

Primjena Stirlingovog ciklusa u neterestrijalnim cryocoolerime na primjeru misije RHESSI

Repak, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:319389>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILUŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**PRIMJENA STIRLINGOVOG CIKLUSA U
NETERESTRIJALNIM CRYOCOOLERIMA NA
PRIMJERU MISIJE RHESSI**

Završni rad

Filip Repak

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 06.07.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Filip Repak
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4875, 29.07.2020.
OIB Pristupnika:	68367440943
Mentor:	doc. dr. sc. Marina Skender
Sumentor:	izv. prof. dr. sc. Tomislav Keser
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Primjena Stirlingovog ciklusa u neterestrijalnim cryocoolerime na primjeru misije RHESSI
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	Istražiti i objasniti rad Stirlingovog cryocoolera korištenog u sklopu Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager-a.
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	06.07.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 10.07.2023.

Ime i prezime studenta:	Filip Repak
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4875, 29.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	0

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Primjena Stirlingovog ciklusa u neterestrijalnim cryocoolerime na primjeru misije RHESSI**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Marina Skender

i sumentora izv. prof. dr. sc. Tomislav Keser

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. MISIJA RHESSI	2
2.1. RHESSI spektroskopija	3
3. LETJELICA I NJEZINE KOMPONENTE	4
3.1. Detektori	5
3.2. Rešetke	6
3.3. Atenuatori (prigušivači)	7
3.4. Solar Aspect System	8
3.5. Roll-Angle System	8
4. STIRLINGOV CIKLUS	9
5. RAZVOJ I PREDNOSTI CRYOCOOLERA	11
5.1. Joule–Thomsonov cryocooler	12
5.2. Braytonov cryocooler	13
5.3. Stirlingov cryocooler	14
5.4. Cryocooler s pulsirajućom cijevi	15
5.5. Gifford-McMahonov cryocooler	15
5.6. Ostali cryocooleri i nove tehnologije	16
6. CRYOCOOLER ZA MISIJU RHESSI	18
6.1. Snaga	19
6.2. Vibracija i učinkovitost	20
6.3. Kvarovi i problemi	21
7. CRYOCOOLERI U ZNASTVENIM MISIJAMA	23
8. ZAKLJUČAK	28
LITERATURA	29
SAŽETAK	33
ABSTRACT	34
ŽIVOTOPIS	35

1. UVOD

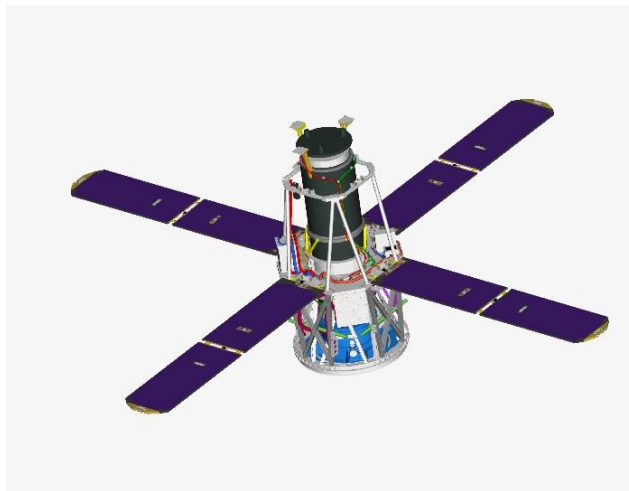
Održavanje temperature, pogodno za idealne radne performanse svakog uređaja, važan je segment svakog sustava pa tako i kod sustava povezanih sa svemirskim misijama. U tu svrhu, kao jedno od mogućih rješenja, koriste se *cryocooleri*. *Cryocooleri* u kojima je primijenjen Stirlingov ciklus korišteni u misiji „*Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager*“, RHESSI, predmet su razmatranja ovog završnog rada. Završni rad započinje uvodom o misiji RHESSI, slijedi opis podataka koje skuplja ta misija te njezinih ciljeva, a potom slijedi kratki uvod u spektroskopiju. U trećem poglavlju поближе će se dočarati komponente i sustavi same letjelice kao što su: detektori, rešetke, attenuatori, *Roll-Angle System* (RAS) i *Solar Aspect System* (SAS). Potom slijedi teorijski opis Stirlingovog ciklusa. Po završetku Stirlingovog ciklusa prelazi se na same *cryocoolere* opisujući prednosti i razvoj istih te različitih vrsta *cryocoolera*. Predstavljene su još i nove tehnologije kao i *cryocooleri* u razvoju. U šestom poglavlju obrađuje se razvoj i unaprjeđenje *cryocoolera* za RHESSI misiju, u kojem se opisuje razvoj snage samog hladnjaka kroz misiju, osjetljivost na vibraciju, učinkovitost te kvarove i moguće probleme *cryocoolera*. Zadnje poglavlje prikazuje primjenu različitih vrsta *cryocoolera* u različitim znanstvenim misijama.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada jest upoznati princip rada i dijelove *cryocoolera* te proučiti njihovu upotrebu u misiji RHESSI gdje se koristi kružni Stirlingov ciklus.

2. MISIJA RHESSI

Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) je teleskop NASA-inog svemirskog programa SMEX (*Small Explorer*) [2, str. 969]. Osnovna svrha RHESSI teleskopa je upoznati se s osnovnom fizikom ubrzanja čestica i oslobađanja eksplozivne energije u sunčevim bljeskovima [24]. Sunčevi bljeskovi su iznenadna pojačanja elektromagnetskog zračenja koja imaju izvor iznad same Sunčeve površine, u koroni [11]. Korona je dio Sunčeve atmosfere koji se sastoji od plazme vrlo male gustoće i temperature od otprilike dva milijuna Kelvina [11]. Sunčevi bljeskovi i njima pridruženi izbačaji koronine mase su od velikog znanstvenog interesa. RHESSI misija počela je 5. veljače 2002., a ugašena je 16. kolovoza 2018. zbog poteškoća s komunikacijom [3, str. 1]. Lansirana je raketom Pegasus koja najmanje može oštetiti detektor X- i gama zraka [25]. Kružeci oko Zemlje, letjelica se nalazi na visini od 600 km s inklinacijom od 38 ° prema Zemljinom ekvatoru [25]. Pokrivši više od jednog Sunčevog ciklusa, misija je zabilježila više od 100 000 rendgenskih događaja [24]. RHESSI omogućava spektroskopsko proučavanje energetskih elektrona koji nose energiju oslobođenu u bljeskovima [24].



Slika 2.1. Grafički prikaz letjelice s RHESSI misije
(*Computer Aided Design*).

Glavni znanstveni cilj RHESSI misije je proučiti procese koje se događaju tijekom Sunčevih bljeskova. Ti procesi su:

- impulsivno oslobađanje energije;
- ubrzanje čestica;
- transport energije i čestica [24].

