

Problem 3 : Udar asteroida

U ovom problemu ćemo uporediti energiju oslobođenu u udaru asteroida u površinu Zemlje sa energijom nuklearne bombe bačene na Hirošimu (prinos od 15 kt TNT) i najveće američke[1] nuklearne probe Castle Bravo (sa prinosom of 15 Mt TNT). Jedna tona TNT je energetska ekvivalent $10^9 \text{ cal} = 4.184 * 10^9 \text{ J}$. U ovom problemu možemo smatrati da je asteroid idealnog sfernog oblika i homogene gustine $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$.

3-a(*) Razmotrimo prvo asteroid sa relativno malom brziom udara od 15 km/s. Data brzina je brzina *udara* u površinu - dakle Zemljina gravitacija je već uračunata. Izračunajte energiju oslobođenu u udaru asteroida od 10m, 100m and 1km prečnika i izrazite ih u jedinica energija Hirošima i Castle Bravo bombi.

3-b(*) Ponoviti isti račun za asteroid sa brzinom udara od 35 km/s.

3-c(*) Šta zaključujemo?

[1] SSSR je imao veću probu tzv. Car Bombu od 50Mt TNT. Castle Bravo ima 'prednost' da je lakša za računanje u ovom problemu, jer je njen prinos približno 1000 puta veći od Hirošime.

Rešenje problema 3 : Udar asteroida

I. UVOD

Ovaj problem je relativno jednostavan, ali nam daje predstavu o energiji oslobođenoj pri udaru meteorita. Samu energiju možemo lako izračunati u džulima, ali nam ta slika malo šta govori o razornoj moći (malo ko ima ideju koliko je energije npr. $10^{21} J$). Na žalost, razorna moć nuklearnih bombi je postala očigledna krajem Drugog svetskog i tokom hladnog rata - svima je jasno da je energija atomske bombe u Hirošimi bila dovoljna da se poptuno uništi jedan osrednji grad.

Pre nego što počnemo, razmotrimo šta se može uraditi sa energijom jednog grama TNT-a. Jedna tona TNT-a jednaka je energiji od 10^9 cal, odnosno jedan gram TNT-a oslobađa energiju od 1000 cal. Kako je po definiciji jedna kalorija energija potrebna da se gram vode (pri standardnim uslovima) ugrije za $1^\circ C$, znači da gram TNT-a greje litar vode za jedan stepen. S druge strane jedna tona nafte[1] sadrži 10^{10} kalorija, pa jedan gram nafte oslobađa 10,000 cal. To je dovoljno da se litar vode ugrije za $10^\circ C$. Nafta dakle ima deset puta veću gustinu energije nego TNT! Ovo je naizgled paradoksalno, ali jeste tačno. Postoje dva razloga. Prvo, sagorevanje nafte zahteva kiseonik iz atmosfere koji nije uračunat u njenu početnu masu. Za eksploziju TNT-a nije potreban kiseonik - egzotermna reakcija koja proizvodi eksploziju je jednostavno raspad jedinjenja TNT. Drugo, TNT je koristan jer je njegova eksplozija vrlo brza (nadzvučna brzina stvara udarni talas koji je destruktivan), dok se nafta sagoreva sporo što dozvoljava oslobođenoj energiji da se polako rasipa u atmosferu.

Korisna osobina TNT-a dakle nije oslobođena *energija*, već *snaga* (energija u jedinici vremena). Kako udar meteorita svakako proizvodi udarni talas, mi ovde nećemo razmatrati snagu već samo energiju, koja se oslobađa dovoljno brzo da je poređenje sa TNT-om relevantno.

[1] Standardizovana jedinica je 'tonne of oil equivalent', skraćeno *toe* = 10^{10} cal.

II. OSLOBOĐENA ENERGIJA

Uobičajeno je da se pri izražavanju energije u kilotonima ili megatonima TNT-a, piše samo ekvivalentna masa eksploziva - npr. 15kt, ili 50Mt, i podrazumeva se da se radi o masi TNT-a. Nadalje ćemo se držati te konvencije.

Za početak nađimo energiju dve atomske bombe u džulima kao $E[J] = E[kt] * [J/kt]$, gde je broj džula po kilotoni TNT-a $4.184 * 10^{12}$ J/kt. Tako za Hirošimu dobijamo energiju $E_H = 6.27 * 10^{13}$ J, a za Castle Bravo $E_{CB} = 6.27 * 10^{16}$ J. Obrnuto, ako imamo energiju u džulima, prevešćemo je u *kt* tako što ćemo je podeliti sa gornjim konverzionim faktorom.

