začátku varu vody na jejím množství v nádobě. Měření opakujte několikrát pro alespoň pět různých objemů. Dbejte přitom na konzistentnost podmínek, zejména kritérium varu a počáteční teplotu vody, nádoby a sporáku. Výslednou závislost se pokuste vysvětlit.

Úloha I.S ... začínáme slučovat

10 bodů

1. Spočítejte energetický výtěžek následujících reakcí a kinetické energie produktů reakce

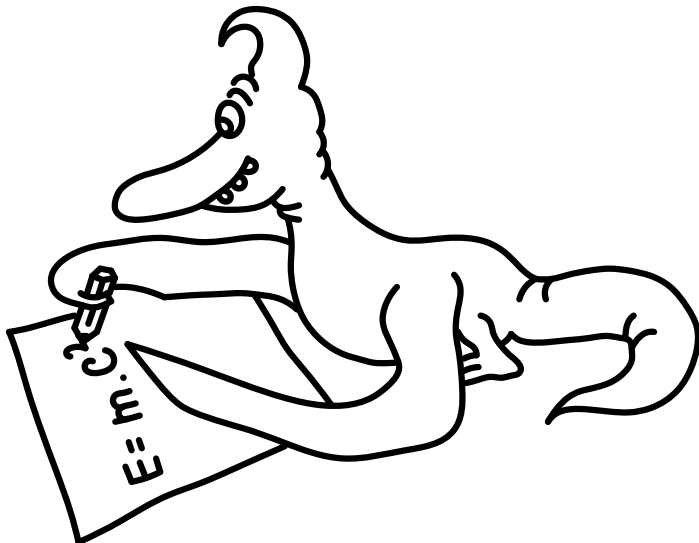


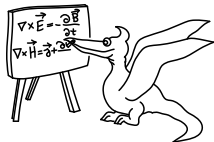
2. Pomocí grafu rychlosti výtěžku v textu seriálu pro vámi zvolenou teplotu odvodte Lawsonovo kritérium pro dobu udržení inerciální fúze deuteria s deuteriem, protonu s borem a deuteria s heliem 3 a pro jednotlivé případy určete součin velikosti palivové peletky a hustotu stlačeného paliva. Mají tyto reakce nějakou výhodu oproti tradiční DT fúzi?
3. Určete, jak by vypadalo Lawsonovo kritérium pro nemaxwellovské rozdělení rychlostí, kdyby kinetická energie částic byla

(a) $E_k = k_B T^\alpha,$

(b) $E_k = aT^3 + bT^2 + cT.$

Byla by takováto fúze vůbec realizovatelná? Pokud ano, jaké by mělo být palivo (fúzní reakce), jak velká by měla být palivová peletka a na jakou hustotu by se měla stlačit?





Seriál: Začínáme slučovat

V letošním ročníku seriálu se zaměříme na fyziku laserové inerciální fúze. V současných debatách o čisté a udržitelné energii může jaderná fúze, v některých případech pak právě fúze inerciální, hrát důležitou roli. V první části seriálu se zaměříme na historii objevů, jež vyústily v cílený výzkum v tomto oboru, konkrétně tedy v oblasti laserové inerciální fúze. Proč se tento způsob nazývá právě inerciální, se dozvíme na konci prvního dílu seriálu.

Historické okénko jaderné fúze

Za počátek dějin jaderné fúze můžeme považovat rok 1920. Arthur Eddington se domníval, že slučování (fúze) vodíku s heliem by mohlo být primárním zdrojem energie hvězd. Tato domněnka pramenila z výsledků dosažených v předchozích letech, především z objevu kladně nabitého atomového jádra Johannesem Wilhelmen („Hansem“) Geigerem a Ernestem Marsdenem pod vedením Ernesta Rutherforda v roce 1909. Jejich experimenty spočívaly v ostřelování zlaté fólie alfa částicemi pocházejícími z radioaktivního rozpadu, během nichž tým vědců pozoroval rozptyl těchto částic do velkých úhlů.

Dalším významným přínosem byl v roce 1912 objev dvou izotopů neonu Francisem Williamem Astonem, který následně do roku 1919 proměřil hmotnosti dalších asi padesáti izotopů neradioaktivních prvků.

Roku 1927 Friedrich Hund objevil kvantové tunelování, jehož teorii o rok později propracoval George Gamow. V roce 1929 Robert Atkinson a Fritz Houtermans s využitím Astonem změřených hmotností lehkých prvků ukázali, že právě slučováním prvků s malou hmotností se může uvolnit značné množství energie, jak je ukázáno na obrázku 1, tj.

$$\Delta E = (M_1 + M_2 - M_3 - M_4) c^2, \quad (1)$$

kde M_1 a M_2 jsou hmotnosti reagujících jader, M_3 a M_4 jsou hmotnosti produktů a c je rychlost světla. Navíc se jim podařilo prokázat, že díky kvantovému tunelování nejsou pro proběhnutí reakce vyžadovány tak vysoké teploty, jak předpověděl Eddington.