Ti visokoenergetski procesi uključuju: brzo oslobađanje energije pohranjene u nestabilnim magnetskim konfiguracijama i jednako brzu pretvorbu te energije u kinetičku energiju vruće plazme i ubrzanih čestica [24]. Osim znanstvenih ciljeva, postoje još i neznanstveni ciljevi. Neznanstvene ciljeve koje je ispunila RHESSI misija su:

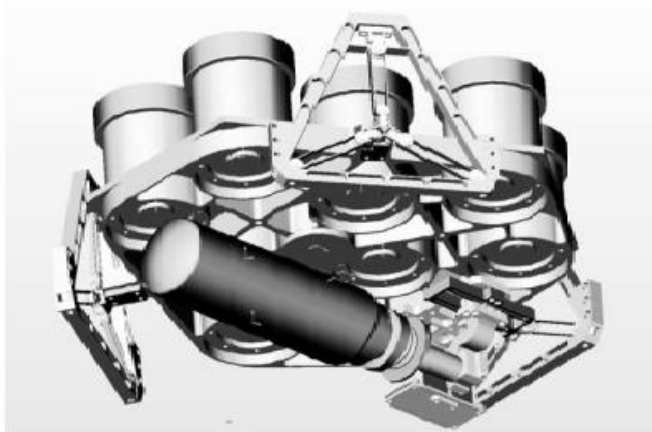
- rezolucijski ciljevi;
- financijski ciljevi misije;
- ograničenje težine koje vezano uz samu letjelicu;
- ciljevi osjetljivosti glavnih komponenti teleskopa [24].

2.1. RHESSI spektroskopija

RHESSI misija sastoji se od letjelice koja sadržava spektrometar sa sposobnošću dobivanja slika Sunčevih bljeskova u X-zrakama i gama zrakama [23]. Koriste se dvije nove tehnologije, a one su: rešetke za modulaciju Sunčevog zračenja i germanijski detektori. Spektroskop sadrži devet ohlađenih kristala germanija [23]. Kristali germanija detektiraju fotone X-zraka i gama zraka koji se prenose preko rešetki u energetsom rasponu od 3keV do 20MeV [23]. Kako bi se X-zrake i gama zrake pretvorile u električni impuls, potrebno je ohladiti detektore pomoću *cryocoolera* te pustiti visoki napon kroz njih [10, str. 34]. Puštanjem visokog napona kroz detektore, X-zrake i gama zrake pretvaraju se u strujne impulse [10, str. 34]. Količina strujnog impulsa koja se stvori proporcionalna je energiji fotona [10, str. 34-35]. Struja impulsa mjeri se osjetljivom elektronikom dizajniranom posebno za RHESSI misiju [10].

3. LETJELICA I NJEZINE KOMPONENTE

Svemirska letjelica se sastoji od: strukture i mehanizma, sustava kontrole položaja, sustava za napajanje, toplinske kontrole te sustava za upravljanje naredbama, podacima i telekomunikacijama [19]. Letjelica je napravljena od aluminijske [19]. Aluminij je lagan, ali i čvrst materijal. Teleskop sadržava teleskopske cijevi, rešetke, *Solar Aspect System* (SAS) i *Roll-Angle System* (RAS) [19]. Na svakom kraju cijevi teleskopa postavljeno je devet rešetki na rešetkastom nosaču [2]. Rešetke podešavaju prijenos gama zraka i rendgenskih zraka do detektora dok se letjelica okreće oko osi teleskopa [2]. Spektrometar se sastoji od devet germanijskih detektora koji se nalaze na teleskopu iza devet parova rešetki [2]. Detektori pretvaraju ulazne gama zrake i X-zrake u impulse. Svaki od njih zahtijeva dva FET-a (*field-effect transistor*), odnosno dva tranzistora s efektom polja [2, str. 969]. FET pojačala rade na temperaturi ispod 150K, a snaga disipacije svakog je približno 30 mW [2, str. 969]. Detektori se hlade pomoću *cryocoolera*, koji ih održava na temperaturi od 75K. *Cryocooler* se nalazi u kućištu koje ga štiti od kontaminacija te sprječava curenje radnog medija [2]. Kućište se nalazi s donje strane aluminijske ploče. Detektori i spremnik dušika postavljeni su na debelu aluminijsku ploču zvanu *coldplate* [2, str. 970]. Aluminijska ploča oslonjena je na tri točke pomoću remenskih sklopova [2, str. 971]. Svaki remenski sklop ima tri potporna remena od S-stakla postavljena u trokutasti aluminijski okvir (Slika 3.1.).



Slika 3.1. Računalni prikaz trokutastih aluminijskih okvira (Smith, Lin, Turin, Curtis, Primbsch, Campbell, Abiad, Schroeder i dr., 2002, str.40).

Detektori i prednji dio aluminijske ploče prekriveni su tankim (unutarnjim) aluminijski štitom, dok sveukupni sklop okružuje vanjski štit [2, str. 970]. Vanjski štit je poduprt sa šest cijevi od

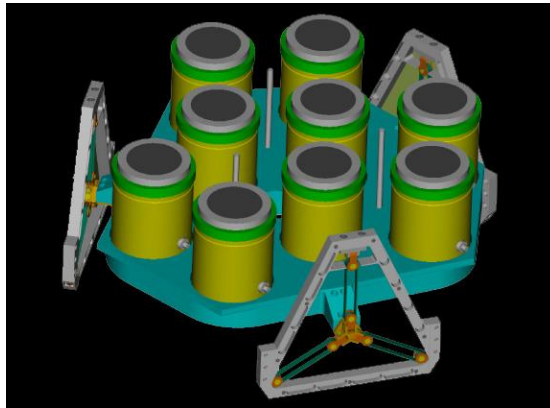
fiberglassa [2, str. 970]. Oba štita imaju devet proreza ispred germanijskih detektora [2, str. 970]. Štitovi su prekriveni gustom višeslojnom izolacijom. Dva geolitna absorbera instalirana su na letjelicu [2, str. 970]. Jedan geolitni absorber postavljen je na hladnoj ploči blizu detektora kako bi smanjio količinu vode unutar unutarnjeg štita [2, str. 971]. Drugi absorber je postavljen na izolatore ispod debele aluminijske hladne ploče [2, str. 971]. Pomični atenuatorski diskovi dio su spektrometra koji se pomiču ispred detektora [2, str. 971]. Vanjski štit hladi se pomoću toplinskog remena koji je pričvršćen na spojni prsten [2, str. 971]. Spojni bakreni prsten na vanjskom promjeru *coldfingera* lagano je stisnut oko tanke trakaste folije napravljene od indija [2, str. 971]. Prsten pruža toplinski otpor od oko 20 K/W između trake i plina u *coldfingeru* [2, str. 971]. Između aluminijske ploče i *coldfingera* nalazi se šipka od safira [2, str. 971]. Safir ima visoku toplinsku vodljivost pri niskim temperaturama te nisku toplinsku vodljivost pri visokim temperaturama. Toplina koja nastane od hladnjaka završava u prostoru sa stražnje strane spektrometra koja je ujedno i krajnja strana letjelice. Krajnja strana letjelice prekrivena je trakama od teflona te služi kao izolacija [2].

