

OŠ LJUDSKI VRT PTUJ



# JEDRSKA FUZIJA

Področje: astronomija in fizika

Raziskovalna naloga

Avtorji: Aljaž Habjanec, 9. razred

Filip Fras, 9. razred

Sandro Čeh, 9. razred

Mentor: Maja Smiljan, prof. kem. in mat.

Somentor: Grega Belšak, mag. astrofizike

## ZAHVALA

Tema raziskovalne naloge v naših raziskovalnih dušah tli že dve leti, saj smo na spletnih omrežjih in portalih mnogokrat prebirali literaturo, video vsebine in raziskave, tesno povezane z jedrsko fuzijo.

Zavedamo se, da imamo, ne samo v Sloveniji, tudi v svetu, malo znanstveno in eksperimentalno podkovanih dognanj s področja jedrske fuzije. Zato se zahvaljujemo mentorici, prof. Maji Smiljan, da je prevzela nadzor nad našim raziskovalnim delom. Zahvaljujemo se tudi somentorju, Gregu Belšak, mag. astrofizike, ki nam je s svojim znanjem pomagal razumeti strokovne procese jedrske fuzije in nam pripravil zanimive ure na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani, kjer smo lahko izvedli eksperiment. Zahvaljujemo se tudi vsem anketirancem, za njihov čas pri izpolnjevanju ankete.

Skupaj z njimi nam je uspelo zapisati pričujočo raziskovalno nalogo, s katero smo jedrsko fuzijo podrobneje spoznali in jo tudi približali ljudem v naši okolici.

## POVZETEK

V zadnjih dvesto letih energetika pridobiva vedno večji pomen v naši družbi, s tem pa se pojavljajo tudi številni načini pridobivanja energije. Nekateri imajo slab vpliv na naše okolje, drugi so neučinkoviti. Okolje skušamo obvarovati z večanjem rabe obnovljivih virov energije – sončna, hidro, vetrna, geotermalna. Vendar smo na tem področju, globalno gledano, premalo učinkoviti.

Tu nam rešitev predstavlja jedrska energija – jedrska fuzija, ki je tako okolju prijazna, kot tudi energetske zelo učinkovita. Iz tega razloga smo se odločili spisati raziskovalno nalogo o jedrski fuziji. Ob potrebah fuzije za energetiko smo se poglobili v pogoje, s katerimi lahko privedemo do reakcije, na kakšen način jo lahko najučinkoviteje izkoristimo, kakšen vpliv ima na okolje in ljudi ter kako lahko tega izničimo.

Mi smo se odločili narediti raziskovalno nalogo o jedrski fuziji zato, da bi prikazali vse prednosti in pomanjkljivosti jedrske fuzije.

Poiskali smo podatke in jih sestavili v smiselno in skrčeno celoto. Med iskanjem smo odkrili, da jedrska fuzija vseeno ni čisto čisti vir energije, ker je izotop vodika, tritij, radioaktiven. Po tem, ko smo našli to informacijo smo se odločili narediti eksperiment o tem, kateri materiali najbolj zaustavljajo sevanje. V principu odločanja, katere elemente naj uporabimo smo naredili anketo in izbrali nekaj najpogostejših predlogov in jih testirali.

V raziskovalni nalogi smo si zastavili tri hipoteze in eno tezo, na katere bomo z različnimi raziskovalnimi metodami odgovorili.

**KLJUČNE BESEDE: jedrska fuzija, obnovljivi viri energije, sevanje, atomi, fizika**

## ABSTRACT

Energy has been gaining increasing importance in our society over the last two hundred years, and many ways of generating energy are emerging. Some have a bad impact on our environment, others are ineffective. We try to protect the environment by increasing the use of renewable energy sources - solar, hydro, wind, geothermal. However, in this area, globally, we are under-performing.

The solution here is nuclear energy - nuclear fusion, that is both environmentally friendly and energy efficient. For this reason, we decided to write down a nuclear fusion research assignment. With the needs of energy fusion, we have deepened into the conditions, by which we can lead to a reaction, how we can make the most of it, what impact it has on the environment and people, and how we can eliminate it. We have decided to do a nuclear fusion research assignment in order to show all the pros and cons of nuclear fusion.

We searched for information and compiled it into a meaningful and condensed whole. During the search, we discovered that nuclear fusion is not a pure source of energy, because the isotope hydrogen, tritium, is radioactive. After finding this information, we decided to experiment with which materials best stopped radiation. In principle, deciding which elements to use we did a survey and selected some of the most common suggestions and tested them.

In the research paper, we set out three hypotheses and one thesis, which we will answer with different research methods.

**KEY WORDS: nuclear fusion, renewable energy, radiation, atoms, physics**

## KAZALO

1.	UVOD V RAZISKOVALNO NALOGO .....	6
1.1	Predmet raziskovalne naloge .....	7
1.2	Raziskovalni cilj.....	7
1.3	Postavljene hipoteze in teza.....	7
1.4	Raziskovalna metodologija.....	8
2.	TEORETIČNI DEL.....	9
2.1	Jedrska fuzija .....	9
2.1.1	Postopek jedrske fuzije.....	9
2.1.2	Fuzija kot obnovljiv vir energije.....	11
2.2	Pogoji za izvedbo jedrske fuzije.....	12
2.3	Fuzijski reaktorji.....	13
2.4	Opis magnetnega reaktorja.....	15
2.5	Opis laserskega reaktorja .....	16
2.6	Delovanje fuzijskih reaktorjev .....	17
2.7	Sevanje pri fuziji .....	18
3.	EMPIRIČNI DEL.....	19
3.1	Hipoteza 1 - "Najproduktivnejša fuzijska reakcija je reakcija šestih vodikov".....	19
3.2	Hipoteza 2 - "Reakcija $^3\text{He}$ jedra in devterija je energetsko koristnejša, kot reakcija $^3\text{H}$ jedra in devterija".....	20
3.3	Teza 3 - "Poznavanje jedrske fuzije med ljudmi je nizko" .....	21
3.3.1	Zgradba ankete.....	21
3.3.2	Predstavitev odgovorov v anketi.....	22
3.3.3	Analiza nekaterih prejetih odgovorov .....	23
3.4	Hipoteza 4 - "Radiacija je bolje absorbirana z gostejšimi materiali" .....	25
3.4.1	Prikaz izvajanja eksperimenta .....	27
3.4.2	Prikaz rezultatov .....	28
4.	ZAKLJUČEK.....	30
5.	VIRI .....	31
	PRILOGA 1.....	33
	PRILOGA 2.....	34

## KAZALO SLIK

Slika 1: Proizvodnja energije v Sloveniji glede na vir.....	11
Slika 2: Energetski viri za proizvodnjo energije v Sloveniji v letih 2014 – 2018 .....	12
Slika 3: Slika Sonca.....	12
Slika 4: Deleži kemijskih elementov v Soncu v %.....	13
Slika 5: JET reaktor.....	14
Slika 6: Primerjava med JET in ITER reaktorjem .....	14
Slika 7: Prikaz uporabljenih materialov v ITER .....	15
Slika 8: Model prereza tokamaka ITER .....	15
Slika 9: Magnetni reaktor .....	16
Slika 10: Laserski reaktor v National Ignition Facility v ZDA .....	17
Slika 11: Zlivanje devterija in tritija .....	18
Slika 12: Reakcija zlivanja šestih jeder helija (He) .....	18
Slika 13: Reakcija zlitja He-3 in devterija .....	20
Slika 14: Na sliki je enačba za Coulombovo mejo.....	20
Slika 15: Odvisnost procenta poznavalcev od starosti .....	23
Slika 16: Stolpčni prikaz popularnosti fizike, glede na starost anketirancev.....	23
Slika 17: Prikaz mnenj anketiranih o izbiri postopka zoper sevanja.....	24
Slika 18: Uporabljena Torijeva mrežica v eksperimentu .....	25
Slika 19: Scintilator .....	26
Slika 20: Predstavitev podanih materialov v anketi .....	27

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Prikaz rezultatov pridobljenih z eksperimentom.....	29
---	----

## KAZALO ENAČB

Enačba 1: Enačba za izračun vrednosti $n_{sv}/h$ pri določeni debelini materiala .....	28
Enačba 2: Enačba za izračun izhodiščne vrednosti $n_{sv}/h$ , kadar med virom sevanja in aparatom ni ovire ( $N(0)$ ) .....	28
Enačba 3: Enačba za izračun absorpcijskega koeficienta posameznega materiala.....	28

# 1. UVOD V RAZISKOVALNO NALOGO

Ljudje smo že od samega začetka tesno povezani z vesoljem. Že v daljni pradavnini so naši kosmati predniki radi pogledali navzgor in se zazrli v čudovite svetleče pikice, ki so osvetljevale nočno nebo. Sanjali so, kako se bodo nekoč odpravili med nebesne lepote, ki na nebu izrisujejo znane podobe. Od takrat je minilo mnogo pestrih let, ki so močno zaznamovala človeštvo. Znanstvena fantastika postaja samoumevna resničnost, nekaj kar nas spremlja na vsakem koraku. Leta 1969 je vesoljska operacija Apollo na naš satelit Luno popeljala prvega Zemljana, Neila Armstronga. Začela se je doba astronautike... Kljub izjemni evoluciji človeka, na zvezdi še nismo pristali. Takšen dosežek je še vedno zelo daleč, zdi se praktično nemogoč.

"Če ne gre Mohamed h gori, gre pa gora k Mohamedu": pravi star ter dobro uveljavljen pregovor. In ne moti se! Morda smo res svetlobna leta daleč od pristanka na zvezdi, toda vse kaže, da lahko znanost zvezde pripelje k nam. Si predstavljate svet, ki bi ga gonila skoraj neusahljiva energija "zemeljske zvezde"? Si predstavljate življenje brez pregrešno dragih računov za elektriko? Si predstavljate čudovito, čisto in varno prihodnost brez onesnaženja in naravnih katastrof? Si predstavljate?

"Ustekleničenje" zvezde je ogromen korak k temu. Zvezde svetijo, ker v njih neprestano poteka posebna reakcija, imenovana jedrska fuzija ali zlivanje jeder. Gre za proces, ki bi nam ob pravilni rabi, uspešno generiral nepredstavljuje količine zelene obnovljive energije.

Iskanje neusahljive, okolju prijazne energije, je kakor težko rešljiv labirint. Ljudje smo se, sploh v 21. stoletju, zelo približali samemu cilju. Našli smo mnoge bližnjice, ki so nas katapultirale skozi sistem prepletenih hodnikov. Toda nobena bližnjica ni tako sladka, kakor prava težko dosegljiva rešitev. Če želimo izkusiti pravi potencial obnovljive energije, moramo po daljši poti. Le tako nam bo dolgoročno uspelo.

V tej raziskovalni nalogi Vam bomo pojem jedrska fuzija opisali iz različnih zornih kotov. Predstavili bomo pričakovanja in načrte znanstvenikov ter raziskali, katera vrsta oz. oblika te nuklearne reakcije je učinkovitejša. Tako bomo primerjali reakcijo izotopov helija z reakcijo izotopov vodika ter ugotavljali, katera je energijsko bolj učinkovita. Lotili se bomo tudi težave s sevanjem, ki je nevaren in nepotreben stranski produkt, sicer varne reakcije, ter s pomočjo eksperimenta raziskali možnosti absorpiranja le-tega. V okviru danega projekta smo se odločili, da bomo raziskovali tudi med ljudmi. Zanimalo nas je, če smo prebivalci modrega planeta s pojmom sploh ustrezno seznanjeni. Poizvedovanja se bomo lotili s pomočjo kratke ankete, ki smo jo razdelili predvsem med nas, mlade. Tako ali drugače, mi smo prihodnost! Mi smo tisti, ki si bomo morda kot prvi, s pomočjo jedrske fuzije množično ogrevali naša stanovanja. Mi smo tisti, ki bomo čez nekaj let skrbeli za naš planet. Svet na mladih stoji!

Se v skrinji na koncu labirinta res skriva prav jedrska fuzija? Ima ta pojem potencial, da postane vodilni vir energije v svetu? Ne zatiskajmo si oči! Svet potrebuje obnovljivo energijo. Zaloge nafte bodo v primeru sedanje porabe hitro zbledele, zato je pomembno da najdemo energijsko alternativo. V tej raziskovalni nalogi Vam bomo poskusili odgovoriti na vsa dana vprašanja. Morda se bo našel še kdo, ki ga bo prebrano tako navdušilo, da bo znanstvenikom z veseljem priskočil na pomoč!

## 1.1 Predmet raziskovalne naloge

Predmet raziskovanja raziskovalne naloge bo jedrska fuzija, kaj je jedrska fuzija, kako jo uvrstiti v naše življenje in njeni stranski učinki.

Obnovljivi viri energije so pomembna rešitev pri soočanju s podnebnimi izzivi današnjega časa. Pri predmetu biologije smo spoznali koncept bionike, ki poenostavljeno rečeno, omogoča izkoriščanje naravnih potencialov s sodobno tehnologijo. Naravne procese skušamo prenesti v človekovo življenje. Pri tem je pomembno, da ohranjamo naravne vire čim manj obremenjene.

Naš pogled k večanju uporabe obnovljivih virov energije za proizvodnjo energije je segal izven zemeljskih meja. Prevezelo nas je spoznanje, da imajo zvezde razvit proces, ki jim omogoča neusahljivo proizvodnjo neverjetnih količin energije. To je jedrska fuzija.

V zadnjem stoletju se znanstveniki pospešeno ukvarjajo z načini, kako jedrsko fuzijo uporabiti na Zemlji. Predmet raziskovalne naloge bo tudi raziskati znano delo znanstvenikov.

## 1.2 Raziskovalni cilj

Raziskovalno delo zasleduje dva cilja – približati pojem jedrske fuzije ljudem, ter proučiti znane procese jedrske fuzije za pridobivanje energije.

Pomen raziskovalne naloge je predstaviti procese jedrske fuzije in izvedeti, zakaj je proces jedrske fuzije na Zemlji še vedno težko dosegljiv.