Vůbec první fúzní reakce byla v Cavendishových laboratořích demonstrována v roce 1933 Marcusem Laurencem Elwinem („Markem“) Oliphantem, jemuž se podařilo sloučit dvě deuteriová jádra.

V roce 1938 Kantowitz a Jacobs postavili první magnetické zrcadlo, ve kterém chtěli předvést první jaderný reaktor. Poté následovaly pokusy budovat různé fúzní aparatury, kupříkladu tzv. pinčovací zařízení, tokamak (1950) nebo stelarátor (1951). Tokamak byl přitom navržen Andrejem Sacharovem a Igorem Tamem v Sovětském svazu.

V roce 1951 se začalo pracovat na termojaderné bombě. 1. listopadu roku 1952 byla v rámci operace Ivy odpálena bomba zvaná Ivy Mike. Jednalo se vlastně o první člověkem uvolněnou fúzní energii, přestože velmi nekontrolovatelnou.

V roce 1960 (několik měsíců po vynálezu laseru) byl Johnem Nuckollsem navržen koncept inerciální laserové fúze, což lze považovat za počátek snahy lidstva o říditelnou laserovou inerciální fúzi.

Lawsonovo kritérium

Ještě předtím (v roce 1955) ale John David Lawson nastínil, jak by bylo možné dosáhnout fúze v pozemských podmínkách. Předpokládejme, že plazma se skládá z deuteria a tritia, kde hustota deuteria je $n_d = n/2$ a hustota tritia $n_t = n/2$, přičemž n je celková hustota ve smyslu počtu částic N na jednotku objemu V , tedy $n = N/V$. Objem je v našem případě často udávaný v cm^3 , hustota má proto rozměr cm^{-3} . Můžeme zavést „rychlost výtěžku fúzní reakce“ W , která je v takovémto horkém a hustém plazmatu dána vztahem

$$W = \frac{n^2}{4} \langle v\sigma \rangle,$$

kde v představuje relativní rychlost dvou jader a σ je účinný průřez reakce. Za předpokladu, že se částice v plazmatu řídí Maxwellovým-Boltzmannovým rozdělením rychlostí s průměrnou kinetickou energií

$$E_k = \frac{3}{2} k_B T,$$

představují tyto částice v podstatě monoatomární ideální plyn o teplotě T , kde k_B je Boltzmannova konstanta. Fúzní účinný průřez σ silně závisí na relativní rychlosti slučovaných jader a výsledná rychlost výtěžku je získána průměrováním (tj. operací $\langle \rangle$) součinu $v\sigma$ přes všechny možné relativní rychlosti.

Z obrázku 2 plyne, že při všech možných dosažitelných teplotách deuteriová-tritiová (DT) reakce dává nejvyšší příspěvek k energetickému výtěžku, a představuje proto nejsnazší cestu k získání fúzní energie.

Energie vyprodukovaná reakcí za dobu τ závisí na kinetické energii Q reakčních produktů a výtěžku fúzní reakce W . To vyjadřuje vztah

$$E = W\tau Q = \frac{n^2}{4} \langle v\sigma \rangle \tau Q,$$

kde Q je totožné s ΔE z rovnice 1 a má rozměr MeV.

Ve fyzice plazmatu se energie udává v jednotkách elektronvolt (eV). Tato jednotka představuje energii, kterou získá elektron po urychlení napětím $U = 1 \text{ V}$. Číselně proto platí $1 \text{ eV} = qU \doteq 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Často se setkáme s použitím eV rovněž při určování teploty, přičemž pro přepočet teploty na K lze použít vztah

$$T = \frac{E}{k_B}.$$

Protože cílem je energii v reaktoru získávat, fúzní energie musí být větší než energie nutná k ohřátí plazmatu na vysoké teploty. Energetického zisku je tedy dosaženo pouze v případě, že vyprodukovaná energie je větší než celková kinetická energie všech částic. Střední hodnota E_k každého z jader a elektronů je $E_k = \frac{3}{2} k_B T$. Proto pouze v případě, že platí

$$2nE_k = 2n \frac{3}{2} k_B T < \frac{n^2}{4} \langle v\sigma \rangle \tau Q,$$

uvolní fúzní reakce více energie, než je nutné k vytvoření plazmatu o dané požadované teplotě a hustotě. Přeuspořádáním jednotlivých členů v nerovnosti získáme tzv. Lawsonovo kritérium

$$n\tau > \frac{12k_B T}{\langle v\sigma \rangle Q},$$

kteří je jedním ze základních vztahů ve fyzice a technice udržení jaderné fúze.