3.1. Detektori

RHESSI koristi n-tip detektore germanija promjera 7,1 cm i duljine 8.5 cm [2, str. 969]. Uz pomoć *cryocoolera* hladit će se na temperaturu od 75 K [3, str. 1]. Hlađenje detektora smanjuje učinke oštećenja od zračenja iz svemira. Detektori se nalaze u nezavisnim modulima koji nisu hermetički zatvoreni, ali imaju vrlo mali put vodljivosti plina prema van (Slika 3.2.) [9]. Detektori pokrivaju raspon energije X-zraka i gama zraka od 3 keV do 17 MeV [9, str.19]. KeV spektralna rezolucija je neophodna za razlučivanje svih linija solarnih gama zraka [9]. Unutarnja elektroda je sastavljena od dva kontakta koji prikupljaju naboj iz dva električni neovisna segmenta [9, str. 19]. Germanijski detektori uz pomoć dva električki neovisna segmenta mjere zrake. Prednji segment mjeri tvrde X- zrake do 200 keV, dok stražnji segment pruža neiskrivljenu liniju gama zraka visoke rezolucije mjerenja [23]. Dva mehanizma degradacije, koja mogu utjecati na rad samih detektora, su:

- a) kontaminacija germanijskih detektora; – kontaminacija površine detektora zrakom i/ili vodom

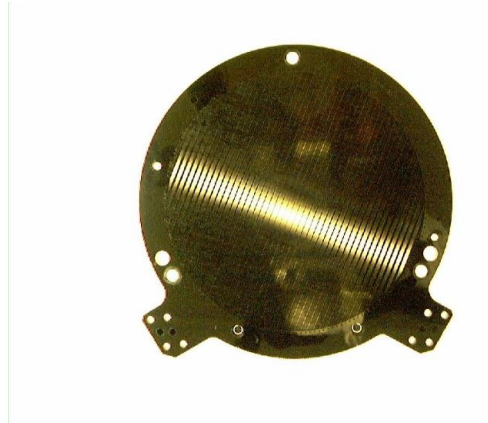
- b) kozmičke zrake – moguća je šteta, nastala zračenjem, prilikom prolaska kroz *South Atlantic Anomaly* (SAA) [2, str. 969].



Slika 3.2. Računalni prikaz germanijskih detektora na aluminijskoj ploči (*Germanium detectors*).

3.2. Rešetke

Glavna uloga rešetke je podešavanje prijenosa gama zraka i rendgenskih zraka do detektora [21]. Dva identična seta od devet rešetki postavljene su na prednje i stražnje rešetkaste ladice [21]. Rešetkaste ladice postavljene su na prednjem i stražnjem dijelu letjelice [21]. Svaka rešetka je niz jednako razmaknutih letvica neprozirnih za X-zrake odvojenih prozirnim prorezima [21]. Rešetke imaju proreze od 34 mikrona do 2.75 mm [21]. Prve četiri finije rešetke su okrugle (Slika 3.3.), dok su ostalih pet rešetki četvrtasti [20].



Slika 3.3. Grafički prikaz okruglih rešetki (Photo of Grid 1).

Dimenzija rešetke je približno 10 x 10 cm [20]. Rešetke moraju biti izrađene od materijala s visokim atomskim brojem Z koji je vrlo gust [22]. Gustoća pomaže blokiranju fotona visoke

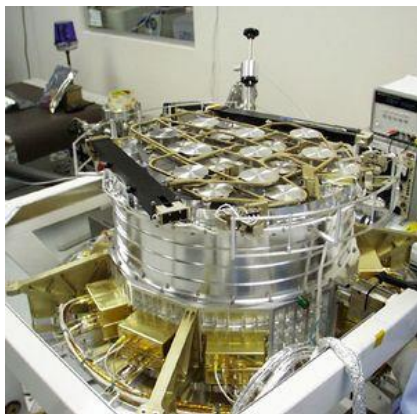
energije. Najfinija rešetka napravljena je od molibdena, a ostale od volframa [22]. Postoje ograničenja u finoći širine proreza i debljini letvice. Ako je prorez preuzak ili letvica predebela moglo bi doći do blokiranja svjetla odnosno detektor bi bio u mraku [22]. Sve rešetke su ispitane vibracijskim i toplinskim testovima kako bi bile sposobne za uvjete misije [22].

3.3. Atenuatori (prigušivači)

Atenuatorski diskovi su dio spektrometra. Pomiču se ispred germanijskih detektora za vrijeme sunčevih bljeskova [19]. Glavni zadatak im je sprečavanje efekta zasićenja [18]. U trenutku intenzivnih sunčevih bljeskova, atenuatorski diskovi se pomiču kako bi prigušili tok X-zraka [18]. Atenuatori se sastoje od dva seta aluminijskih diskova [18]. Prvi set aluminijskih diskova, tanji, se stavlja u vidno polje germanijskih detektora te pružaju skromno prigušenje [18]. Drugi set diskova, deblji, koristi se u vrijeme najjačih sunčevih bljeskova te pruža veće prigušenje [18]. Atenuatori mogu raditi u četiri stanja:

- „0“ stanje – oba atenuatora isključena;
- „1“ stanje – tanji uključen, deblji isključen;
- „2“ stanje – tanji isključen, deblji uključen;
- „3“ stanje - oba atenuatora uključena [18].

U samoj RHESSI misiji su se koristila sva stanja osim stanja „2“ [18].



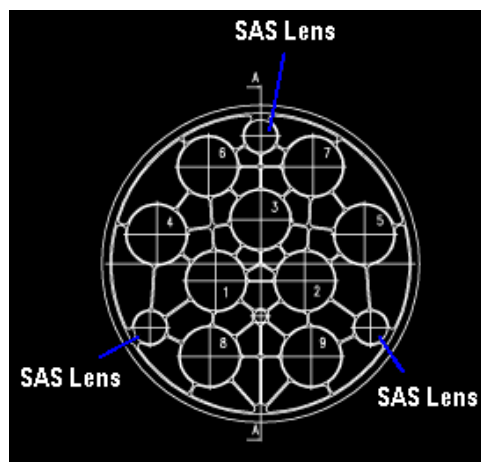
Slika 3.4. RHESSI spektrometar s atenuatorima (*The RHESSI spectrometer with removeable attenuators*).