## 1.3 Postavljene hipoteze in teza

Hipoteze in teza, ki smo si jih v okviru raziskovalne naloge določili so:

- H1 – "Najproduktivnejša fuzijska reakcija je reakcija šestih vodikov"
- H2 – "Reakcija  $^3\text{He}$  jedra in devterija je energetsko koristnejša, kakor reakcija  $^3\text{H}$  jedra in devterija"
- T3 – "Poznavanje jedrske fuzije med ljudmi je nizko."
- H4 – "Radiacija je bolj absorbirana z gostejšimi materiali."

S prvo hipotezo smo želeli prikazati, da ima jedrska fuzija več možnih reakcij. Predstavili bomo nekaj reakcij in odgovorili na zastavljeno trditev.

Druga hipoteza bo usmerjena v primerjavo reakcij z He in z H. Z obema namreč lahko izvajamo jedrsko fuzijo in pridobivamo zadostne količine energije. Zanimalo nas je, katera reakcija je bolj učinkovita pri proizvodnji energije.

Ker menimo, da je jedrska fuzija med ljudmi slabo poznana, smo se odločili odgovoriti na to vprašanje in tako v raziskovalno nalogo vključiti različne skupine ljudi.

Med proučevanjem strokovne literature smo ugotovili, da tako fisija kot fuzija povzročata človeku nevarno sevanje. Z eksperimentom bomo odgovorili na vprašanje, kateri materiali nas bolje ščitijo pred sevanjem.

## 1.4 Raziskovalna metodologija

Za preučitev zastavljenih hipotez in teze smo se odločili uporabiti naslednje raziskovalne metode:

- Metoda analize strokovne literature; z njo bomo ugotovili in zapisali proces razvoja jedrske fuzije v nekem časovnem obdobju in spoznali dejstva, ki so o jedrski fuziji poznana v strokovnih krogih;
- Metoda preračunavanja; z njo bomo odgovorili na zastavljeni hipotezi 1 in 2, za kateri bomo uporabili Einsteinovo enačbo in enačbo za Coulombovo mejo;
- Metoda anketiranja; z njo bomo spoznali, če je pojem jedrske fuzije poznan med ljudmi, pridobili pa bomo tudi podatke o materialih za katere anketiranci menijo, da so najučinkovitejši pri zadrževanju sevanja;
- Metoda eksperimenta; s pomočjo eksperimenta bomo ugotovili kateri materiali so najučinkovitejši pri zadrževanju sevanja.



## 2. TEORETIČNI DEL

### 2.1 Jedrska fuzija

Fuzija ali jedrsko zlivanje je proces zlivanja lažjih atomskih jeder v močnejše vezana težka jedra, pri čemer kot stranski produkt reakcije nastane tudi energija. Gre za proces, ki predstavlja osnovno gonilo svetlih zvezd našega univerzuma in "poganja" tudi Zemlji najbližjo zvezdo, Sonce.

Zaradi zahtevnih in težko dosegljivih osnovnih pogojev, fuzija na Zemlji, brez prisotnosti človeškega faktorja, ne more poteči. Znanstvenikom je pred leti končno uspelo posnemati ta zapleten proces, nova odkritja pa vodijo k vedno boljšemu razumevanju le-tega. Lahko jedrska fuzija res postane zelena energija prihodnosti?

Prva odkritja, neposredno povezana z jedrsko fuzijo, so se v znanstvenih krogih pričela razvijati šele v začetku 20. stoletja. Leta 1920 je sir Arthur Eddington jedrsko fuzijo, kot prvi označil za vir energije Sonca. 19 let pozneje (leta 1939) sta Carl Friedrich von Weizsäcker in Hans Bethe naznanila pogoje, ki so potrebni za fuzijsko reakcijo. Hans Bethe je bil za slednje nagrajen tudi z Nobelovo nagrado iz področja fizike. Potrebe hladne vojne so pripomogle k iznajdbi vodikove (fuzijske) bombe, ki za eksplozijo izrablja energijo fuzijske reakcije, pogosto prepletene tudi z reakcijo fisije. Nastane eksplozija, ki je tudi do 2500-krat močnejša od eksplozije atomske bombe nad mestom Nagasaki (Asimov 2020). Leta 1978 je svet ministrov EU sprejel odločitev o izgradnji tokamaka JET (Joint European Torus), ki še vedno velja za največji fuzijski reaktor na svetu. JET se nahaja v Veliki Britaniji, v regiji Oxfordshire, v severovzhodni Angliji. Leta 1988 so sprejeli tudi zamisel o reaktorju ITER (Internacionalni termonuklearni eksperimentalni reaktor), ki ga gradijo še danes. Konec 20. stoletja je "fuzijska elektrarna" JET postavila rekord, ki velja še danes. V eni sekundi je z mešanico težkega in super-težkega vodika ustvarila 16 megavatov električne energije, na žalost pa je v istem času za ogrevanje porabila kar 24 megavatov, kar je skoraj dvakrat več (JET history, 2020).

#### 2.1.1 Postopek jedrske fuzije

Če želimo postopek razumeti, moramo začeti na začetku. Kaj sploh je atom? Kemijsko gledano je atom eden od najmanjših delcev snovi. Atome večine kemijskih elementov, ki jih je skupaj 118, najdemo tudi v naravi. Zanimivo je, da je vsak izmed nas zgrajen iz atomov, ki so jih z različnimi oblikami nukleosinteze ustvarile zvezde, kasneje pa so bili le-ti deležni tudi supernove. Atom je zgrajen iz jedra (nucleus), ki ga obdaja elektronska ovojnica. Jedro je sestavljeno iz pozitivno nabitih protonov ( $p^+$ ) in nevtralnih nevtronov ( $n^0$ ), ki predstavljajo večino mase atoma. Elektronsko ovojnico sestavljajo negativno nabiti elektroni, za katere so dolgo zmotno mislili, da okoli jedra krožijo po tirnicah. Danes vemo, da temu ni tako. Elektroni zapolnjujejo prostor okoli jedra, imenovan tudi orbitala, in sestavljajo t.i. "elektronski oblak" (Zgradba atoma, 2020).

Zraven pojma atom, se pogosto srečujemo tudi s pojmom energija. Energija je sestavljena fizikalna količina, ki jo delimo na kinetično, potencialno, notranjo in lastno energijo. Označujemo jo z veliko črko E, osnovna enota pa se imenuje Joule (J) (Moja prva fizika 2016). Jedrsko zlivanje uvrščamo pod pojem notranja energija, ki ga povezujemo s temperaturo in prostornino telesa ter tlakom, ki deluje na dano telo. Še natančneje lahko fuzijo uvrstimo pod okrilje jedrske energije, kamor sodi tudi fisija (Energija, 2018).

Pri procesu jedrske fuzije igra zelo močno vlogo sevanje (radiacija), brez katerega se energija ne bi sproščala. Sevanje (elektromagnetno valovanje) je na kvantni ravni sestavljeno iz delcev, ki jih imenujemo fotoni. Fotoni so vrsta osnovnih delcev, ki lahko vsebujejo različne količine energije. Energetska prepojenost fotonov merimo z enoto za energijo eV (elektron volti), pri čemer velja, da je  $1\text{eV} = 1.60217662 \times 10^{-19}\text{J}$ . Nekateri jih definirajo kot skupek premikajoče se energije. Glede na energijo, ki jo vsebujejo fotoni, lahko valovanje razdelimo na dve vrsti. Na sevanja, ki lahko plin

ionizirajo, in na sevanja, ki tega niso zmožna. Med slednja spadajo mikrovalovi, infrardeča, ultravijolična in bela svetloba... Ta oblika valovanja je človeku nenevarna. Pod ionizacijska sevanja spadajo rentgenski in gama žarki ter ostale nevarne oblike radiacije, ki lahko poškodujejo DNA. Tako pri fuziji, kakor tudi pri jedrski fisiji, najdemo obe obliki sevanja, zato je preventivna zaščita potrebna (Foton, 2020).

Jedrska cepitev ali fisija je proces pri katerem iz enega težkega jedra, na primer jedra atoma urana ali plutonija, nastaneta dve srednje teži (lažji) jedri (Asimov 2020). Ta postopek s pridom izkoriščajo najrazličnejše jedrske elektrarne po vsem svetu. Na omenjeni način deluje tudi naša edina tovrstna elektrarna, ki se nahaja v Krškem. Ta proizvede kar 40 % vse električne energije v Sloveniji (Statistični urad RS, 2020).

Fisija in fuzija veljata za obratni reakciji, če pa ju primerjamo na atomarni ravni hitro ugotovimo, da so elementi, ki sodelujejo pri fuziji, drugačni kot tisti pri fisiji. Da pridobimo energijo s postopkom fisije potrebujemo težka nestabilna jedra urana, katera večinoma pridobivamo v težkih rudniških pogojih, zraven tega pa so neobnovljivi vir. Medtem ko so za fuzijo pomembni izotopi vodika, katerih postopek pridobivanja je bistveno manj zahteven. Jedrsko zlivanje je okolju bolj prijazno.

Stranski produkt fisijskih jedrskih elektrarn so radioaktivni odpadki in razmeroma velika količina sevanja. Pri jedrskem zlivanju radioaktivnih odpadkov ni, količino sevanja in možnost absorbiranja le-tega pa bomo raziskali v nadaljevanju. Sicer je radioaktivno sevanje prisotno, zaradi pojavljanja odvečnih nevtronov. Problem strokovnjaki skušajo rešiti tako, da bodo vodikova jedra zlivali z atomi bora, za kar pa bi potrebovali neverjetno milijardo stopinj Celzija. Že leta 1944 je Fermi (Enrico Fermi, italijansko – ameriški fizik, ki je deloval v prvi polovici 20. stol.) izračunal, da za reakcijo DT goriva (devterij-tritij) potrebujemo približno 50.000.000 stopinj Celzija, za reakcijo DD (devterij - devterij) goriva pa 400.000.000 stopinj, kar je v primerjavi z milijardo še vedno precej manj. Primerjava torej poraja dvome o potrebi po odstranitvi sevanja in teži k drugi rešitvi - izbiri materiala, ki bi sevanje absorbiral. Predvideni izpust fuzijskega reaktorja moči 1000 MW znaša zanemarljiva 2kg nenevarnega helija na dan, zato izpusti ne predstavljajo težave (Asimov, 2020).

Fisijo in fuzijo zaradi osnovnih značilnosti uvrščamo med reakcije nukleosinteze. Nukleosinteza je proces nastajanja novih atomskih jeder, iz že prej obstoječih jeder drugih elementov, torej bi omenjeni pojem lahko določili za skupno nadpomenko obeh reakcij (*Nucleosynthesis*, 2020).

Jedrsko fuzijo uvrščamo med eksotermne energijske reakcije, kar pomeni, da se energija pri reakciji sprošča. Do tega pojava pride, ko zaradi zelo visoke energije in pritiska različni lažji elementi svoja jedra začnejo zlivati v težja. Pri tem pride do preskoka elektronov na tirnico bližje jedru s čemer izgubijo nekaj energije, ta pa se sprosti v obliki fotona. Masa nastalega jedra je zaradi tega manjša od vsote mas začetnih jeder, kar pomeni, da pride do masnega defekta. Razlika v masi se pretvori v energijo po Einsteinovi enačbi:  $E = mc^2$  (energija = masa \* svetlobna hitrost na kvadrat) (Jedrske reakcije, 2020).

Načini zlivanja atomskih jeder, kot smo jih omenili, so si različni, prav tako pa tudi različno učinkoviti, kar bomo prikazali v nadaljnjih hipotezah. Tako na principu sončeve fuzije potrebujemo šest vodikovih jeder. Ta se začne z zlitjem štirih vodikovih jeder v dva devterija (vodikova izotopa z enim nevtronom), pri čemer se en vodikov proton spremeni v nevtron, zaradi česar nastaneta pozitron (elektronov antidelec - nasproten delec s pozitivnim nabojem) in delec imenovan nevtrino. Tukaj v reakcijo vstopita še druga dva vodika, kar povzroči elektronski preskok in nastane foton, jedri pa se združita v tretji izotop helija (tralfij<sup>1</sup>). Za tem se helijeve jedri 3 združita v helijevo jedro 4 s čemer nastaneta dva nova vodika, ki sta lahko uporabljena v novi jedrski reakciji (Košak, 2010).

---

<sup>1</sup> Tralfij – He-3 ; helijev izotop 3; Ima dva protona in en nevtron, znanstveniki preučujejo njegovo koristnost v proizvodnji energije z jedrskim zlivanjem.

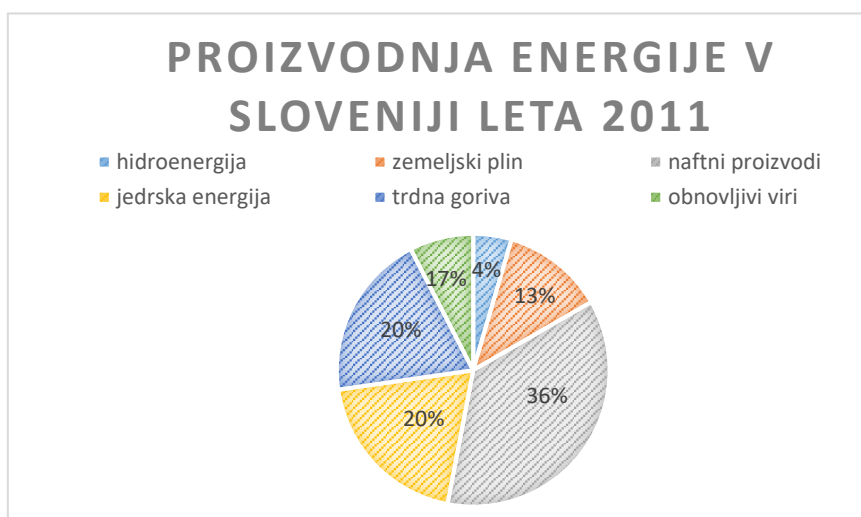
Zlivanje devterija<sup>2</sup> in tritija<sup>3</sup> je bolj preprosti proces saj ima proces samo eno fazo, pri katerem ob zlitju devterija in tritija nastane helij, prav tako pa se od jedra odlomi nevtron.