Oslobodena energija je jednostavno kinetička energija meteorita neposredno pre udara (jer meteorit u krajnjem stanju miruje). Ta energija je $E = \frac{1}{2}mv^2$, gde je m početna masa, a v brzina meteoroida pri udaru. Ostaje samo da izračunamo masu, koje se da naći iz date gustine ρ i zapremine V kao $m = \rho V = \rho 4\pi R^3/3$ (zapremina lopte poluprečnika R data sa $V = 4\pi R^3/3$). Da izrazimo ovu energiju u jedinicama nuklearnih bombi, jednostavno ćemo je podeliti gore nađenim veličinama kao E/E_H i E/E_{CB} .

Rezultate možemo predstaviti u sledećoj tablici za početnu brzinu od 15 km/s.

brzina [km/s]	prečnik [m]	masa [kg]	energija [J]	energija [Mt TNT]	energija [E_H]	energija [E_{CB}]
15	10	$1.31 * 10^6$	$1.47 * 10^{14}$	0.035	2.34	0.0023
15	100	$1.31 * 10^9$	$1.47 * 10^{17}$	35.1	2340	2.34
15	1000	$1.31 * 10^{12}$	$1.47 * 10^{20}$	35100	$2.34 * 10^6$	2340

Slično tome možemo napraviti tablicu za početnu brzinu od 35 km/s. Da ne bismo ponavljali isti račun, primetimo da je odnos energija dva meteoroida iste mase i različitih brzina v_1 i v_2 jednak $E_1/E_2 = (v_1/v_2)^2$, tj. za novu početnu brzinu možemo jednostavno pomnožiti vrednosti energija u gornjoj tabeli sa $(35/15)^2 = 5.44$. Tako dobijamo:

brzina [km/s]	prečnik [m]	masa [kg]	energija [J]	energija [Mt TNT]	energija [E_H]	energija [E_{CB}]
35	10	$1.31 * 10^6$	$8.00 * 10^{14}$	0.191	12.74	0.0127
35	100	$1.31 * 10^9$	$8.00 * 10^{17}$	191	12740	12.74
35	1000	$1.31 * 10^{12}$	$8.00 * 10^{20}$	191000	$12.7 * 10^6$	12740

U oba slučaja najmanji razmatrani meteorit prečnika 10 m oslobađa energiju nekoliko puta veću od nuklearne bombe bačene na Hirošimu. Asteroid prečnika kilometar oslobađa energiju hiljade puta veću od najvećih hidrogenskih bombi koje su ikada testirane.

III. DISKUSIJA

Kada govorimo o eksploziji desetina hiljada hidrogenskih bombi, jasno je da su posledice katastrofalne, ali pokušajmo i to da stavimo u kontekst. Za vreme hladnog rata ukupan prinos celokupnog nuklearnog arsenala SAD je bio preko 20,000 Mt. Ukupan svetski nuklearni arsenal 2009. je procenjen na 6,400 Mt. Iako bi nuklearni rat sa ovakvim arsenalima u najgoroj mogućoj varijanti izazvao stotine miliona žrtava i genetske mutacije preživelih, generalno postoji slaganje da ljudska vrsta ne bi izumrla. Najdugoročnija posledica bi bila nuklearna zima, koja nastaje zbog blokiranja sunčevog zračenja prašinom raspršenoj u eksploziji i dimom od požara koji bi usledili. Gruba procena je da dugotrajne posledice nastaju pri ukupnoj detonaciji bombi od 5000 Mt. Nuklearna zima nema veze sa nuklearnom prirodom eksplozije (radiaktivnost izaziva druge probleme), već samo sa njenom snagom[2]. Iz tabela se vidi da meteoroidi prečnika 1 km oslobađaju dovoljno energije da izazovu 'meteoritsku' zimu. Nuklearne probe poput Castle Bravo nisu izazivale proporcionalnu količinu prašine jer su upravo zbog tog rizika obavljane visoko u atmosferi. Pad meteorita bi se, naravno, završio na površini zemlje te je prašina neizbežna.

Uporedimo sada ove energije sa drugim katastrofama. Energija koja je oslobođena na površini u zemljotresima na Sumatri 2004. i u Japanu 2011. su ekvivalentne 26 Mt i 45 Mt respektivno[3]. Tunguska eksplozija 1908. je oslobodila energiju od 10-15 Mt (na oko 10 km iznad površine zemlje), a ona koja je napravila krater u Arizoni oko 10 Mt. Erupcija St.Helens vulkana 1980. oslobodila je 24 Mt, eksplozivna erupcija Krakatau vulkana u Indoneziji 1883. je oslobodila oko 200 Mt energije, a vulkanska eksplozija na Santoriniju koja je uništila Minojsku civilizaciju pre oko 2650 godina je oslobodila oko 700 Mt. Ipak, svi ovi događaji oslobađaju manje energije nego udar meteorita prečnika reda 100 m.