3.4. Solar Aspect System

Solar Aspect System (SAS) leće pružaju :

1. informacije o visokoj razlučivosti;
2. informacije o signalnim pogreškama u stvarnom vremenu za usmjeravanje letjelice;
3. praćenje relativnog savijanja dviju rešetki;
4. slike Sunca u bijelom svjetlu [16].

SAS se sastoji od tri identičnih sklopova leća/senzor postavljenih na prednju rešetkastu ladicu za formiranje slika punog Sunca (Slika 3.5.). Svaki sklop sastoji se od leća promjera 4 cm [4, str. 89]. Leća fokusira optičku sliku na linearne *Charge-Coupled Device* (CCD) [4, str. 89]. Linearni CCD-ovi se nalaze na stražnjoj rešetkastoj ladici [4, str. 89]. Svaki je razmaknut točno 120 stupnjeva. SAS se koristi kao senzor za solarnu akviziciju [4, str. 89].



Slika 3.5. Računalni prikaz položaja SAS leća na prednjoj rešetki (Solar Aspect System).

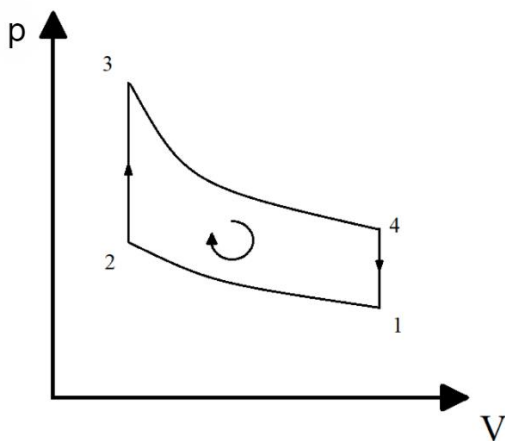
3.5. Roll-Angle System

Roll-Angle System (RAS) je sistem koji se koristi za rekonstrukciju slike na terenu [17]. Kako bi se slika rekonstruirala potrebno je poznavanje relativnog nagiba od tri lučne minute [17]. Uz relativni nagib potreban je moment koji se može očitati pomoću zvjezdanog skenera RAS-a [4]. On je usmjeren radijalno prema van u odnosu na letjelicu. Promatra zvijezde unutar polja od 60 do 90 stupnjeva [4, str. 90]. 30 stupnjeva vidnog polja uzima suncobran. Podaci iz RAS-a obrađuju se i prikupljaju za prijenos u IDPU i *Aspect Data Processor* (ADP) [17]. RAS se sastoji od niza linearnih fotodioda sličnih kao i kod SAS-a [4].

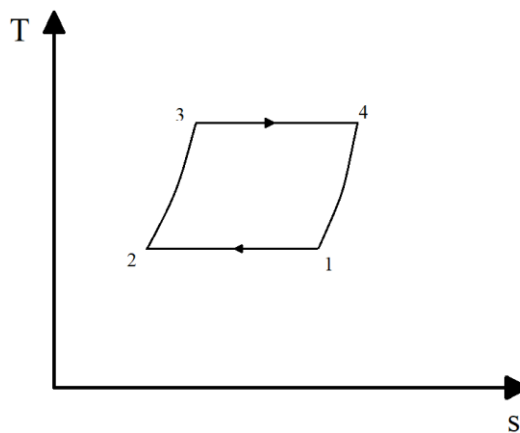
4. STIRLINGOV CIKLUS

Stirlingov ciklus je termodinamički kružni ciklus na čijem principu rade Stirlingovi strojevi [8]. Stirlingov ciklus se temelji na cikličkoj izmjeni ekspanzije i kompresije radnog medija. Radni medij može biti zrak ili neki drugi plin [8, str. 1]. Ciklus se odvija između dva spremnika različite temperature. Postoji ogrjevni spremnik te rashladni spremnik. Ogrjevni i rashladni spremnik povezani su izmjenjivačem toplote koji naizmjenično apsorbira i otpušta toplinu [8]. Ukupna toplina izmijenjena između rashladnog i toplinskog spremnika jednaka je mehaničkom radu [8]. Ekspanzija se postiže u ogrjevnom spremniku, dok se kompresija postiže u rashladnom spremniku [8]. Ekspanzija je rastezanje odnosno povećanje volumena tijela, a kompresija je smanjenje volumena tijela [26]. Kružni proces može biti ljevokretan ili desnokretan. Kod ljevokretnog kružnog procesa mehanički rad se troši, dok se kod desnokretnog mehanički rad dobiva [8]. Stirlingov ciklus sastoji se od četiri procesa kojeg čine dvije izoterme i dvije izohore:

- od točke 1 do točke 2 - izotermna kompresija;
- od točke 2 do točke 3 - izohorno dovođenje toplote;
- od točke 3 do točke 4 - izotermna ekspanzija;
- od točke 4 do točke 1 - izohorno odvođenje toplote [8, str. 2].



Slika 4.1. p - V dijagram desnokretnog Stirlingovog ciklusa.



Slika 4.2. T - S dijagram desnokretnog Stirlingovog ciklusa.

Na slikama je prikazan idealni desnokretni Stirlingov ciklus (Slika 4.1. i 4.2.). Izotermna kompresija je proces koji se odvija pri konstantnoj temperaturi. Radni fluid predaje toplinu okolini

te se smanjuje volumen, a s njom ujedno i entropija. Entropija, S , je termodinamička funkcija stanja sustava, a infinitezimalno mala promjena entropije između dva beskonačno bliska ravnotežna stanja iznosi:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (4-1)$$

gdje je:

- dS – promjena entropije,

- dQ – promjena topline,

- T – temperatura [12].

Izohorno dovođenje topline se odvija pri konstantnom volumenu. Radni fluid se zagrijava te dolazi do povećanja tlaka koje je uzrokovano samim povećanjem temperature radnog fluida. Kod izohornog procesa nema rada. Izotermna ekspanzija se odvija pri maksimalnog konstantnoj temperaturi. Kod izotermne ekspanzije dolazi do povećanja volumena, a tlak se smanjuje. Izohorno odvođenje temperature se odvija pri maksimalnom konstantnom volumenu. Smanjenjem temperature, odvodi se toplina, te se smanjuje entropija sustava.