## 2.1.2 Fuzija kot obnovljiv vir energije

Energetske vire delimo na obnovljive in neobnovljive. Neobnovljivi viri energije so tisti, katerih poraba je večja od hitrosti njihovega nastajanja. Mednje sodijo nafta, premog, zemeljski plin in tudi uran, ki je ključni element elektrarn na jedrsko cepitev. Jedrska fuzija je obnovljiv vir energije, saj je količina potrebnih snovi, skoraj da neusahljiva. Večina sedanjih fuzijskih reaktorjev za delovanje uporablja težki vodik (devterij), reaktorji prihodnosti, kakršen je tudi ITER v Franciji, pa bodo najverjetneje uporabljali kombinacijo težkega vodika, katerega vir je morska voda, in supertežkega vodika (tritij), ki ga pridobivamo iz elementa litija. Gorivo torej delimo na cikla DD (devterij-devterij) in DT (devterij-tritij), medtem ko se v zvezdah pojavi tudi zlivanje H, katerega masno število je približno enako ena. Morske vode je seveda več kot dovolj, znanstveniki pa ocenjujejo, da je v oceanih kar 24 milijard ton devterija. Znane zaloge litija bodo po ocenah znanstvenikov zadoščale za več kot 1000 let. Večji problem predstavljajo pogoji, ki so za postopek potrebni, zato si znanstveni svet prizadeva, da bi se fuzija po prvi sprožitvi samodejno nadaljevala, kakor verižna reakcija (Najmabadi, Prager, 1999).

Pri jedrski fisiji se, kot glavni material za pridobivanje energije, uporablja uran. Zaradi njegovih nestabilnih jeder, se od tega trgajo radioaktivni nevtroni, ki pospešujejo in povzročajo nove cepitve jeder. S tem se reakcija, če je konstantno ne kontroliramo, pospešuje, zaradi česar je nestabilna in nevarna, saj lahko pride do eksplozije, s čimer postaneta dostopna radioaktivna fizijska produkta barij in kripton (Nielsen Haugeard, 2019).

Je torej smiselno vlagati upe, čas, trud in denar v razvoj fuzijske energije? Izvedeli smo, da gre za čist, varen in skoraj neusahljiv vir energije, ki ima velik potencial pri reševanju problema neobnovljivih virov. V primerjavi z ostalimi energetske viri so njene posledice praktično zanemarljive. V Sloveniji se premalo zanašamo na obnovljive vire energije. V Islandiji obnovljivi viri energije predstavljajo kar 70% vse uporabljene energije, medtem ko v Sloveniji veliko manj.

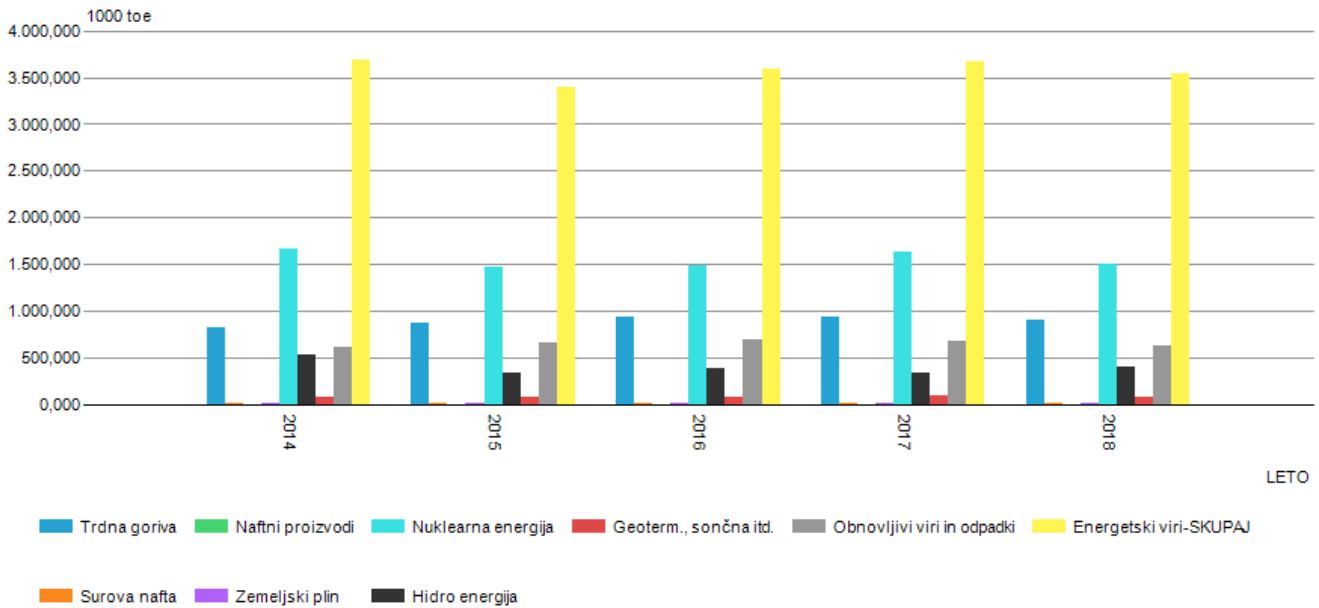


Slika 1: Proizvodnja energije v Sloveniji glede na vir (Vir: Moja prva FIZIKA: Učbenik za 9. razred osnovne šole. 2016. Ljubljana: Modrijan založba, d.o.o.)

<sup>2</sup> Devterij – vodik-2 (<sup>2</sup>H ali D), poznan tudi kot težki vodik; je izotop vodika; je dvakrat težji od vodika in zato počasneje reagira. Na Zemlji predstavlja 0,016% vsega vodika. Jedro devterija sestavljata en proton in en nevtron, medtem ko navadni vodik nima nevtronov. V naravi se nahaja kot plin D<sub>2</sub> ali 2H<sub>2</sub> (Devterij, 2017)

<sup>3</sup> Tritij – <sup>3</sup>H ali T, poznan tudi kot tricij; je radioaktiven izotop vodika. Njegovo jedro vsebuje en proton in dva nevtrona. Na standardni temperaturi in tlaku je plin. Je radioaktiven z razpolovno dobo 12,32 let (Tritij, 2019)

Energetska bilanca (1000 toe) po: ENERGETSKI VIR , LETO. Domača proizvodnja.



Vir: SURS

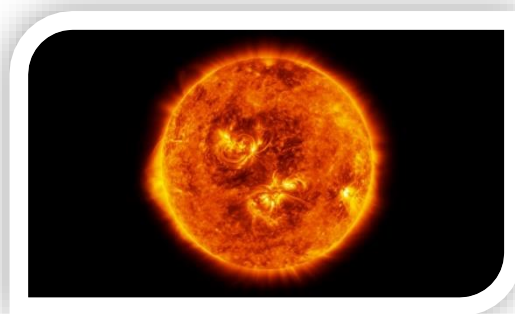
Slika 2: Energetski viri za proizvodnjo energije v Sloveniji v letih 2014 – 2018 (Vir: SURS)

Iz prikazanega grafa je razvidno da so obnovljivi viri energije šele na tretjem mestu, za nuklearno energijo in trdimi gorivi.

Slovenija ni edina država, ki se sooča s takšno težavo. Gre za globalen problem, katerega rešitev bi zagotovo lahko iskali v jedrski fuziji. Znanstveniki predvidevajo, da bodo prve fuzijske jedrske elektrarne pričele delovati okoli leta 2060. Spodbudno je tudi dejstvo, da nam procesi v takšnih elektrarnah ne morejo uiti iz rok, saj se reakcija, ob pomanjkanju goriva, samodejno ustavi. S takšno tehnologijo, bi lahko iz 40 litrov morske vode in 5 gramov litija, ustvarili približno 850 GJ energije (Fusion power, 2020). Danes za ustvarjanje take količine energije porabimo kar 40 ton premoga (Chen, 2015). Le upamo lahko, da bo vse potekalo, tako kot mora. In kdo ve? Morda si bomo čez 50 let stanovanja greli prav s pomočjo jedrske fuzije...

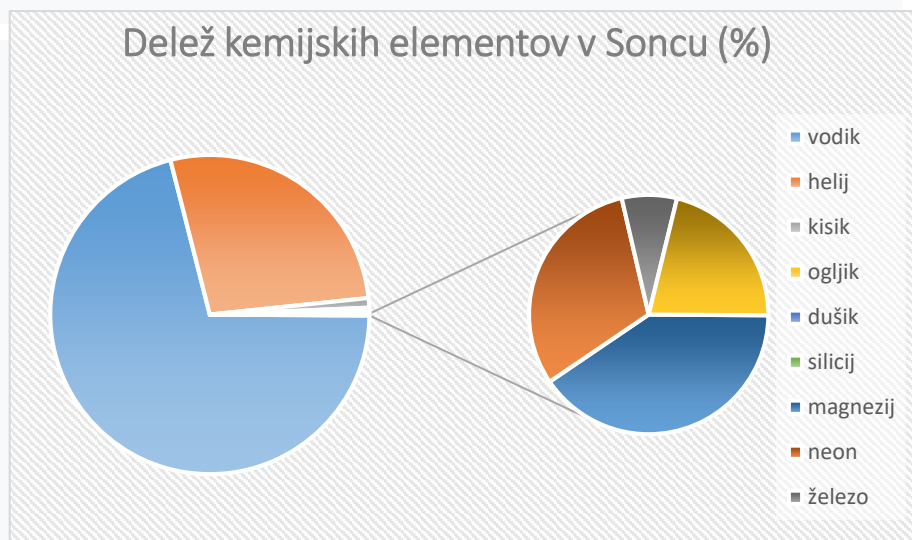
## 2.2 Pogoji za izvedbo jedrske fuzije

Jedrska fuzija je bila v naravi odkrita na Soncu. Zvezde so sestavljene iz vodika (okrog 60%), helija (okrog 30%) in ostalih elementov.



Slika 3: Slika Sonca (Vir: Wolchover, 2018)

element	delež v Soncu (%)
vodik	71
helij	27,346
kisik	0,97
ogljik	0,4
dušik	0,096
silicij	0,099
magnezij	0,076
neon	0,058
železo	0,014
žveplo	0,04



Slika 4: Deleži kemijskih elementov v Soncu v % (Vir: Sharp, 2017)

Osnovna pogoja jedrske fuzije na zvezdah (primer Sonce) sta temperatura in tlak, pri katerih vodik postane plazma, namesto plin.

### TEMPERATURA

Na Soncu je v jedru približno  $15 \times 10^6$  K ( $10^6$  K = 1.000.000 Kelvinov). Pri takšnih temperaturah se vodik pretvori v plazmo. To pomeni, da se vodikovi e- (elektron) loči od njegovega jedra in oba se prosto premikata po prostoru (definicija plazme na primeru vodika).

Sonce visoke temperature dosega s svojo veliko maso in silo gravitacije, ki to maso stisne v jedro. Za doseg te temperature moramo na Zemlji uporabiti energijo iz mikrovalov, laserjev in ionskih delcev. Tam nastaja četrto agregatno stanje, ki mu pravimo plazma. Plazma je ioniziran plin, ki omogoča da se e- ločijo oz. odcepijo od jeder (Freudenrich, 2020).

### TLAK

Med pogoje sodi tudi visok tlak, ki stisne vodikove atome skupaj. Sonce uporablja svojo maso in silo teže, da stisne vodikove atome skupaj in sproži fuzijsko reakcijo (Freudenrich, 2020).

Nekateri strokovnjaki pravijo, da je plazmo mogoče ustvariti tudi pri sobni temperaturi, če umetno dodamo e- energijo, s čimer povzročimo odcep od jedra. Temu pravimo hladna fuzija. Pri hladni fuziji torej ne potrebujemo visokih temperatur, da bi dosegli približno enako količino energije (Freudenrich, 2020).

## 2.3 Fuzijski reaktorji

Ko so znanstveniki okoli leta 1928 prvič odkrili jedrsko fuzijo na Soncu, so jo hoteli prenesti na Zemljo. Zavedali so se, da fuzija lahko proizvede veliko energije, ampak na Zemlji ni ustreznih naravnih pogojev za to, zato so začeli načrtovati reaktorje. V reaktorju mora biti temperatura vsaj  $10^6$  K, da začne nastajati plazma.

Fiziki si glede načina izgradnje in sestave samih reaktorjev še vedno niso enotni. Tako po svetu najdemo reaktorje različnih vrst. Najpogostejša sta laserski in magnetni reaktor.

V magnetnem reaktorju morajo biti zagotovljeni vsi osnovni pogoji za jedrsko fuzijo, prisotna pa morajo biti tudi močna magnetna polja za termalno izolacijo plazme. Pri laserskem reaktorju morajo

biti zagotovljeni vsi osnovni pogoji, z dodatkom zelo močnih laserjev ali ionskih žarkov. Atome vodika moramo stisniti skupaj z uporabo intenzivnih magnetnih polj, močnih laserjev ali ionskih žarkov (Freudenrich, 2020).

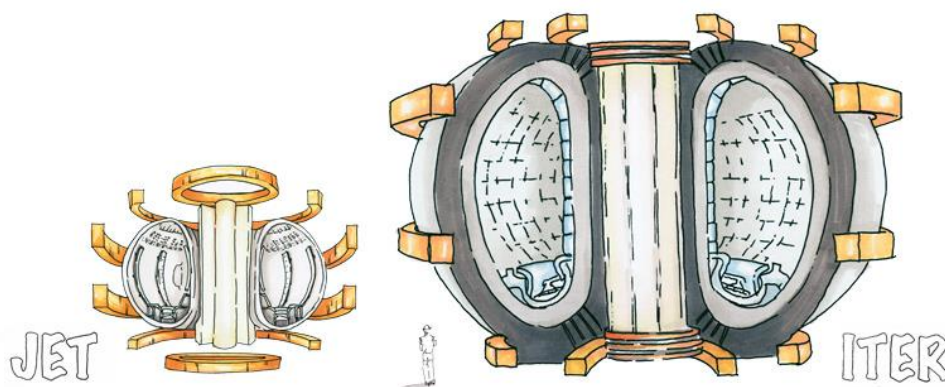
Tako izmed teh dveh prevladuje magnetni reaktor, katerega delimo na še dve podvrsti. To sta tokamak in stellarator, ki se ločujeta po različnih oblikah zadrževanja plazme s pomočjo magnetnega polja (Freudenrich, 2020).