Slučovaná jádra musí mít dostatečnou kinetickou energii, aby nastal dostatečný počet fúzních reakcí. Pro DT reakci je nutná teplota přibližně 5 keV. Pro tyto parametry Lawsonovo kritérium dává přibližný vztah

$$n\tau \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ s}\cdot\text{cm}^{-3}.$$

Z toho plyne, že plazma musí být udrženo při dostatečné hustotě dostatečně dlouhou dobu.

V současné době jsou nejvíce studované a technicky nejpokročilejší dva přístupy, jak toho docílit:

1. magnetické udržení,
2. inerciální udržení,

jež splňují Lawsonovo kritérium zcela rozdílnými způsoby. Magnetické udržení využívá nízkých hustot a delších časů udržení plazmatu a používá se například v tokamacích, zatímco inerciální fúze využívá extrémně vysokých hustot plazmatu udržovaných po velice krátkou dobu.

Jako palivo pro inerciální fúzi se používají peletky, viz obr. 3, na jejichž povrchu se nachází vrstva tzv. ablátoru, jenž se při dopadu laserového paprsku odpařuje směrem ven z peletky. Ze zákona zachování hybnosti je tím vnitřní část paliva urychlena opačným směrem dovnitř peletky. Takto se v centru peletky zvýší teplota a tlak natolik, že nakonec dojde k „zapálení“ termojaderné fúze.

V případě inerciální fúze může být Lawsonovo kritérium vyjádřeno pomocí tzv. plošné hustoty paliva, tj. součinu hustoty paliva ρ a poloměru palivové peletky R . Čas potřebný k udržení fúze můžeme vyjádřit jako dobu expanze sféry o poloměru R , pohybující se rychlostí zvuku $c_s \sim 100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, jako

$$\tau = \frac{R}{c_s}$$

a hustotu částic n s využitím hustoty paliva jako

$$n = \frac{\rho}{m},$$

kde m reprezentuje průměrnou hmotnost atomu deuteria a tritia. S pomocí Lawsonova kritéria $n\tau \sim 10^{15} \text{ s}\cdot\text{cm}^{-3}$ získáme

$$\rho R \sim 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2},$$

čímž je stanovena podmínka na součin hustoty a rozměru peletky.



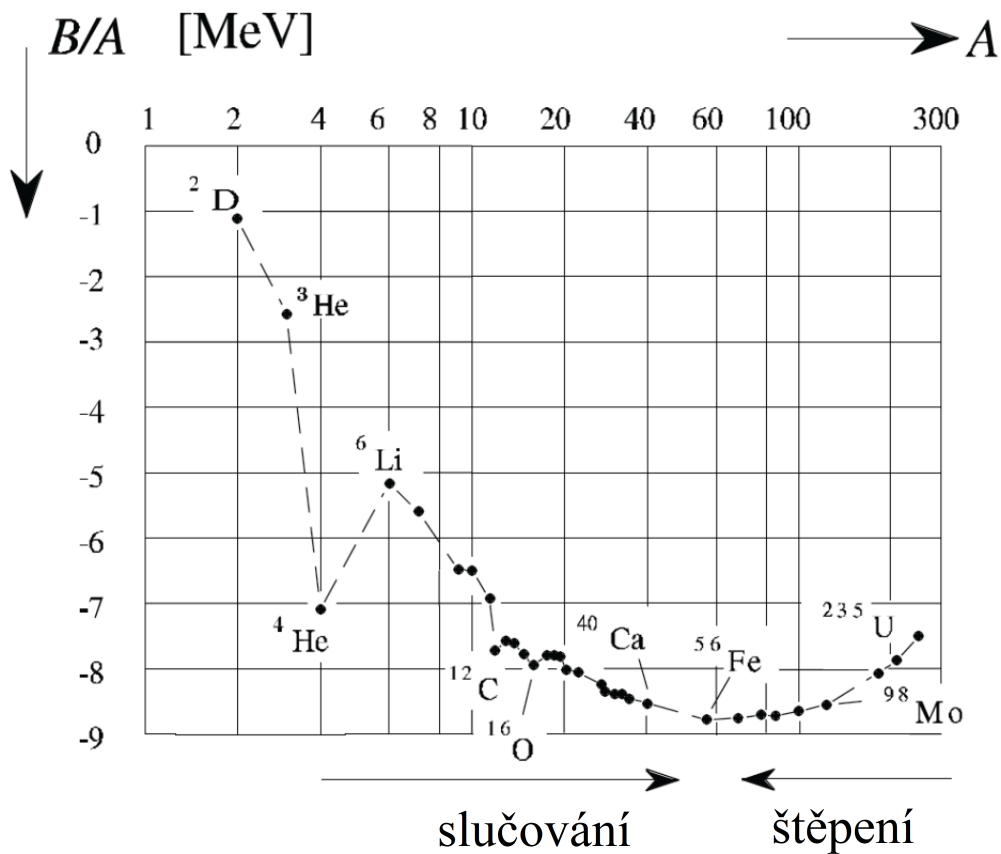
FYKOS
UK, Matematicko-fyzikální fakulta
Ústav teoretické fyziky
V Holešovičkách 2
18000 Praha 8