5. RAZVOJ I PREDNOSTI CRYOCOOLERA

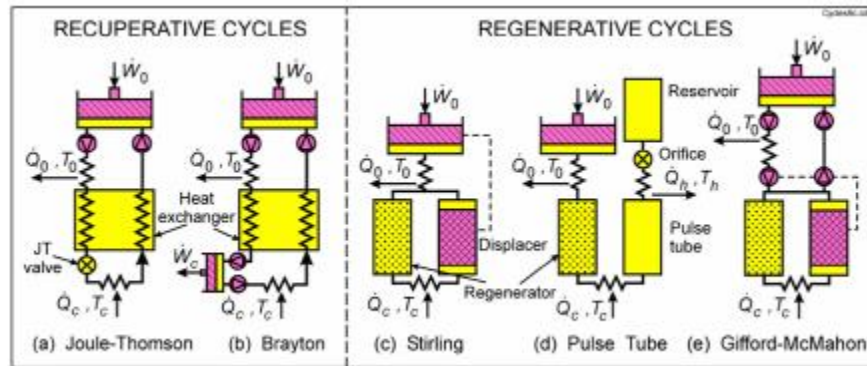
Cryocooleri doživljavaju velika poboljšanja u zadnjih 30 godina, što je pridonijelo mnogo većoj primjeni cryoenergetike u svim područjima. Glavna kočnica u komercijalnoj upotrebi *cryocoolera* je cijena. Visoka cijena ometa široku upotrebu *cryocoolera*. Glavni benefiti *cryogenih* temperatura su:

1. očuvanje bioloških materijala i hrane;
2. ablacija tkiva (zdravstveni benefit);
3. kvantni efekti (supravodljivost i superfluidnost);
4. zgušnjavanje (ukapljivanje i odvajanje);
5. nisko temperaturno zagađenje;
6. niski tlak pare (*cryopump-a*) [5, str. 2].

Za mnoga poboljšanja *cryocoolera* i za njegovu komercijalnu upotrebu zaslužne su svemirske primjene samog hladnjaka. Zadovoljavanje zahtjeva za svemirske uvjete dovelo je do hladnjaka koji su svoju primjenu našli u općoj komercijalnoj upotrebi. Velika potražnja za *cryocoolerima* omogućuje pad cijene samog hladnjaka samim time i njegova daljnja poboljšanja. Tipovi *cryocoolera* s plinskim ciklusima su [5]:

- a) Joule-Thomson - U ranim 1900-im, razvijeni su mali Joule-Thomson *cryocooleri* koji su se koristili za kućno hlađenje leda prije pojave hladnjaka [5, str. 3]. Mali Joule-Thomson *cryocooleri* imali su primjenu u vojnoj industriji gdje su korišteni za hlađenje projektila s laserskim vođenjem [5, str. 3].
- b) Brayton – Turbo-Brayton *cryocooleri* primjenjuju se od kraja 1990-ih u svemirskim misijama [5].
- c) Stirling – Stirlingovi *cryocooleri* razvijeni su ranih 1950-ih za ukapljivanje zraka na relativno duge lokacije [5, str. 3]. 1960-ih svoju primjenu pronašli su u vojsci za hlađenje infracrvenih detektora u opremi za noćno gledanje [5, str. 3]. Životni vijek hladnjaka tog doba par sati. 1970-ih pojavljuju se Stirling hladnjaci s linearnim pogonom koji su eliminirali većinu trenja te samim time produžili životni vijek samog *cryocoolera* [5, str. 5]. Svemirska upotreba kreće, nakon produljenja životnog vijeka hladnjak, krajem 1980-ih [5, str. 5].

- d) *Cryocooleri* s pulsirajućom cijevi – Sredinom 1980-ih, uvođenjem otvora u hladnjake te njegovim premještanjem, omogućeno je postizanje temperatura ispod 60 K [5, str. 6]. Dodavanjem dvostrukog otvora i interne cijevi 1990-ih, učinkovitost *cryocoolera* s pulsirajućom cijevi premašuje i Stirling *cryocooler* [5, str. 6]. Visoka učinkovitost i visoka pouzdanost dovela je do njihove primjene u svemirskim misijama.
- e) Gifford-McMahon - Gifford-McMahon *cryocooleri* razvijeni su početkom šezdesetih godina prošlog stoljeća [5, str. 5]. Koristili su industriji poluvodiča za proizvodnju posebnih usisivača [5, str. 3]. Krajem 1980-ih godina počeli su se koristiti za hlađenje štitova od zračenja u opremi za magnetsku rezonanciju [5, str. 3]. 1995. godine 4K Gifford-McMahon *cryocooleri* počinju se koristiti za rekondenzaciju tekućeg helija u *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) sustavima [5, str. 3].



Slika 5.1. Shematski prikaz različitih tipova *cryocoolera* (Radebaugh, 2009, str. 2).

5.1. Joule–Thomsonov cryocooler

Joule-Thomson *cryocooler* pripada grupi *cryocoolera* s obnovljivim ciklusima [5, str. 2]. Protok plina je ravnomjeran u jednom smjeru s postojanim niskim i visokim tlakom na odgovarajućim mjestima [5, str. 2]. Kompresija se javlja pri temperaturi okoline, pri čemu je toplina kompresije raspršena u okolinu. Ekspanzija procesa se odvija na hladnom kraju [5, str. 2]. Stabilan protok i stabilan tlak donose benefite u radu samog hladnjaka, a to su: niske vibracije i niske temperaturne oscilacije. Visoka učinkovitost izmjenjivača topline potrebna je za postizanje kriogenih

temperatura, zato što su adijabatske temperaturne promjene male u usporedbi s temperaturnom razlikom između kriogene temperature i sobne temperature [5, str. 2].



Slika 5.2. Grafički prikaz Joule-Thomsonovog *cryocoolera* (*Fast Cool Down Joule-Thomson Miniature Cryogenic Cooler*).

Kao radni medij koristi se čisti dušik ili argon [5, str. 3]. Čisti dušik i argon na sobnoj temperaturi imaju malu ovisnost tlaka o entalpiji, koja uzrokuje manji učinak hlađenja [5, str. 3]. Nedostatak Joule-Thomson *cryocoolera* je u tome što radni medij zahtijeva vrlo visoke tlakove, a učinkovitost samog hladnjaka je skromna. Upotreba mješovitih rashladnih sredstava povećava učinak samog *cryocoolera* te njegovu učinkovitost [5, str. 4]. Joule-Thomson *cryocooleri* s mješovitim rashladnim sredstvom zovu se Kleemenko *cryocooleri* [5, str. 5]. Takvi *cryocooleri* se koriste za hlađenje gama detektora na oko 90 K [5, str. 5].

5.2. Braytonov cryocooler

Brayton *cryocooler* pripada grupi hladnjaka s obnovljivim ciklusom, kod kojeg je protok plina ravnomjeran u jednom smjeru [5, str. 2]. Kompresija se kao i kod Joule-Thomsonovog *cryocoolera* javlja pri temperaturi okoline, dok se ekspanzija događa na hladnom kraju [5, str. 2]. Adijabatske promjene temperature povezane s konstantnim širenjem entropije su male u usporedbi s temperaturnom razlikom između sobne i kriogene temperature [5, str. 2]. Brayton *cryocooleri* koriste plinske ležajeve koji eliminiraju trljanje te osiguravaju *cryocooleru* desetogodišnji životni vijek [5, str. 5]. Turbinski ekspanderi i centrifugalni kompresori se vrte na plinskom ležaju velikom brzinom [5, str. 5]. Problem s pouzdanošću nastaje kao posljedica pokretnog dijela na hladnom

kraju hladnjaka. Radni medij koji se koristi u hladnjacima je neon, kad radi iznad 35K, ili helij koji se koristi za niže temperature [5, str. 5].