Dober primer tokamaka sta reaktorja JET (Velika Britanija) in ITER (Francija). JET je uradno otvoritev doživel 9. aprila 1984, načrti zanj pa so se pričeli že v letu 1973. Načrte je vodil Paul-Henri Rebut. JET je bil, 9. novembra 1991, prvi tokamak fuzijski reaktor, ki je uporabil D-T kombinacijo in s tem proizvedel 1,7 MW energije, a le za kratek čas. 22. septembra 1997 so postavili svetovni rekord v proizvodnji energije v eni sekundi v višini 16,1 MW ob uporabi D-T goriva (JET history, 2020).



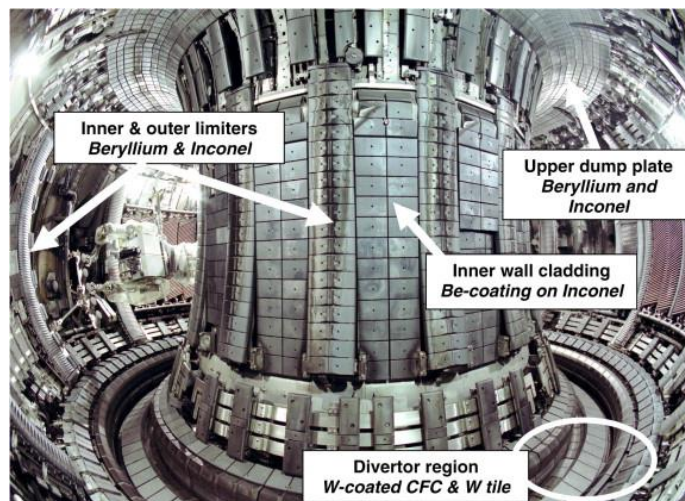
Slika 5: JET reaktor (Vir: [www.euro-fusion.org](http://www.euro-fusion.org))

ITER reaktor v Franciji je nadgradnja JET reaktorja. Na podlagi uspešnih izvedb v JET reaktorju, so v aprilu 2006 pričeli z zasnovo ITER reaktorja. Zasnovan je za proizvodnjo 500 MW, ki naj bi trajala 500 sekund. Gradnja bi se naj zaključila leta 2025. Eksperimentalni reaktor ITER bo deloval na fuzijo devterija in tritija. Tritij bo nastajal z jedrsko reakcijo, iz elementa litija, v reaktorjevem plašču (JET history, 2020).

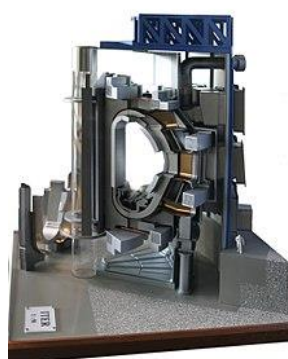


Slika 6: Primerjava med JET in ITER reaktorjem (Vir: [www.euro-fusion.org](http://www.euro-fusion.org))

Na sliki 7 je prikaz uporabljenih materialov v reaktorju. Uporabili so Berilij, Inkonel (= zlitina na osnovi niklja in kroma, ki je oksidacijsko-korozijsko odporen material, primeren za uporabo v ekstremnih pogojih) in Wolfram (Barabash idr., 2007).



Slika 7: Prikaz uporabljenih materialov v ITER (Vir: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com))



Slika 8: Model preseka tokamaka ITER (Vir: Chabolla, 2017)

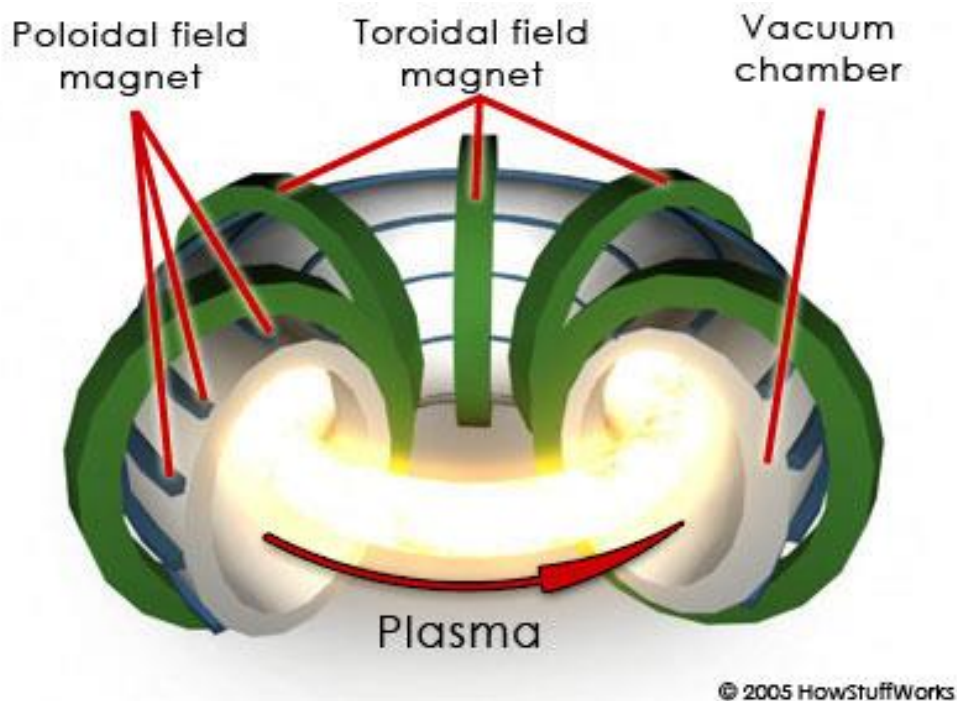
Izgradnja magnetnih reaktorjev je najbolj enostavna, magnetno polje, ki plazmi onemogoča stik s stenami reaktorja ter s tem konec reakcije, pa je v obliki torusa (obročja v obliki napihnjene zračnice). Na žalost lahko plazma v reaktorju ostane ujeta največ eno uro, nato je potrebna zamenjava, ki povzroči tveganje, da bi električne energije (npr. v mestu) zmanjkalo (Košmrlj, 2011).

Druga oblika reaktorja je stelarator, pri katerem so magneti nepravilnih zavitih oblik. To jim omogoča, da lahko plazmo ohranijo tudi po več let, njeno dodajanje pa je možno med samim obratovanjem. Po iznajdbi stelaratorjev, nekje na sredini dvajsetega stoletja, so tokamaki dobili konkurenco (Stellarator, 2020).

Obe vrsti reaktorjev sta se soočali z enakimi težavami, toda iz različnih razlogov. Tako je zanimanje za stelaratorje do devetdesetih let prejšnjega stoletja upadlo, javnost so bolj navdušili reaktorji tipa tokamak. V devetdesetih letih so zaradi nekaterih slabosti reaktorjev tokamak, stelaratorji pri fizikih ponovno vzbudili zanimanje.

## 2.4 Opis magnetnega reaktorja

Magnetni reaktor deluje na principu menjavanja polov magneta, ki je priključen na elektriko. Takšnih magnetov je več (na sliki 9 so prikazane tuljave za poloidalno in toroidalno magnetno polje), sklenjenih v krog. Zato se magnetna snov med njimi vrtil oz. sledi svojemu polu medtem, ko ga drugi pol odganja v stran (ta princip je odkril Nikola Tesla). Zaradi dovolj velike hitrosti se vodikova plazma ogreje in stisne, tako da nastane dovolj velika temperatura in tlak. Tukaj igrata pomembno vlogo tudi centrifugalna in centripetalna sila (Freudenrich, 2020).



Slika 9: Magnetni reaktor (Vir: how stuff works)

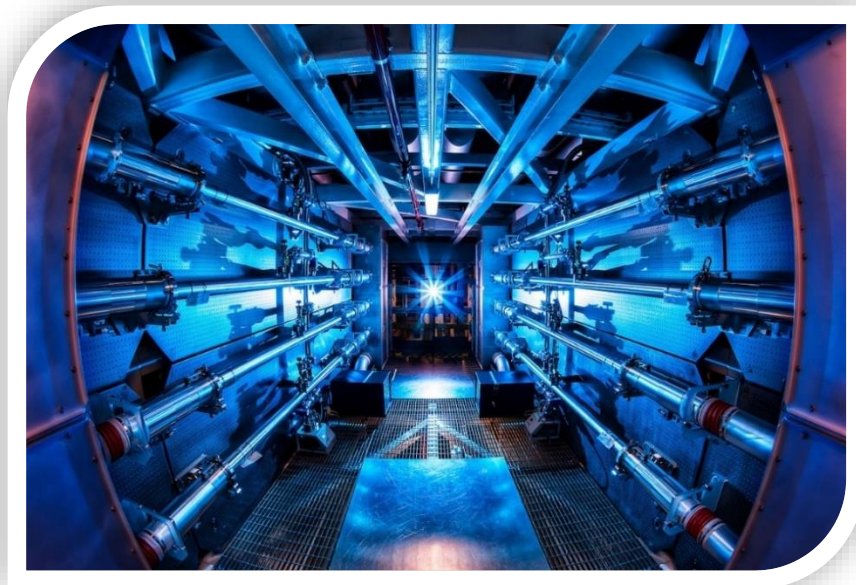
Toroidalno magnetno polje: polje, katerega silnice potekajo v oblik koncentričnih krožnic s središčem na glavni osi torusa. Njegova primarna funkcija je zadrževanje plazme. Toroidalno polje ustvarja tuljava, ki je navita okoli torusa. Geometrija navitja (navitje tuljave je bolj gosto na notranji strani torusa, kot na zunanji) pomeni da je polje močnejše bližje glavni osi. Zaradi tega pride do lezenja oz. "drifta" delcev. Poleg tega so delci podvrženi tudi ukrivljenostnemu lezenju, zaradi ukrivljenosti samega torusa (Freudenrich, 2020).

Poloidalno magnetno polje je polje, katerega silnice se ovijajo okoli silnic toroidnega polja. Funkcija poloidalnega polja je nevtraliziranje lezenja, torej zadrževanje plazme stran od sten reaktorja. Poloidalno polje ustvarja sama plazma, s tem ko teče okoli torusa, horizontalne poloidalne tuljave zunaj torusa ter vertikalno glavno navitje, katero z izmeničnim tokom tudi poganja plazemski tok po principu transformatorja. Magnetna polja se vektorsko seštevajo in tako silnice vsote toroidalnega in poloidalnega polja potekajo vzdolž torusa v obliki spirale. Taka konfiguracija magnetnega polja nam zagotavlja mešanje nabitih delcev. S tem se močno zmanjša električno polje in posledično  $E \times B$  lezenje. Poleg tega je kot rotacije silnic okoli male osi, pri enem vrtenju za kot  $2\pi$  okoli velike osi, odvisen od razdalje od centra cevi. Silnice v centru se tako le malo ovijajo, silnice blizu roba cevi pa bolj. Zaradi tega pride do magnetnega striženja, kar radialno lokalizira kolenske motnje in motnje zaradi lezenja (Freudenrich, 2020, Magnets, 2020).

## 2.5 Opis laserskega reaktorja

Laserski reaktor deluje tako, da več zelo močnih laserjev usmerimo v eno točko kjer je, zaradi laserjev, zelo visoka temperatura in ima plazma dovolj dobre pogoje za nastanek.





Slika 10: Laserski reaktor v National Ignition Facility v ZDA (Vir: [www.physicsworld.com](http://www.physicsworld.com))

Laserski reaktor na sliki deluje na način, da usmerijo 192 impulznih laserskih žarkov na notranjo površino centimetrskega votlega kovinskega cilindra, imenovanega hohlraum. V notranjosti je kapsula za gorivo, ki predstavlja približno 2 mm votlo kroglo s tanko plastjo devterij-tritija. Vsak impulz traja le nekaj nanosekund, laserji pa lahko oddajo približno 1,8 MJ energije. Ta močna eksplozija povzroči, da se kapsula hitro vsrka, kar ustvarja ogromne temperature in pritiske znotraj osrednje "vroče točke", kjer se posledično pričnejo pojavljati fuzijske reakcije (Košmrlj, 2011).

## 2.6 Delovanje fuzijskih reaktorjev

Fuzijske reakcije zavira električna odbojna sila, imenovana Coulomb-sila, ki deluje med dvema pozitivno nabitima jedroma. Da bi se zlitje zgodilo, se morata obe jedri približati drug drugemu z veliko hitrostjo, da bi premagali električno odbojnost in dosegli dovolj majhno ločitev (manj kot en trilijonta centimetra), da bi začela prevladovati močna sila kratkega dosega. Za proizvodnjo koristnih količin energije mora biti večje število jeder podvrženo fuziji; to pomeni, da se mora proizvajati plin fuzijskih jeder. Povprečno jedro v plinu pri izredno visokih temperaturah vsebuje dovolj kinetične energije, da lahko pride do samega zlitja. Tak medij lahko nastane s segrevanjem navadnega plina, ki presega temperaturo, pri kateri elektroni izločajo svoje atome. Rezultat je ioniziran plin, sestavljen iz prostih negativnih elektronov in pozitivnih jeder. Ta ionizirani plin je v obliki plazme, četrtega agregatnega stanja snovi. Ne preseneča nas dejstvo, da je večina snovi v vesolju, prav v stanju plazme (Freudenrich, 2020).