Iz svega ovoga je jasno da tela prečnika do jednog kilometara ne prete globalnim uništenjem života. Iako bi bez sumnje udar takvog meteorita izazvao lokalnu kataklizmu i imao dugotrajne globalne klimatske posledice i fundamentalne promene u ljudskoj civilizaciji, on ne bi doveo do globalnog izumiranja vrsta.

Naravno, dovoljno veliki meteorit može dovesti do globalnog izumiranja. Najpoznatiji je onaj koji je istrebio dinosauruse na kraju perioda Krede pre 65 miliona godina (i proizveo Chicxulub krater na onome što je danas poluostrvo Yukatan). Njegova energija je procenjena na 100 Tt, tj. $100 * 10^6$ Mt, što je hiljadama puta više od energija iz gornje tablice. Koliki je bio taj meteorit? Možemo izračunati istim postupkom kao i gore da je energija oslobođena u padu meteorita prečnika 10 km pri brzini od 35 km/s jednaka $191 * 10^6$ Mt. Takođe, energija meteorita prečnika 15 km pri udaru brzinom od 15 km/s je $118 * 10^6$ Mt. Obe ove brojke su reda energije udara Chicxulub meteorita - njegov prečnik je dakle najverovatnije bio 10-15 km.

Razlika između meteorita od prečnika 1 km i 10 km je očigledna - dok prvi izaziva 'samo' lokalnu kataklizmu, drugi izaziva globalno istrebljenje većine živog sveta.

Napokon, primetimo da su udarci meteorita koji izazivaju globalna istrebljenja bili neophodni za evoluciju ljudske vrste. Istrebljenje dinosaurusu je doprinelo bržem razvitku sisara sve do primata. To nije bio jedini takav događaj - najdrastičniji se desio pre 252 miliona godina na kraju Permskog perioda - tada je izumrlo preko 80% svih rodova životinjskog sveta (od kojih su najpoznatiji trilobiti). Bez ovih događaja naša vrsta sigurno ne bi imala priliku da evoluirala u sadašnjem obliku.

Otvoreno je pitanje da li ovakvi kataklizmični događaji doprinose *bržem* razvoju inteligentnog života? Moguće je da ova istrebljenja vrsta daju evoluciji priliku da se resetuje kada se nađe u evolutivnom ćorsokaku bez inteligencije. U ovom argumetu pretpostavka je da jednom kada se inteligentna vrsta razvije, ona će predvideti rizik udara meteorita i uspeti da buduće takve događaje spreči. Ljudska vrsta još nije došla do stadijuma da ovaj rizik može da spreči. Nekoliko programa (poput Catalina Sky Survey ili Pan-STARRS) ima za jedan od ciljeva da pronađe asteroide koji se približavaju orbiti Zemlje (tzv. NEOs - Near Earth Objects) i to rade vrlo uspešno. Međutim sama odbrana od udarnih objekata ('NEOShield') je još u fazi planiranja.

[2] Možda najbizarniji koncept hladnog rata je bila tzv. bomba iz dvorišta ('backyard bomb') - to je nuklearna bomba tolike jačine da garantuje uništenje svog ljudskog života na Zemlji. Za takvu bombu nije potrebna raketa koja će je odneti na neprijateljski cilj - pošto će *svi* umreti, svejedno je da li ona eksplodira na drugoj strani sveta ili ćete je aktivirati u sopstvenom dvorištu! Niko nije ozbiljno razmatrao taj dizajn, ali je koncept svakako postojao. Za dodatne bizarnosti hladnog rata pogledajte ako već niste *Dr. Strangelove or: How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb*.

[3] Nije u pitanju greška - iako je zemljotres na Sumatri 2004. imao veću energiju u hipocentru, više energije je oslobođeno na površini u Japanu 2011. Najveći deo energije zemljotresa ne stigne do površine i apsorbovan je u unutrašnjosti Zemlje. Energije oslobođene u hipocentru su desetine hiljade puta veće - $9.6 * 10^6$ Mt na Sumatri, i $9.3 * 10^6$ Mt u Japanu. Uporedite ove brojke sa gore navedenom energijom oslobođenom pri udaru Chicxulub meteorita.