Slika 5.3. Grafički prikaz Braytonovog *cryocoolera* (Turbo Brayton).

Izmjenjivač topline je najveća komponenta u sustavu, iz razloga što izmjenjivač mora imati visoku učinkovitost.

5.3. Stirlingov *cryocooler*

Stirling *cryocooler* pripada grupi hladnjaka s regenerativnim ciklusom [5, str. 2]. Kod regenerativnog ciklusa, hladnjaci koriste oscilirajuće protoke i tlakove [5, str. 2]. Radni medij Stirlingovog *cryocoolera* je helij dok se hladnjaci koriste za umjerene i više kriogene temperature [5, str. 3]. Moguća je i upotreba dušika kao radnog medija. Zagrijavanje u *cryocooleru* se javlja pri porastu tlaka, a hlađenje pri smanjivanju tlaka [5]. Stirling hladnjaci koriste istiskivače kako bi pomicali većinu radnog medija na vrući kraj tijekom kompresije te na hladni kraj tijekom ekspanzije [5, str. 2]. Kompresor i istiskivač postavljeni su na plinski ležaj, što omogućuje duži vijek trajanja hladnjaka [5, str. 5]. Stirling *cryocooleri* mogu biti:

- jednostupanjski – koriste se za temperature iznad 60 K;
- dvostupanjski – koriste se za hlađenje detektora na 35 K i optike na 110 K;
- trostupanjski – koriste se za temperature od oko 30 K [6].

5.4. Cryocooler s pulsirajućom cijevi

Cryocooleri s pulsirajućom cijevi spadaju u grupu *cryocoolera* s regenerativnim ciklusom [5]. Radni medij je najčešće helij kao i kod Stirling *cryocoolera* [5]. Oscilirajući protok prolazi kroz otvor na toplom kraju te pomiče plin slično kao i istiskivač u Stirling hladnjaku [5, str. 6]. Tijekom kompresije radni medij potiskuje na vrući kraj, a tijekom ekspanzije na hladni kraj [5]. Nedostatak istiskivača donosi *cryocooleru* s pulsirajućom cijevi veću pouzdanost i manje vibracija [5]. Ventil koji se nalazi u hladnjaku smanjuje učinkovitost samog *cryocoolera*.



Slika 5.4. Grafički prikaz 4 K *cryocoolera* s pulsirajućom cijevi (RP-082B2 4K Pulse Tube Cryocooler).

5.5. Gifford-McMahonov cryocooler

Gifford-McMahon *cryocooler* pripada grupi hladnjaka s regenerativnim ciklusom [5]. Kao radni medij koristi se helij.



Slika 5.5. Grafički prikaz Gifford-McMahonovog AL200 *cryocoolera* (Gifford-McMahon cold head AL200).

U Gifford-McMahon *cryocoolerima* koristi se istiskivač koji pomiče radni medij na hladni kraj tijekom ekspanzije i topli kraj tijekom kompresije [5]. *Cryocooler* sadrži ventil koji smanjuje njegovu učinkovitost u usporedbi s kompresorima bez ventila kao što se koriste u Stirling *cryocoolerima*. Intervali održavanja Gifford-McMahon *cryocoolera* su jedna do dvije godine [5, str. 5].

5.6. Ostali cryocooleri i nove tehnologije

Neki od ostalih tipova *cryocoolera* su:

- Hibridni *cryocooleri* – Hibridni *cryocooleri* služe za hlađenje na vrlo niskim temperaturama ($< 10\text{K}$) [6, str. 4]. On je spoj Stirling i Joule-Thomson hladnjaka koji kombinira najbolje karakteristike svakog termodinamičkog ciklusa [6, str. 4]. Hibridni *cryocooler* koristi masu i snagu Stirlingovog hladnjaka kao predhladnjak. Predhladnjak obavlja hlađenje na temperature do oko 15K [6, str. 4]. Hlađenje zadnje faze na 6K ili niže obavlja Joule-Thomson *cryocooler* [6, str. 4]. Prednost u korištenju hibridnih *cryocoolera* je ta što je omogućen prijenos topline na velike udaljenosti [6, str. 4].
- Termoakustički *cryocooler* s pulsirajućom cijevi - *Cryocooleri* bez pokretnih dijelova pojavljuju se 1990-ih [5, str. 6]. Pouzdanost takovog *cryocoolera* je velika [5, str. 6]. Prvi termoakustički *cryocooler* s pulsirajućom cijevi koristio je termoakustički motor koji je umjesto mehaničkog kompresora koristio stojni val [5, str. 6]. Termoakustički motor putujućeg vala ima veću učinkovitost od stojnog vala [5, str. 6]. Tlačni omjer termoakustičkog motora putujućeg vala je 1,2 dok tlačni omjer kod stojnog vala iznosi 1,1 [5, str. 6]. Zbog tlačnog omjera manjeg od 1,3, sustav je teže postizao niže temperature [5, str. 6]. Dodavanjem akustičkog pojačala postigao se tlačni omjer od 1,27, što je omogućilo postizanje nižih temperatura od oko 18K [5, str. 6].
- *Cryocooleri* s velikom pulsirajućom cijevi - *Cryocooleri* s velikom pulsirajućom cijevi omogućavaju snagu od oko 1kW [5, str. 6]. Povećanje snage je potrebno zbog primjene hladnjaka u tehnologiji supravodiča i u industrijskom ukapljivanju plina [5, str. 6-7]. Velika mana im je mala učinkovitost u odnosu na *cryocooler* s pulsirajućom cijevi [5, str. 7]. Mala učinkovitost uzrokovana je efektom cirkulirajućeg strujanja koja se javlja u pulsirajućoj cijevi [5, str. 7].