Struktura fuzijskega reaktorja:

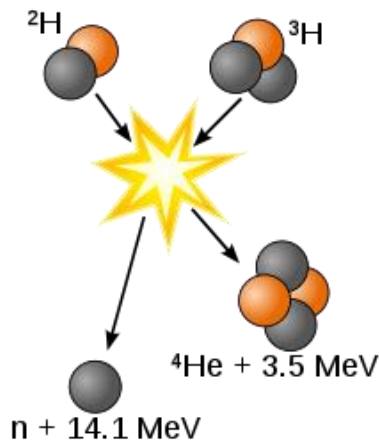
- Vakuumska posoda - drži plazmo in drži reakcijsko komoro v vakuumu.
- Brizgalka nevtralnih žarkov (ionski ciklotronski sistem) - vbrizga pramene delcev iz pospeševalnika v plazmo, da pomaga segrevati plazmo na kritično temperaturo.
- Tuljave magnetnega polja (poloidne, toroidne) - super prevodni magneti, ki z magnetnimi polji omejujejo, oblikujejo in vsebujejo plazmo.
- Transformatorji / centralni solenoid - dovajajo električno energijo magnetnim tuljavam.
- Hladilna oprema (crostat, cryopump) - ohladi magnetne.
- Odevni moduli - narejeni iz litija; absorbirajo toploto in visokoenergetske nevtrone iz fuzijske reakcije.
- Diverzorji - izčrpavajo helijeve produkte fuzijske reakcije.
- Magnetni jedrski reaktorji uporabljajo super močne elektromagnete hlajene s helijem (Freudenrich, 2020).

## 2.7 Sevanje pri fuziji<sup>4</sup>

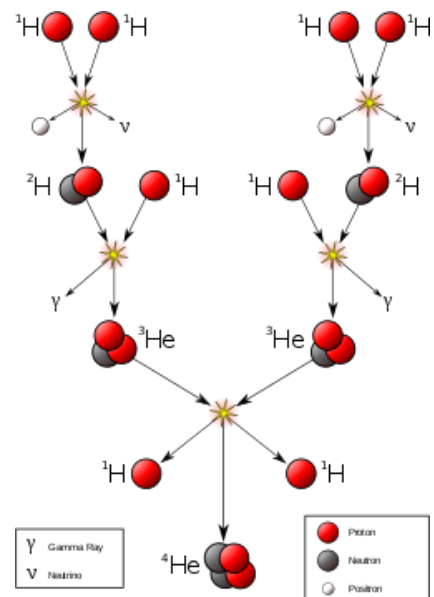
V osnovi je sevanje oddajanje ali prenos energije v obliki elektromagnetnih valov. Ti se ne prenašajo kot ostale vrste valovanj saj jim "material" za prenos predstavljajo osnovni delci imenovani fotoni. To daje sevanju sposobnost prenosa preko vakuma, brez katere bi danes na Zemlji težko obstajalo življenje. Sevanje lahko glede na energetske vsebnosti razdelimo na ionizirajoče in neionizirajoče sevanje. Razlikujeta se v tem, da ionizirajoče zaradi visoke energetske vsebnosti povzročata ionizacijo (uhajanje elektronov iz atoma), med tem ko neionizirajoče sevanje zaradi nižje energetske vsebnosti ne ionizira delcev, kar lahko razberemo že iz imena. Iz tega razloga je zdravju nevarno ionizirajoče sevanje, ki ima zmožnost povzročitve trajne poškodbe DNA.

V današnjem času sevanje v glavnem merimo v nSv/h (nano sivertih na uro), ki nam povedo kolikšno dozo ionizirajočega sevanja prejme predmet v eni uro. Prav tako obstajajo številne naprave namenjene merjenju sevanja. V našem primeru smo uporabili scintilator (podrobnejši opis v pod poglavju 3.4). Pomembno še bi bilo omeniti, da moč sevanja pada s kvadratom razdalje kar pomeni, da bo moč sevanja pri razdalji A, ki je 2-krat krajša od razdalje B, 4-krat večje od moči sevanja na razdalji B.

Zmotno je razmišljanje, da pri jedrski fuziji do sevanja ne prihaja. Ali bo reakcija fuzije radioaktivna ali ne je odvisno od tega, katera reakcija zlivanja jeder se odvija. Tako je recimo reakcija med devterijem in tritijem radioaktivna (Slika 11), saj ima tritij zaradi nestabilne zgradbe jedra radioaktivne lastnosti. Reakcija zlivanja šestih jeder helija (Slika 12) je radioaktivna zaradi nastanka gama fotonov, kateri imajo zaradi svoje energetske prepojenosti zmožnost povzročitve razdora molekule DNA. Po druga strani pa obstajajo tudi neradioaktivne reakcije, kot je recimo zlivanje devterija in helijevega 3 atoma (atoma helija z samo enim nevtronom), pri kateri ne nastaja radioaktivna snov. Na žalost je za to reakcijo potrebna višja temperatura, kakor pri zlivanju devterija in tritija, zato se pojavi vprašanje, katera reakcija je ugodnejša. Na to vprašanje bomo odgovorili v eni izmed naslednjih hipotez.



Slika 11: Zlivanje devterija in tritija



Slika 12: Reakcija zlivanja šestih jeder helija (He)

<sup>4</sup> Povzeto po Elektromagnetno valovanje, 2019, Does nuclear fusion produce radiation like nuclear fission?, 2012, The Most Radioactive Places on Earth, 2014

### 3. EMPIRIČNI DEL

Raziskovalni del naloge smo namenili potrjevanju ali zavrnitvi hipotez in teze. Hipoteze in teza, ki smo si jih določili so:

- H1 – "Najproduktivnejša fuzijska reakcija je reakcija šestih vodikov"
- H2 – "Reakcija 3He jedra in devterija je bolj smiselna, kakor reakcija 3H jedra in devterija"
- T3 – "Poznavanje jedrske fuzije med ljudmi je nizko"
- H4 – "Radiacija je bolje absorbirana z gostejšimi materiali"

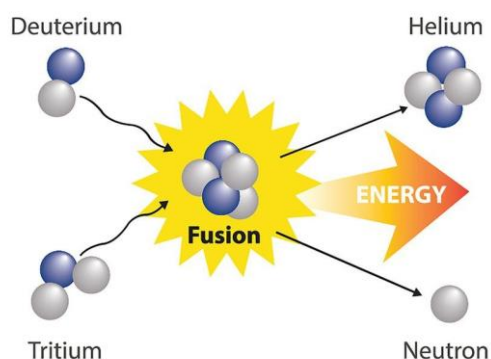
#### 3.1 Hipoteza 1 - "Najproduktivnejša fuzijska reakcija je reakcija šestih vodikov".

Kot smo predstavili v prejšnjem poglavju, obstajajo različni procesi jedrske fuzije, ki bi jih lahko uporabili pri pridobivanju energije. S tem smo vam razkrili absurdnost pogojev, ki so potrebni, da reakcija poteče, zato vsak dodaten kanček energije v tem procesu šteje. Tako bi bilo smiselno določiti, katera reakcija nam sprosti največ energije.

Naša metodologija pri tej hipotezi je analiza strokovne literature.

Energetsko učinkovitost reakcije lahko v našem primeru samo izračunamo, zato bomo obrazložili, kako smo to izvedli.

Pri reakciji jedrskega zlitja vsota mas reaktantov ni enaka vsoti mas produktov. Izgubljena masa se v tem primeru pretvori v energijo. Ta se pojavi v obliki sevanja in kinetične energije, ki jo dobijo produkti. Enačbo za pretvorbo mase v energijo nam je prikazal že Albert Einstein. Ta pravi da je nastala energija enaka produktu izgubljene mase (razlike mas) in kvadratu svetlobne hitrosti ( $E= mc^2$ ) (Asimov, 2015). Pri reakciji med devterijem in tritijem tako nastane 17,6 MeV (mega elektro volt).



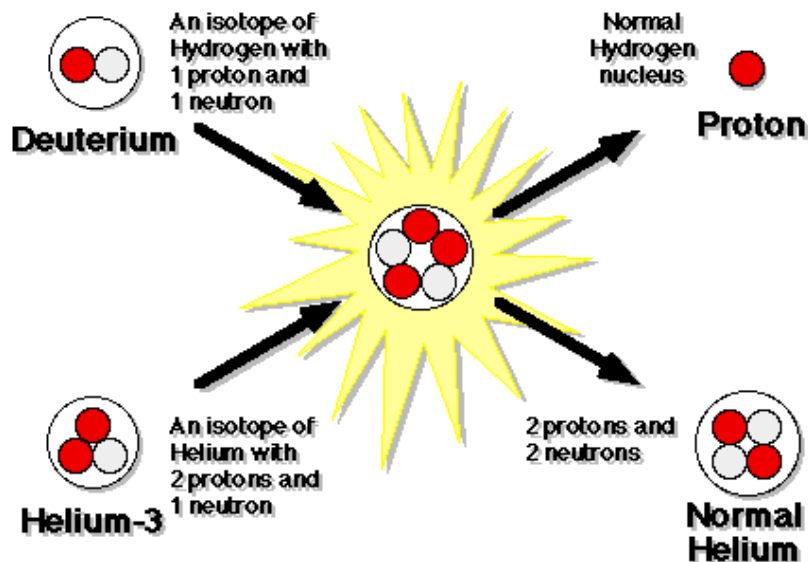
V tem primeru se pri pretvorbi vsote mase devterija in tritija v vsoto mase helija in nevtrona izgubi 0,019431u (podano v atomski masi), saj je: (devterij + tritij) - (helij + nevtron) = (2,013553u + 3,016049u) - (4,001506u+1,008665u) = 0,019431u.

To je približno enako  $3,23 \cdot 10^{-29}$ kg.

Sedaj izračunamo samo še energijo:

$E=mc^2 = (3,23 \cdot 10^{-29}) \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 2,91 \cdot 10^{-12}$ J , kar je približno enako 17,6MeV energije.

Če uporabimo enak postopek ugotovimo, da pri zlitju He-3 in devterija nastane 18,3 MeV.



Slika 13: Reakcija zlitja He-3 in devterija

Zelo znana reakcija, ki se prav tako odvija v zvezdah, je proton-proton reakcija, ki je razdeljena na tri faze (glej sliko 12)

Torej pridemo do ugotovitve, da pri reakciji He-3 in devterija nastane več energije, kot pri reakciji devterija in tritija, pri proton-proton reakciji pa je nastale energije največ. Pri prvi fazi nastane kar 1,442 MeV energije, če pozitrona uspešno trčita z elektronoma. V drugi fazi nastane 5,49 MeV, medtem ko v tretji fazi nastane 26,732 MeV.

Tako očitno največ energije nastane pri proton-proton reakciji, za tem pri zlivanju He-3 in devterija, najmanj pa pri zlivanju devterija in tritija.

S predstavljenim izračunom je **Hipoteza 1 potrjena**.

### 3.2 Hipoteza 2 - "Reakcija $^3\text{He}$ jedra in devterija je energetsko koristnejša, kot reakcija $^3\text{H}$ jedra in devterija"

Zaradi prezahtevne izvedbe, bomo reakcijo proton-proton izločili, saj se zahtevnost le-te z višjimi fazami večja, torej za uporabo na Zemlji ni primerna...

Naša metodologija pri tej hipotezi je analiza strokovne literature.

Razliko v zahtevnosti med reakcijo tritij-devterij in tritij-devterij nam določi enačba za Coulombovo mejo (orig. iz angleščine Coulomb Barrier). Le-ta nam pove, koliko energije je potrebne, da delci premagajo svoj naboj in se lahko drug drugemu približajo dovolj, da nanje začne delovati privlačna jedrska sila drugih delcev (Coulomb Barrier for fusion, 2020).

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_b}{R_a + R_b}$$

Slika 14: Na sliki je enačba za Coulombovo mejo, kjer je "e=naboj protona", "R=jedrski premer delca, ki se veže", "Z=atomska število delca, ki se veže", " $\epsilon_0$ =dielektrična konstanta= $8,854\ 187\ 817 \cdot 10^{-12} \text{ s}^4 \text{ Am}^{-1} \text{ V}^{-1}$ "

Iz enačbe lahko ugotovimo, da dodaten proton heliju prispeva k Coulombovi meji, enaki dva-kratniku tritijeve. K temperaturi potrebni za stabilno reakcijo prispevajo tudi drugi dejavniki, prav tako večinoma na tritijevi strani. Tako več pridobimo z reakcijo tritij-devterij, pri kateri pa bi, zaradi radioaktivnosti,

morali kvalitetnejše izolirati reaktorje pred radiacijo. Iz tega razloga se naslednja hipoteza navezuje na raziskovanje preprečevanja radiacije.

S pomočjo Einsteinove enačbe ( $E=mc^2$ ) smo ugotovili, da reakcija  $^3\text{He}$  jedra in devterija proizvede več energije kot reakcija T-D cikla, vendar je, zaradi omenjenih vzrokov, koristnejša in s trenutno tehnologijo veliko bolj smiselna reakcija tritija in devterija. **Hipoteza je ovržena!**

To dokazuje tudi dejstvo, da je za reakcijo tralfija in devterija potrebne veliko več vhodne energije, kot za reakcijo tritija in devterija. Za stabilno reakcijo tralfija in devterija so torej potrebne veliko višje in težje dosegljive temperaturne vrednosti, kar pa je pomemben vidik pri odločitvi znanstvenikov, katero reakcijo jedrske fuzije bodo uporabljali za proizvodnjo zelene energije.

### 3.3 Teza 3 - "Poznavanje jedrske fuzije med ljudmi je nizko"

Po premisleku smo se odločili, da bomo kot raziskovalni postopek pri določanju resničnosti dane teze uporabili anketne vprašalnike. Le-te smo v pisni obliki razdelili 132-im ljudem, trije strokovnjaki so anketo prejeli v elektronski obliki. Zraven omenjenih strokovnjakov, so v anketi sodelovali tudi učitelji in učenci iz treh različnih osnovnih šol v podravski regiji. Sodelovali so le učenci 8. in 9. razredov, saj mlajše generacije v učnem načrtu fizike še nimajo. Ker jedrske fuzije v učnem načrtu za osnovno šolo ne najdemo, so odgovori anketirancev odvisni od njihovega splošnega znanja. Iz tega razloga reševalcev nismo delili po razredih, ampak po starostnih skupinah. Kadar v nadaljevanju navedemo kakršnekoli skupne izvlečke anket, v le-te niso vključeni odgovori iz strokovnega kroga, razen če je to izrecno zapisano.

#### 3.3.1 Zgradba ankete

Naša anketa je vsebovala naslednja vprašanja:

- Spol, starost, izobrazba
- Vsi smo se v življenju že srečali s fiziko. Kakšne so Vaše izkušnje na tem področju?
- Ste se s pojmom jedrska fuzija že srečali?
- Kaj je jedrska fuzija?
- Stranski produkt jedrske fuzije je sevanje. Ali meniš, da je zaščita pred sevanjem potrebna?
- Zakaj?
- Katero možnost za zmanjšanje količine sevanja bi izbrali Vi?
- Kateri material bo po vašem mnenju najbolje vpiljal sevanje?