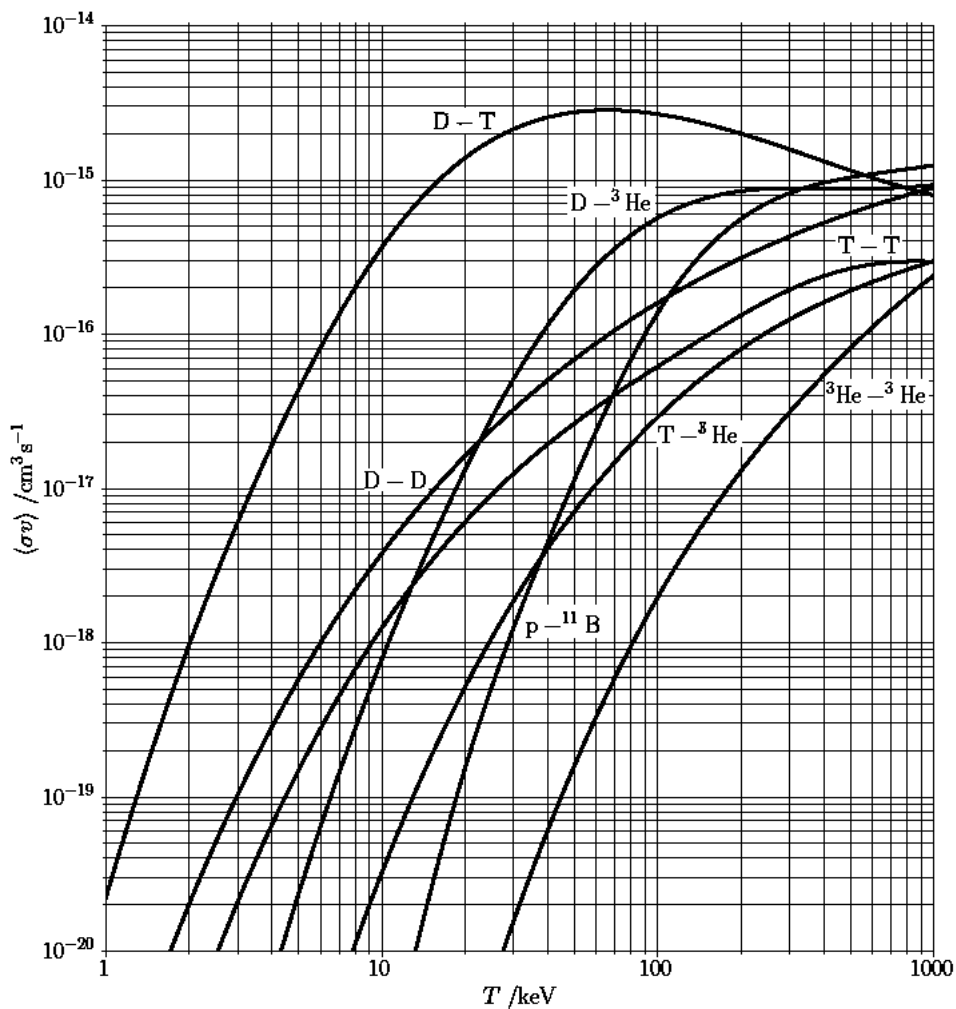
www: <https://fykos.cz>
 e-mail: fykos@fykos.cz

FYKOS je také na Facebooku 
<https://www.facebook.com/FYKOS>

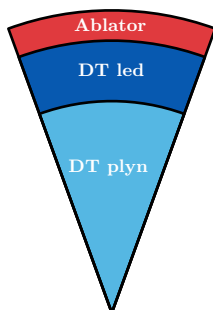
Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

Obr. 1: Graf zobrazující vazebnou energii B v závislosti na nukleonovém čísle A .



Obr. 2: Závislost rychlosti výtěžku fúzní reakce na teplotě



Obr. 3: Obrázek peletky ve tvaru koule o rozměrech typicky několik milimetrů