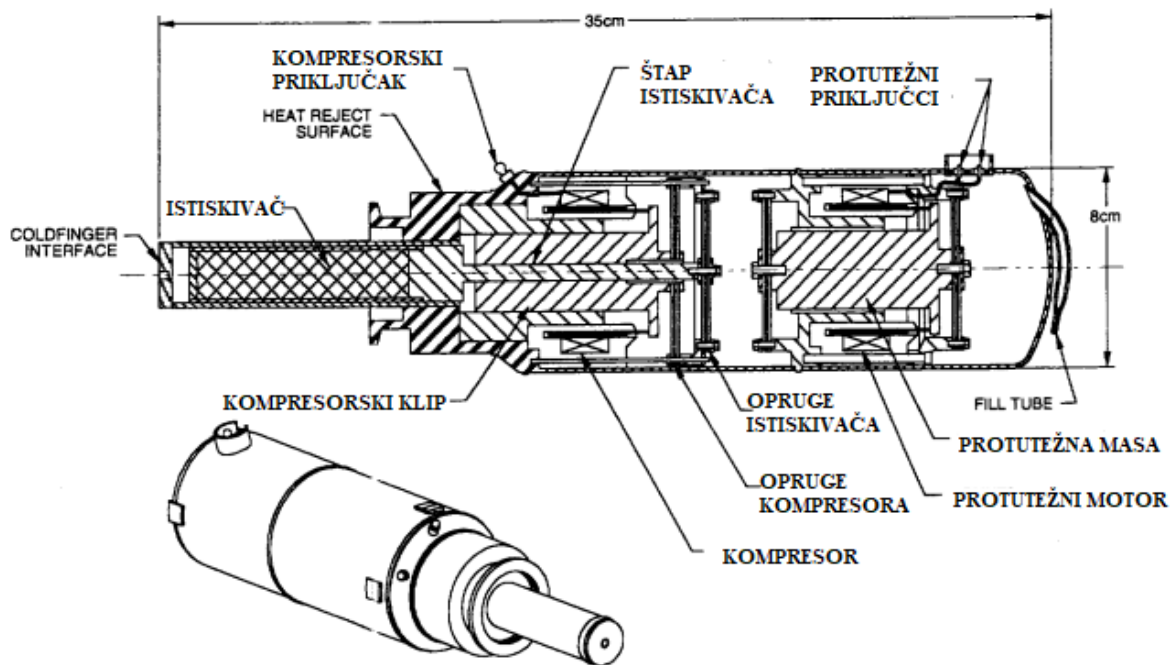
- *Cryocooleri* visoke učinkovitosti za 4 K – Učinkovitost hladnjaka značajno opada za niske temperature kao što su 4 K [5, str. 7]. Tih 4 K je potrebno za elektroniku niskotemperaturne supravodljivosti kojoj je potrebno povećati učinkovitost [5, str. 7]. To se postiglo *cryocoolerima* visoke učinkovitosti. Oni koriste pulsirajuće cijevi Stirlingovog tipa, koji omogućavaju veću učinkovitost u odnosu na kompresore Gifford-McMahon cryocoolera [5, str. 7]. *Cryocooleri* visoke učinkovitosti za 4 K koriste helij kao radni medij [5, str. 7].
- *Microcryocooleri* – Mnogi elektronički senzori imaju osjetljivost na niže temperature te zbog toga koriste *cryocoolere* [5, str. 7]. Kako su senzori sve manji potrebni su i sve manji hladnjaci. To je uzrokovalo pojavu *microcryocoolera* [5, str. 7]. Razvoj učinkovitih *microcryocoolera* je u tijeku [5, str. 8].

Nove tehnologije vezane uz *cryocoolere* su:

- Više frekvencije – Mnogi *cryocooleri*, kao što su Stirlingovi i *cryocooleri* s pulsirajućom cijevi, koriste kompresore. Povećanjem frekvencija za datu snagu moguće je koristiti manji kompresor [5, str. 6]. Manji kompresor smanjuje masu samog sklopa. Prednost veće frekvencije i veće snage je kraće vrijeme hlađenja [5, str. 6].
- Suhi 4 K *cryostat* – Zbog povećanja cijena helija nastali su suhi *cryostati*. Suhi *cryostati* omogućuju jako male vibracije pa se zbog toga koriste u pokusima i misijama koje su iznimno osjetljive na vibracije [5, str. 7]. *Cryocooler* s pulsirajućom cijevi tipa Gifford-McMahon koriste suhe *cryostate* kako bi osigurali potrebno hlađenje [5, str. 7].

6. CRYOCOOLER ZA MISIJU RHESSI

Za RHESSI misiju odabran je *cryocooler* M77B [2, str. 969]. *Cryocooler* nije dizajniran za svemirske primjene već ga je potrebno prenamijeniti za tu svrhu [2, str. 969]. M77B ima pneumatski pogonjen istiskivač i integralni motor protuteže koji se koristi za prigušivanje vibracija [3, str. 1]. Za potrebe misije, s *cryocoolera* M77B uklonjeni su bakrena rebra, koja su namijenjena za hlađenje zrakom, te montažni jezičci koji su zalemljeni za vanjsko kućište [2, str. 969]. Uz uklanjanje vanjskih dijelova potrebno je toplinski izolirati *coldfinger* od detektora tijekom ciklusa žarenja [2, str. 970]. *Engineering Test Unit* (ETU) testni hladnjak integriran je s ETU spektrometrom kako bi pokazao da sustav pruža adekvatne temperaturne performanse [3, str. 1]. Nakon vibracijskog testa ETU hladnjak je pokazao svoje mane. Bila je potrebna veća snaga za postizanje radne temperature te je temperatura *coldfingera* pokazala nesigurnost [3, str. 1]. ETU se koristio šest mjeseci te je zamijenjen s *First Flight Model* (FM1) hladnjakom [3, str. 2]. FM1 je podvrgnut većim vibracijama te je testiran. Testiranja su pokazala da je za *cryocooler* potrebna znatno veća snaga za postizanje radne temperature [3, str. 3]. Osim toga, performanse *cryocoolera* postale su puno osjetljivije te je temperatura *coldfingera* postala nestabilna [3, str. 3]. Hladnjaci su nakon testiranja rastavljeni te je utvrđeno je da je radni medij kontaminiran malom količinom ugljičnog monoksida (CO) i ugljičnog dioksida (CO₂) [3, str. 4]. Kontaminacija nije utjecala na radne performanse *cryocoolera* [3, str. 4]. U oba testna hladnjaka nisu utvrđeni problemi elektroničke opreme [3, str. 4]. *Second Flight Model* (FM2) je testiran kao bi se ustanovilo daje li hladnjak odgovarajuće temperaturne performanse [3, str. 5]. FM2 održavao je temperaturu germanijskih detektora na 78 K pri 67 W ulazne snage [3, str. 5]. Prilikom lansiranja letjelice u veljači 2002. godine, detektori su postigli temperaturu 65 K pri 90 W na hladnjaku [3, str. 6]. Nakon određenog vremena snaga se postepeno smanjivala na 50 W kako bi se održala temperatura od 72 K – 75 K na aluminijskoj ploči [3, str. 6]. *Cryocooler* M77, iako nije izvorno namijenjen svemirskim primjenama, uspješno je pušten u rad u orbiti.