Anketo smo priložili v prilogi 1.

## **MODUSI VSEH PREJETIH ODGOVOROV**

(Izključeni so podatki o starosti, spolu, izobrazbi in ubesedeni odgovori)

LEGENDA:

    = Najpogostejši odgovor (modus)

    = Drugi najpogostejši odgovor

### **Vsi smo se v življenju že srečali s FIZIKO. Kakšne so Vaše izkušnje na tem področju?**

a) Fizika me ne zanima, čeprav mi gre dobro od rok.

b) Fizika me ne zanima in mi ne leži.

    c) Fizika me zanima, kljub temu da mi ne leži.

č) Fizika me zanima in mi gre dobro od rok.

NI ODGOVORA

### **Ste se s pojmom jedrska fuzija že srečali?**

a) Prvič slišim...

    b) Zveni mi znano, a ne vem kam bi pojem umestil.

c) Da, pojem poznam.

NI ODGOVORA

### **Kaj je jedrska fuzija?**

a) Gre za miselno tehniko, pri kateri si s pomočjo fizikalne asociacije, zapomnimo nek vrstni red.

    b) Zlivanje atomskih jeder, pri katerem se lažja jedra zlivajo v težja.

c) Proces, ki ga s pridom izkorišča tudi jedrska elektrarna Krško.

č) Način odzemanja atomskega jedra iz atoma nekega elementa, s pomočjo laserske tehnologije.

NI ODGOVORA

### **Stranski produkt jedrske fuzije je sevanje. Ali meniš, da je zaščita pred sevanjem potrebna?**

    DA

NE

    NI ODGOVORA

### **Znanstveniki imajo na voljo dve možnosti za zmanjšanje ali izničenje količine sevanja. Obkroži tisto, za katero misliš, da se bolj obrestuje.**

1) Uporabili bi prilagojeno mešanico goriva. Na žalost bi za zagon reakcije s tem gorivom, potrebovali kar milijardo stopinj Celzija.

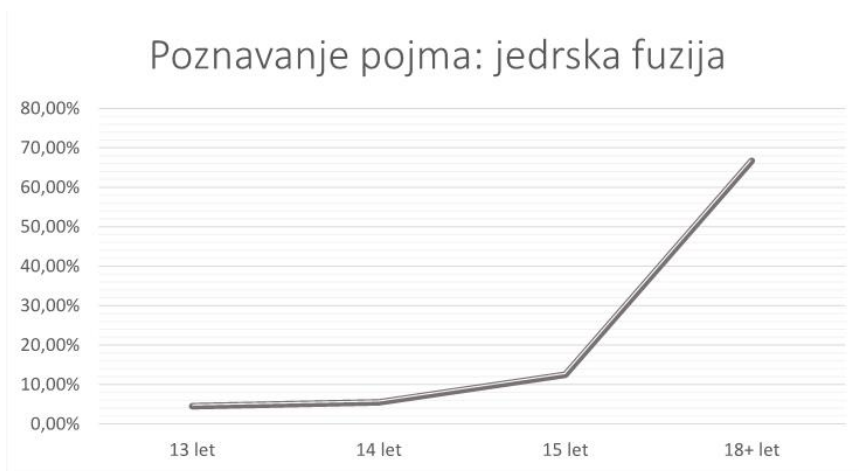
    2) Naprave bi opremili z materialom, ki bi vpiljal sevanje.

    NI ODGOVORA

Prejeti odgovori so še podrobneje predstavljeni v Prilogi 2.

### 3.3.3 Analiza nekaterih prejetih odgovorov

a) V analizo poznavanja pojma jedrska fuzija smo vključili dva vprašanja - Ste se s pojmom jedrska fuzija že srečali? in Kaj je jedrska fuzija?

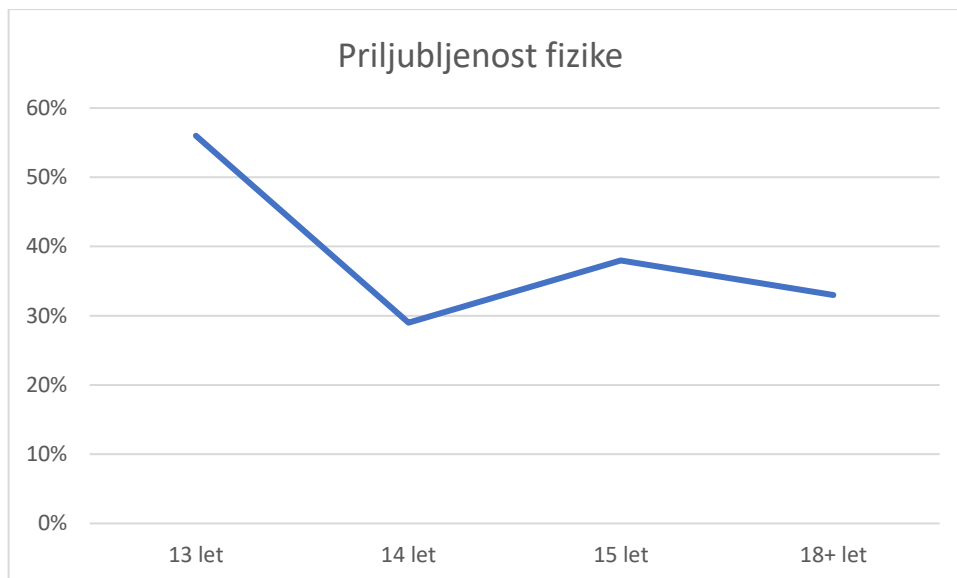


Slika 15: Odvisnost procenta poznavalcev od starosti

Zgornji graf prikazuje naraščajoče poznavanje danega pojma, glede na starostno skupino udeležencev. To nam dokazuje, da je pojem bolje poznan pri starejši populaciji.

V kategorijo poznavalcev smo vključili osebe, ki trdijo, da pojem poznajo in so procesu nadedli tudi pravilno definicijo. Osebe, ki izpolnjujejo le enega izmed obeh pogojev ali celo nobenega, smo v zgornjem grafu zanemarili. Tako v grafu ni trinajstletnika, ki je trdil da jedrsko fuzijo pozna, a ji je pripisal lastnosti fisije. To dokazuje, da mnogi pojma še vedno zamenjujejo.

b) Analiza vprašanja Vsi smo se v življenju že srečali s fiziko. Kakšne so Vaše izkušnje na tem področju? odgovarja na vprašanje v kolikšnem delu je fizika vključena v posameznikovo življenje



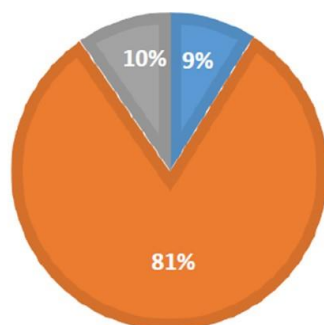
Slika 16: Prikaz popularnosti fizike, glede na starost anketirancev, v odstotkih.

Iz prikaza lahko sklepamo, da so mlajši otroci, ki so s fiziko komajda pričela, nad le-to bolj navdušeni, kakor starejše generacije. Fizika je v osmem razredu osnovne predvsem eksperimentalne narave, medtem ko kasneje postaja vse bolj računska... Morda je prav to razlog za nastali rezultat.

c) Z analizo odgovora na vprašanje: Katero možnost za zmanjšanje količine sevanja bi izbrali Vi? smo želeli ugotoviti ali se anketiranci zavedajo nevarnosti sevanja, medtem ko so rezultati navdihnili vključitev hipoteze 4 v raziskovalno nalogo.

### ODGOVORI VSEH ANKETIRANCEV NA VOLJO STA 2 MOŽNOSTI ZA ZMANJŠANJE OZ. IZNIČENJE KOLIČINE SEVANJA. KATERO BI IZBRALI VI?

■ Možnost 1 ■ Možnost 2 ■ Ni odgovora



Slika 17: Prikaz mnenj anketiranih o izbiri postopka zoper sevanja

#### LEGENDA:

**MOŽNOST 1:** Uporabili bi prilagojeno mešanico goriva. Na žalost bi za zagon reakcije s tem gorivom, potrebovali kar milijardo stopinj Celzija.

**MOŽNOST 2:** Naprave bi opremili z materialom, ki bi vpijal sevanje.

Večina anketirancev se je odločila za možnost 2, s čemer dokazujejo poznavanje dejstva, da nas pred sevanjem lahko zaščitijo ustrezni materiali.

To vprašanje je, skupaj s "Kateri material bo po vašem mnenju najbolje vpijal sevanje?", pomembno za izvedbo Hipoteze 4.

#### UGOTOVITEV TEZE

Na podlagi prejetih rezultatov smo **zastavljeno tezo lahko potrdili**. Zaradi pomanjkanja anketirancev v odrasli starostni skupini, število poznavalcev pojma najverjetneje ni realno, a močno nakazuje na zvišanje trenda poznavanja. Ugotovili smo, da starejši učenci pojem poznajo bolje, kakor mlajši, toda odstotek poznavalcev še zdaleč ni zadovoljiv. Če v izračun vključimo tudi odgovore strokovnjakov (da nekoliko izenačimo strani), ugotovimo da jedrsko fuzijo pozna le slabih 9% vseh anketiranih.



### 3.4 Hipoteza 4 - "Radiacija je bolje absorbirana z gostejšimi materiali"

V četrti hipotezi smo predpostavili, da gostejši elementi bolje zaustavljajo sevanje. To smo predpostavili zato, ker smo predvidevali, da gostejši kot je material, manj ioniziranih delcev bo prišlo skozi le-tega. Za raziskavo zastavljene hipoteze smo uporabili tudi odgovore anketirancev na zadnje vprašanje v anketi.

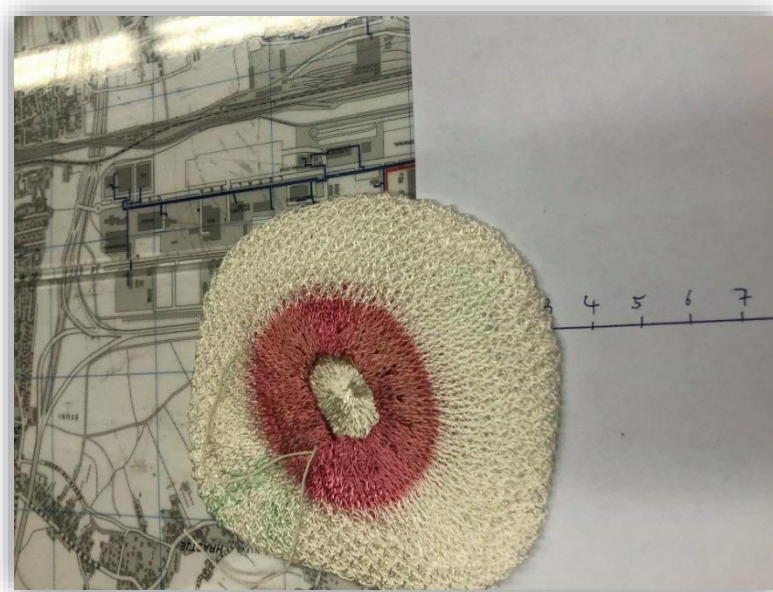
Kot raziskovalno metodo pri tej hipotezi smo uporabili metodo eksperimenta.

V ponedeljek 17.2.2020, smo se odpravili v Ljubljano, na Fakulteto za strojništvo Univerze v Ljubljani, da bi naredili eksperiment. Eksperiment smo izvedli v laboratoriju fakultete, med eksperimentom nas je vodil somentor, Grega Belšak, mag. astrofizike.

Ugotovili smo, da se pri jedrski fuziji sprošča tudi sevanje. Sevanje se sprošča med samo reakcijo, in po reakciji, med pretvarjanjem energije v elektriko. Pri eksperimentu smo preverjali kateri materiali najbolj zavirajo sevanje.

Na začetku nam je g. Belšak razložil kakšne vrste sevanja poznamo in njihove značilnosti. Poznamo tri vrste sevanja in sicer alfa sevanje, beta sevanje in gama sevanje. Alfa sevanje je najmanj nevarno, ker izzveni že po nekaj prepotovanih centimetrih, medtem ko se beta sevanje izgubi po nekaj metrih prepotovanih v zraku, zato je srednje nevarno. Gama sevanje je najnevarnejše, saj se izgubi komaj po nekaj kilometrih prepotovanih v zraku.

Za naš eksperiment smo uporabili alfa sevanje, ki ga je povzročala torijeva mrežica, saj je najmanj nevarno zdravju. Torijeva mrežica je priprava, ki vsebuje reaktivni element torij, ki oddaja minimalno količino sevanja. Torijeva mrežica je torej vir samega sevanja, pri čemer vir energije pri le-tej izhaja iz fisije.



Slika 18: Uporabljena Torijeva mrežica v eksperimentu (Vir: lastni arhiv)

Izposodili smo si napravo, da smo lahko merili sevanje. Naprava se imenuje scintilacijski detektor, katerega sestavni del je scintilacijski števec. Scintilacijski števec je detektor sevanja, ki uporablja učinek, znan kot scintilacija. Scintilacija je bliskavica svetlobe, ki nastane v prozornem materialu s preходом delca (elektrona, alfa delcev, iona ali visokoenergijskega fotona). Scintilacija se pojavi v scintilatorju, ki je ključni del scintilacijskega detektorja. Na splošno je scintilacijski detektor sestavljen iz scintilatorja, ki ustvarja fotone kot odgovor na sevanje, fotodetektorja (navadno cev za fotomultiplikator (PMT), kamero, napolnjeno s pomočjo naprave (CCD), ali fotodioda), ki pretvori

svetlobo v električni signal, in elektronike (števec) za obdelavo tega signala (Scintillation counter, 2019).



Slika 19: Scintilator (Vir: lastni arhiv)

Najprej smo izmerili sevanje v prostoru brez vira sevanja, da smo lahko to potem odšteli od rezultatov, ki smo jih dobili z virom sevanja, in nato še z oviro med merilnikom in virom sevanja. Zatem smo zmerili še sevanje samega izvira brez ovire, da smo lahko primerjali te rezultate z tistimi, kjer je bila nastavljena prepreka.

Ko smo imeli te podatke, smo pričeli s samim eksperimentom. Najprej smo izmerili prepustnost sevanja skozi materiale, ki so bili predlagani na anketah. Vsakemu materialu smo izmerili debelino, zatem pa ga postavili neposredno med vir sevanja in merilec. Ker se zavedamo, da sevanje ni stalno (moč sevanja niha glede na število delcev, ki zadevajo merilec) smo izračunali povprečne vrednosti, ki nam jih je podala naprava. To smo izračunali, tako da smo račun napravili iz meritev, ki smo jih odčitali vsakih 5 sekund v časovnem intervalu 30-ih sekund.

Meritve smo potem računsko preračunali na isto debelino predmeta. Računska operacija nam je pokazala, kateri material nam ob enaki debelini zagotavlja največjo zaščito pred sevanjem.

V eksperimentu smo uporabili naslednje materiale:

- ✓ Aluminijasta folija
- ✓ Les
- ✓ Medenina
- ✓ Želatina (izdelali smo jo sami po navodilih proizvajalca – uporabili smo Preliv za torte, proizvajalca dr. Öettker)
- ✓ Bela folija
- ✓ Stiropor
- ✓ Steklo
- ✓ Goba
- ✓ Železo
- ✓ Črna plastika
- ✓ Ogledalo



### 3.4.2 Prikaz rezultatov

Rezultate smo analizirali s pomočjo Excelove tabele. Vstavili smo izmerjene podatke, material in njegovo debelino ter izmerjene vrednosti posameznih meritev (merili smo 30 sekund in zapisali rezultat vsakih 5 sekund; dobili smo 7 meritev). Vseh sedem meritev, ki smo jih opravili za posamezen material, smo uporabili za izračun povprečne vrednosti prepustnosti sevanja.

Od povprečne vrednosti smo odšteli vrednost sevanja prostora. S tem smo dobili število delcev, ki jih je material dejansko sam prepustil.

S pomočjo teh vrednosti smo se lotili računanja rezultatov prepustnosti materialov. Predpostavili in izračunali smo vrednosti prepustnosti materialov pri enaki debelini. Za izračun le-tega smo uporabili naslednjo formulo eksponentne funkcije:

$$N(d) = N(0) * \exp(-\mu * d)$$

Pri čemer je:

$N(d)$  = vrednost nsv/h pri  $d$

$N(0)$  = izhodiščna vrednost nsv/h, kadar med virom sevanja in aparatom ni ovire

$\mu$  = absorpcijski koeficient materiala<sup>5</sup>

$d$  = debelina materiala

*Enačba 1: Enačba za izračun vrednosti nsv/h pri določeni debelini materiala*

$N(0)$  smo izračunali tako, da smo iz zgornje enačbe izpostavili iskano spremenljivko.

$$N(0) = \frac{N(d)}{\exp(-\mu * d)}$$

*Enačba 2: Enačba za izračun izhodiščne vrednosti nsv/h, kadar med virom sevanja in aparatom ni ovire ( $N(0)$ )*

Uporabili smo izračunane vrednosti materiala železo, za katerega smo lahko na spletu našli vrednost njegovega absorpcijskega koeficienta.  $N(d)$  smo imeli podan, prav tako  $d$ .

Ko smo dobili  $N(0)$  smo morali izračunati še absorpcijski koeficient posameznega materiala. Za ta izračun smo uporabili naslednjo enačbo z upoštevanjem naravnega logaritma:

$$\mu = -\ln\left\{\frac{N(d)}{N(0)}\right\}/d$$

*Enačba 3: Enačba za izračun absorpcijskega koeficienta posameznega materiala*

Ko smo imeli vse podatke, smo se lahko vrnili k enačbi 1 in izračunali vrednosti nsv/h pri debelini 3 mm, 5mm in 10 mm.

---

<sup>5</sup> Absorpcijski koeficient materiala – (oznaka  $\mu$  ali  $\mu$ ) je snovna konstanta, ki nastopa pri absorpciji energijskega toka, ki z globino eksponenta pojema. Določen je kot recipročna vrednost tolikšne debeline absorbirajoče plasti, ki prepusti natanko  $1/e$  vpadne gostote energijskega toka

	debelina materiala (mm)	1. meritev (nsv/h)	2. meritev (nsv/h)	3. meritev (nsv/h)	4. meritev (nsv/h)	5. meritev (nsv/h)	6. meritev (nsv/h)	7. meritev (nsv/h)	povprečje meritev (nsv/h)	upoštevanje prostora (nsv/h)	absorpcijski koeficienti (mu)	nsv/h (5mm)	nsv/h (10 mm)	nsv/h (3mm)
prostor		88	87	84	83	84	82	80	80,69					
železo črna plastika	3,75	706	711	715	713	712	703	706	709,43	628,74	0,38	391,00	58,48	836,07
goba (stisnjena)	4	725	728	739	735	727	722	723	728,43	647,74	0,35	457,00	79,89	918,09
želatina	3,8	458	457	457	450	447	458	462	455,57	374,88	0,51	203,02	15,77	564,23
ogledalo	11	654	655	644	640	651	639	634	645,29	564,59	0,14	1302,54	649,00	1721,12
steklo	4	739	741	743	754	762	759	765	751,86	671,16	0,34	477,75	87,31	942,88
medenina	6	651	654	666	657	660	672	675	662,14	581,45	0,25	746,99	213,45	1232,89
stiropor	1	758	771	780	782	788	791	-	778,33	697,64	1,32	3,54	0,00	49,68
les	22	528	526	529	519	532	533	526	527,57	446,88	0,08	1749,79	1171,21	2054,60
	19	439	446	457	457	458	451	452	451,43	370,74	0,10	1563,54	935,14	1920,44

Tabela 1: Prikaz rezultatov pridobljenih z eksperimentom

Rezultati eksperimenta nam pokažejo, da je **medenina** najučinkovitejši material za zadrževanja alfa sevanja pri vseh prikazanih debelinah. Njen izračunan absorpcijski koeficient je tudi najvišji. Zanimiv podatek je tudi, da je **goba** drugi najučinkovitejši material. Sledijo jim **železo, črna plastika, ogledalo, steklo. Želatina** je celo pred **lesom** in **stiroporom**, ki je pristal na zadnjem mestu.

V tabeli manjkajo podatki nekaterih materialov – aluminijasta folija in bela folija. Ker je njuna uporabljena debelina znašala manj kot 1 mm, smo za njihov izračun uporabili obratne vrednosti enačbe. Žal pa tudi ta matematični pristop ni prispeval realnih rezultatov. Ker nas je priganjal rok za oddajo naloge, si bomo ta računski izziv prihranili za naslednji raziskovalni izziv.

**Hipoteza 4 je delno potrjena.** Predvsem iz razloga, da so se nam žal pri eksperimentu pojavljale napake, kar je dajalo nenatančne rezultate. Slednje se je predvsem izrazilo v kasnejših računskih operacijah. Rezultati pa so vseeno podali spoznanje, da imajo gostejši materiali višji absorpcijski koeficient, kar vpliva na višjo absorpcijo sevanja.

## 4. ZAKLJUČEK

Kaj je jedrska fuzija? Če ste si na to vprašanje znali odgovoriti, potem smo storili vse, kar je bilo potrebno. Začeti moramo z majhnimi koraki, zato je razumevanje pojma med ljudmi več kot odličen začetek. Ugotovili smo, da je pojem sploh med mladimi precej slabo utrjen, zaradi česar je vsak nov poznavalec zelo dobrodošel. S tem smo **potrdili tretjo tezo**, ki smo si jo zastavili na začetku. Rezultati so pokazali, da je razumevanje pojma pri odraslih večje, kot pri mlajših generacijah. To gre pripisati predvsem življenjskim izkušnjam, v nekaterih primerih pa tudi boljši izobrazbi, saj se je večina odraslih ljudi, nekoč učila srednješolske fizike.

Med drugim smo uporabljali tudi metodologijo preračunavanja, ki nam je dala precej jasne in zanimive rezultate. S pomočjo fizikalnih obrazcev in iz njih izpeljanih računov smo uspeli **potrditi prvo hipotezo**. Izkazalo se je, da je reakcija šestih vodikovih jeder res energetsko najproduktivnejša. Sledi ji reakcija He-3 in devterija, ki proizvede nekoliko manj energije. Najmanjše energijske vrednosti je prinesla reakcija med devterijem in tritijem, ki prinese le 17,6 MeV energije.

S pomočjo izračuna enačbe za Coulombovo mejo smo **ovrgli hipotezo 2**, reakcija  ${}^3\text{He}$  jedra in devterija ni energetsko koristnejša. Ob tem smo ugotovili tudi, da prva reakcija porabi tudi več vhodne energije, kar še poudari napačnost zadane hipotetične trditve.

Med preizkušenimi radiacijskimi izolatorji se je najbolje obnesla medenina. Zaradi omejene izbire materialov, ki so nam bili za preizkušanje na voljo, nekaj možnosti ni bilo mogoče testirati. Tako nismo preizkusili svinca, ki je bil tako med neseznanjenimi anketiranci, kot med strokovnjaki, največkrat naveden izolator. Po podatkih iz spleta lahko sklepamo, da je svinec verjetno najboljša izbira. Hipoteze, ki pravi, da gostejši materiali sevanje bolje izolirajo, **hipoteza 4**, nismo ne potrdili, ne ovrgli, smo jo **delno potrdili**. Zaradi napak, ki so se pojavile pri merjenju, so bili rezultati precej nenatančni. Prav ta nenatančnost je razlog, da je hipotezo zelo težko potrditi. Načeloma lahko opazimo osnovni vzorec, ki rahlo nakazuje zadano trditev, a vzorca zaradi pomanjkanja ustreznih podatkov, ne moremo sestaviti v celovit lik. Obstajajo materiali, ki kažejo odstopanja od hipoteze. Če je to zgolj posledica merskih napak ali realno stanje bo pokazala prihodnost. Zaenkrat naj to ostane skrivnost. Včasih je daljša pot boljša pot.

Primerjali smo reakcijo jedrske fuzije z reakcijo fisije in ugotovili, da sta si procesa nasprotna, na modrem planetu žal ne obratna. Seznanili smo vas z osnovami nukleosintetike in s pogoji, ki jih le-ta potrebuje ter se podali na potovanje v središča oddaljenih vsemogočnih zvezd. Med branjem ste izvedeli veliko novih in zanimivih informacij. Toda, ali smo vam odgovorili na vsa vprašanja?

Naše raziskave potrjujejo, da je jedrska fuzija obnovljiv vir prihodnosti. Le še nekaj tunelov nas loči do skrivnostne skrinje z zakladom, ki smo jo omenili že v uvodu. Po vsem, kar smo spoznali, si upamo dejati, da se v skrinji zagotovo skriva "ustekleničena zvezda", ki bo še v bližnji prihodnosti nadomestila potratna in škodljiva fosilna goriva. Ljudje smo skozi zgodovino dosegli marsikateri čudež. Nekaj, kar se je nekoč zdelo nemogoče, je danes del vsakdana. Še pred nekaj desetletji bi nam takšna raziskovalna naloga prinesla veličastno Nobelovo nagrado. Že to dejstvo, je dokaz hitrega znanstvenega napredka in nedvoumno potrjuje, da si bomo stanovanja nekoč ogrevali s pomočjo jedrskega zlivanja.

Le upamo lahko, da bodo ideje znanstvenikov ugledale luč sveta! V Franciji gradijo največjo jedrsko elektrarno do sedaj. Ta jedrska kraljica, imenovana ITER, je zelo pomemben korak k razumevanju delovanja jedrske fuzije na Zemlji in posledično uporabi jedrske fuzije na Zemlji. Upajmo, da bo s svojo veličino uspela zapreti vsa vprašanja, ki so kljub množičnemu prizadevanju znanstvenega sveta, še vedno ostala odprta. S to raziskovalno nalogo smo tudi mi pripomogli k temu in znanstvenikom pomagali prehoditi enega zadnjih hodnikov na poti do rešitve "fuzijskega" labirinta.

## 5. VIRI

### LITERATURA

1. BLIN-STOYLE, Roger. 2003. *Eureka: Fizika delcev, snovi in vesolja*. Založba Math, d.o.o.
2. *FIZIKA: Samostojni delovni zvezek s poskusi za fiziko v devetem razredu osnovne šole*. 2019. Ljubljana: Mladinska knjiga Založba, d.d.
3. FORJAN, Matej. *Fizika 3: Valovni pojavi, moderna fizika*. 2011. Šolski center Novo mesto.
4. *Kemija 8: Učbenik za 8. razred osnovne šole*. 2004. Ljubljana: Tehnična založba Slovenije, d.d.
5. *Moja prva FIZIKA: Učbenik za 9. razred osnovne šole*. 2016. Ljubljana: Modrijan založba, d.o.o.
6. NIELSEN HAUGAARD, Rolf. 2019. *Neizčrpen vir energije*. Science illustrated, avgust, št. 118, str. 14-23.

### SPLETNI VIRI

1. ASIMOV, Isaac. 2015. *Worlds Within Worlds: The story of nuclear energy*. Pridobljeno 14. januar 2020 na <http://www.gutenberg.org/ebooks/49821>
2. Barabash V., Peacock A., Fabritsiev S., Kalinin G., Zinkle S., Rowcliffe A., Rensman J.-W., Tavassoli A.A., Marmy P., Karditsas P.J., Gillemot F., Akiba M. *Materials challenges for ITER – Current status and future activities*. 2007. Journal of nuclear materials. Pridobljeno 14. januar 2020 na [https://lhc-collimation-project.web.cern.ch/ph2\\_meeting\\_files/Barabash%20ITER%20Materials%202007.pdf](https://lhc-collimation-project.web.cern.ch/ph2_meeting_files/Barabash%20ITER%20Materials%202007.pdf)
3. Chabolla, Jack. *International Thermonuclear Experimental Reactor*. 2017. Stanford University. Pridobljeno 23. februar 2020 na <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/chabolla1/>
4. *ITER*. 2018. Wikipedia.si. Pridobljeno 23. februar 2020 na <https://sl.wikipedia.org/wiki/ITER>
5. *Jedrske reakcije*. 2020. Pridobljeno 23. februar 2020 na [https://si.openprof.com/wb/jedrske\\_reakcije?ch=2972](https://si.openprof.com/wb/jedrske_reakcije?ch=2972)
6. Chen. Lun. *Energy in a Ton of Coal*. 2015. Hypertextbook.com. Pridobljeno 8. februar 2020 na <https://hypertextbook.com/facts/2006/LunChen.shtml>
7. *Coulomb Barrier for Fusion*. 2020. Hyperphysics. Pridobljeno 16. februar 2020 na <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/coubar.html>
8. *Devterij*. 2017. Wikipedia. Pridobljeno 16. januar 2020 na <https://sl.wikipedia.org/wiki/Devterij>
9. *Does nuclear fusion produce radiation like nuclear fission?* 2012. Reddit.com. Pridobljeno 8. februar 2020 na [https://www.reddit.com/r/askscience/comments/pzgw7/does\\_nuclear\\_fusion\\_produce\\_radiation\\_like/](https://www.reddit.com/r/askscience/comments/pzgw7/does_nuclear_fusion_produce_radiation_like/)
10. *Elektromagnetno valovanje*. 2019. Wikipedia. Pridobljeno 8. februar 2020 na [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_fusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion)
11. *Energija*. 2018. Wikipedia.si. Pridobljeno 8. februar 2020 na <https://sl.wikipedia.org/wiki/Energija>
12. *Foton*. Frozman.si. Pridobljeno 16. februar 2020 na <http://www.frozman.si/pdf/foton.pdf>
13. Freudenrich, Craig. *How Nuclear Fusion Reactor Works*. Pridobljeno 16. februar 2020 na <https://science.howstuffworks.com/fusion-reactor4.htm>
14. *Fusion power*. Wikiwand.com. Pridobljeno 16. februar 2020 na [https://www.wikiwand.com/en/Fusion\\_power](https://www.wikiwand.com/en/Fusion_power)
15. *Fusion Power Explained – Future or Failure*. 2016. Videoprodukcija. Pridobljeno 16. februar 2020 na <https://www.youtube.com/watch?v=mZsaaturR6E>
16. *Fuzijski centri v svetu*. Euro-fusion.org. Pridobljeno 23. februar 2020 na [https://www.eurofusion.org/fileadmin/user\\_upload/Archive/wp-content/uploads/2011/11/energy\\_sl.pdf](https://www.eurofusion.org/fileadmin/user_upload/Archive/wp-content/uploads/2011/11/energy_sl.pdf)

17. Gyergyek, Tomaž. *Fuzija – energijski vir prihodnosti*. Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani. Pridobljeno 14. januar 2020 na [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjJs5KxgdHmAhn\\_KQKHxVoAjoQFjAGegQIChAC&url=http%3A%2F%2Fsss.fmf.uni-lj.si%2Fdata%2F138.pdf&usg=AOvVaw3Lxs5gKFiGPB6faScPE\\_WY](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjJs5KxgdHmAhn_KQKHxVoAjoQFjAGegQIChAC&url=http%3A%2F%2Fsss.fmf.uni-lj.si%2Fdata%2F138.pdf&usg=AOvVaw3Lxs5gKFiGPB6faScPE_WY)
18. *Jedrsko zlivanje*. 2019 Wikipedia.si. Pridobljeno 6. december 2019 na [https://sl.wikipedia.org/wiki/Jedrsko\\_zlivanje](https://sl.wikipedia.org/wiki/Jedrsko_zlivanje)
19. *JET history*. Euro-fusion.org. Pridobljeno 23. februar 2020 na <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/jet-history/>
20. Košak, Igor. *Fuzija*. 2010. Pridobljeno 8. december 2019 na [file:///C:/Users/PC%20DOMA/Downloads/Ko%C5%A1ak\\_Igor.pdf](file:///C:/Users/PC%20DOMA/Downloads/Ko%C5%A1ak_Igor.pdf)
21. Košmrlj, Samo. *Fuzijski reaktor*. 2011. Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani. Pridobljeno 8. februar 2020 na [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjhtfjfdTmAhnHqQKHdtnAD8QFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fmafija.fmf.unilj.si%2Fseminar%2Ffiles%2F2010\\_2011%2FFuzijaDEMO.pdf&usg=AOvVaw1GnrHxNtCDE8IUir\\_oyM\\_da](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjhtfjfdTmAhnHqQKHdtnAD8QFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fmafija.fmf.unilj.si%2Fseminar%2Ffiles%2F2010_2011%2FFuzijaDEMO.pdf&usg=AOvVaw1GnrHxNtCDE8IUir_oyM_da)
22. *Magnets*. 2020. ITER. Pridobljeno 8. februar 2020 na <https://www.iter.org/mach/Magnets>
23. Najmabadi, Farokh. Prager Stewart C. *Fusion reactor*. 1999. Enciclopedia Britannica. Pridobljeno 16. februar 2020 na <https://www.britannica.com/technology/fusion-reactor>
24. *Nuclear fusion in stars – Nucleosynthesis*. Encantedlearnin.com. Pridobljeno 14. januar 2020 na <https://www.enchantedlearning.com/subjects/astronomy/stars/fusion.shtml>
25. *Nucleosynthesis*. Sciencedaily.com. Pridobljeno 22. januar 2020 na <https://www.sciencedaily.com/terms/nucleosynthesis.htm>
26. *Osnovni delci v atomu*. Kemija 1, spletni učbenik. Pridobljeno 22. januar 2020 na <https://eucbeniki.sio.si/kemija1/481/index2.html>
27. *Scintillation counter*. Wikipedia. 2019. Pridobljeno 8. februar 2020 na [https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation\\_counter](https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation_counter)
28. Sharp Tim. *What is sun made of?* 2017. Space.com. Pridobljeno 22. januar 2020 na <https://www.space.com/17170-what-is-sun-made-of.html>
29. *Stellarator*. 2020. Wikipedia.org. Pridobljeno 8. februar 2020 na <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Stellarator>
30. Statistični urad Republike Slovenije. Stat.si. Pridobljeno 1. marec 2020 na <https://www.stat.si/StatWeb/>
31. *The Most Radioactive Places on Earth*. 2014. Videoprodukcija. Pridobljeno 16. februar 2020 na <https://www.youtube.com/watch?v=TRL7o2kPqw0>
32. Tomšič, Matic. *V laboratoriju delajo svojo zvezdo, ta lahko reši eno od največjih težav človeštva*. 2016. Siol.net. Pridobljeno 14. januar 2020 na <https://siol.net/digisvet/novice/v-laboratorijudelajo-svojo-zvezdo-ta-lahko-resi-eno-od-najvecjih-tezav-clovestva-431219>
33. *Tritij*. 2019. Wikipedia. Pridobljeno 16. januar 2020 na <https://sl.wikipedia.org/wiki/Tritij>
34. *Zgradba atoma*. Kemija 8, spletni učbenik. Pridobljeno 22. januar 2020 na <https://eucbeniki.sio.si/kemija8/935/index.html>
35. Wolchover, Natalie. *What is Sun Made of and When Will it Die?* 2018. Quantamagazine.org. Pridobljeno 1. marec 2020 na <https://www.quantamagazine.org/what-is-the-sun-made-ofand-when-will-it-die-20180705/>



## PRILOGA 1

Pred vami je anonimna anketa iz področja jedrske fuzije. Prosimo vas, da izpolnite spodnja polja. Vneseni podatki bodo obravnavani v okviru raziskovalne naloge, vprašanja pa se nanašajo predvsem na sevanje, ki je lahko posledica fuzijskih reakcij.

**SPOL (obkroži):**    M      Ž      **STAROST:**      \_\_\_\_\_ let

**IZOBRAZBA:** \_\_\_\_\_  
(če še imate nedokončano izobrazbo, ali menite, da so vam bolj blizu **naravoslovni ali družboslovni** predmeti (**podčrtaj**))

**Vsi smo se v življenju že srečali s FIZIKO. Kakšne so vaše izkušnje na tem področju?**

- a) Fizika me ne zanima, čeprav mi gre dobro od rok.
- b) Fizika me ne zanima in mi ne leži.
- c) Fizika me zanima, kljub temu da mi ne leži.
- č) Fizika me zanima in mi gre dobro od rok.

**Ste se s pojmom jedrska fuzija že srečali?**

- a) Prvič slišim...
- b) Zveni mi znano, a ne vem kam bi pojem umestil.
- c) Da, pojem poznam.

**Kaj je jedrska fuzija?**

- a) Gre za miselno tehniko, pri kateri si s pomočjo fizikalne asociacije, zapomnimo nek vrstni red.
- b) Zlivanje atomskih jeder, pri katerem se lažja jedra zlivajo v težja.
- c) Proces, ki ga s pridom izkorišča tudi jedrska elektrarna Krško.
- č) Način odvzemanja atomskega jedra iz atoma nekega elementa, s pomočjo laserske tehnologije.

**Stranski produkt jedrske fuzije je sevanje. Ali menite, da je zaščita pred sevanjem potrebna?**

DA                                      NE

**Zakaj?** \_\_\_\_\_

**Znanstveniki imajo na voljo dve možnosti za zmanjšanje ali izničenje količine sevanja. Obkrožite tisto, za katero mislite, da se bolj obrestuje.**

- 1) Uporabili bi prilagojeno mešanico goriva. Na žalost bi za zagon reakcije s tem gorivom, potrebovali kar milijardo stopinj Celzija.
- 2) Naprave bi opremili z materialom, ki bi vpiljal sevanje.

**Zapišite material, za katerega mislite, da bo najboljše blokiral sevanje:**

\_\_\_\_\_

Hvala za vaše sodelovanje!  
Aljaž Habjanec, Filip Fras, Sandro Čeh

## PRILOGA 2

Število anketirancev	Starost	Spol	Izobrazba	Kakšne so Vaše izkušnje na področju fizike?	Ste se s pojmom jedrska fuzija že srečali?	Kaj je jedrska fuzija?	Je zaščita pred sevanjem potrebna?	Zakaj?	Katero možnost za zmanjšanje količine sevanja bi izbrali Vi?	Zapišite material, za katerega mislite, da bo najbolje blokiral sevanje
<i>Trije anketiranci iz strokovnega kroga.</i>	29 let	Moški	magister astrofizike	Fizika me zanima in mi gre dobro od rok.	Da, pojem poznam.	Zlivanje atomskih jeder, pri katerem se lažja jedra zlivajo v težja.	DA	Sevanje uničuje biološki material, iz katerega smo vsi grajeni.	Možnost 1: Uporabili bi prilagojeno mešanico goriva. Na žalost bi za zagon reakcije s tem gorivom, potrebovali kar milijardo stopinj Celzija.	Svinec
	30 let	Moški	Fizik	Fizika me zanima in mi gre dobro od rok.	Da, pojem poznam.	Zlivanje atomskih jeder, pri katerem se lažja jedra zlivajo v težja.	DA	Ker sevanje lahko poškoduje DNA, celice, posledično tkivo.	Možnost 2: Naprave bi opremili z materialom, ki bi vpijal sevanje.	Svinec
	29 let	Moški	Magister Fizike	Fizika me zanima in mi gre dobro od rok.	Da, pojem poznam.	Zlivanje atomskih jeder, pri katerem se lažja jedra zlivajo v težja.	DA	Ker ogroža zdravje	Možnost 2: Naprave bi opremili z materialom, ki bi vpijal sevanje.	Svinec
66	13 let	M: 33, Ž: 33	OŠ	A:18 B:10 C:19 Č:18 NO:1	A:44 B:17 C:4 NO:1	A:2 B:12 C:14 Č:5 NO:33	DA:52 NE:5 NO:9	Večina je odgovorila smiselno	MOŽNOST 1: 8, MOŽNOST 2: 50, NO: 8	Podani odgovori
55	14 let	M: 24, Ž: 31	OŠ	A:23 B:16 C:12 Č:4 NO:0	A:33 B:19 C:3 NO:1	A:1 B:14 C:12 Č:9 NO:19	DA:52 NE:0 NO:3	Večina je odgovorila smiselno	MOŽNOST 1: 3, MOŽNOST 2: 48, NO: 4	SVILA BOMBAŽ VOLNA PLOČEVINA
8	15 let	M: 4, Ž: 4	OŠ	A:2 B:3 C:3 Č:0 NO:0	A:2 B:5 C:1 NO:0	A:0 B:5 C:2 Č:1 NO:0	DA:8 NE:0 NO:0	Večina je odgovorila smiselno	MOŽNOST 1: 0, MOŽNOST 2: 7, NO: 1	BAKER SVINEC GOBA
3	18+	M: 0, Ž: 3	Profesor tujega jezika, učitelj, specialni pedagog	A:1 B:1 C:1 Č:0 NO:0	A:0 B:1 C:2 NO:0	A:0 B:3 C:0 Č:0 NO:0	DA:3 NE:0 NO:0	Vsi so odgovorili smiselno oz. pravilno.	MOŽNOST 1: 0, MOŽNOST 2: 3 NO: 0	PLASTIKA ŽELATINA ALUFOLIJA KOVINA PAPIR

132	Skupaj	M: 61, Ž: 71		A:44 B:30 C:35 Č:22 NO:1	A:79 B:42 C:10 NO:2	A:3 B:34 C:28 Č:15 NO:52	DA:115 NE:5 NO:12	Večina je odgovorila smiselno	MOŽNOST 1: 11, MOŽNOST 2: 108, NO: 13	KARTON STIROPOR JEKLO ŽELEZO ZVEZEK ČRNA FOLIJA BETON TERTAN DUŠIK OZON KOŽA LES SONČNA KREMA SONČNA OČALA JOD STEKLA ZA OČALA GUMA BLAGO BAKER ALUMINIJ TEMNI MATERIAL OPEKA MARMOR STEKLO TITAN
-----	--------	-----------------	--	--------------------------------	------------------------	-----------------------------	-------------------------	-------------------------------------	---	---