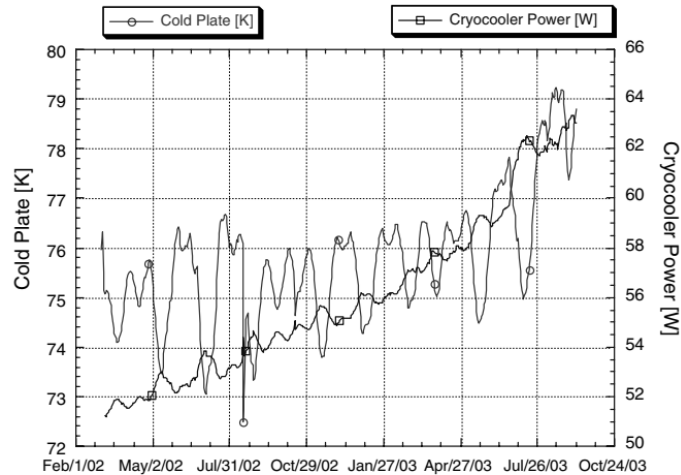


Slika 6.1. Shematski prikaz *cryocoolera* M77B (Boyle, 2002, str. 2).

6.1. Snaga

U RHESSI misiji koristi se Sunpowerov *cryocooler* M77B. M77B sadrži motor s pomičnim magnetom koji se pokreće izmjeničnim valnim oblikom [1, str. 390]. *Cryo Power Converter* (CPC) je elektronička kutija koja preuzima napajanje od 28 V i funkciju sinusnog valnog oblika iz IDPU-a (*Instrument Data Processing Unit*) za pokretanje izlaza impulsno moduliranog pojačala snage za *cryocooler* [1, str. 390]. Na *cryocoolere* utječu vibracije koje mogu oštetiti sam hladnjak. Kako bi se vibracije smanjile, dodaje se drugi motor. Drugi motor pokreće protutežnu masu [1, str. 390]. CPC sadrži malo linearno pojačalo kako bi se pokrenuo protutežni mehanizam [1, str. 390]. *Cryocooler* je postavljen na baznu aluminijsku ploču koja ima dvostruku ulogu kao bazna ploča spektrometra i kao radiator *cryocoolera*. Temperatura radiatora regulira se stalnim grijačem od

30 W, koji radi u radnom ciklusu kojim upravlja IDPU [1, str. 390]. Na snagu hladnjaka povremeno utječu temperatura radiatora spektrometra i poremećaji napona sabirnica letjelice [1, str. 390].



Slika 6.2. Trend rasta snage cryocoolera u promatranom razdoblju od veljače 2002. do kolovoza 2002. godine (Boyle, 2004, str. 390).

6.2. Vibracija i učinkovitost

Germanijski detektori *cryocoolera* osjetljivi su na mikrofonski šum zbog čega se koristi akcelerometar [1, str. 391]. Akcelerometar je uređaj koji se koristi za mjerenje dinamičkog ubrzanja uslijed udaraca, gibanja i udara ili vibracija [15]. Postavljen je u kućište spektrometra. Za podešavanje faze i amplitude protuteže koristi se efektivna vrijednost signala akcelerometra [1, str. 391]. Trenje hladnjaka uzrokuje vibracije koje se pojavljuju trošenjem samog hladnjaka te njegovom kontaminacijom [1, str. 391]. Vibracije mogu biti uzrokovane trenjem između pojedinih dijelova hladnjaka, šumom u elektronici ili nestabilnostima vezanim uz strujanja u radnom mediju [1, str. 391]. Rad kojeg obavi hladnjak određen je temperaturom samog hladnjaka, temperaturom rashladnog medija i rada koji nastaje hlađenjem:

$$W = \frac{T_H - T_M}{T_M} * W_H \quad (6-1)$$

gdje je:

- W - rad kojeg obavi hladnjak,
- W_H - rad koji nastaje hlađenjem,

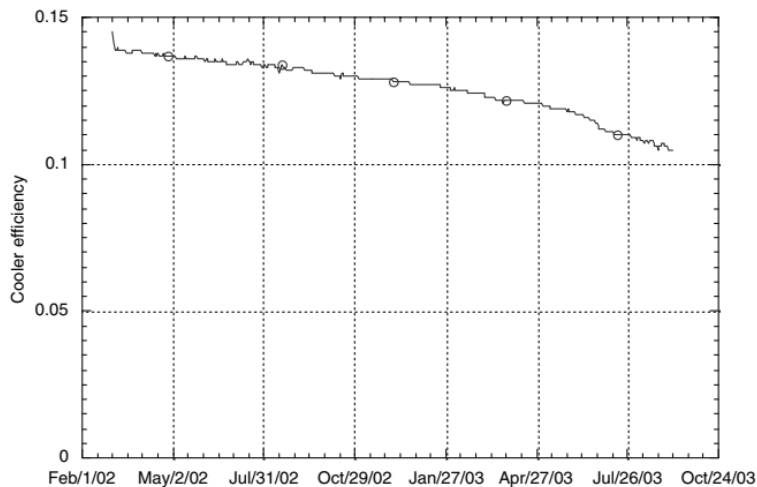
- T_H – temperatura hladnjaka,
- T_M – temperatura rashladnog medija [1, str. 391].

Učinkovitost hladnjaka se pritom može definirati kao omjer električne ulazne snage i rada kojeg obavi hladnjak:

$$\eta = \frac{P}{W} \quad (6-2)$$

gdje je:

- η – učinkovitost,
- P – ulazna snaga,
- W – rad koji hladnjak obavi [1, str. 391].



Slika 6.3. Učinkovitost cryocoolera M77B u promatranom razdoblju (Boyle, 2004, str. 392).

Smanjenje učinkovitosti *cryocoolera* za oko dvadeset posto, od početka od kraja misije, je posljedica degradacije samog hladnjaka nastala uvjetima u svemiru i izloženosti vibracijama (Slika 6.3.).

6.3. Kvarovi i problemi

Kvarovi su sastavni dio svih mehaničkih strojeva i uređaja. Kvarovi koji mogu nastati na *cryocooleru* su:

- električni kvar – električni prekid ili kratki spoj;
- curenje radnog medija iz kućišta *cryocoolera*;
- mehanički i strukturni kvarovi, kao što je olabavljenje dijelova za mehaničko pričvršćivanje;
- kontaminacija radnog medija česticama ili vodom;
- kontakt pokretnih dijelova sa stacionarnom strukturom *cryocoolera* [3, str. 3].

Unaprjeđenjem i nadogradnjom *cryocoolera* moguće je smanjiti broj samih kvarova, ali ih nije moguće u potpunosti isključiti. Uz kvarove tu postoje i problemi samih hladnjaka, koji se smanjuju daljnjim usavršavanjem hladnjaka. Potencijalni problemi *cryocoolera* su:

1. učinkovitost;
2. veličina i težina;
3. vibracije;
4. pouzdanost;
5. vrijeme hlađenja;
6. elektromagnetske smetnje;
7. troškovi [5, str. 2].

7. CRYOCOOLERI U ZNASTVENIM MISIJAMA

Cryocooleri se u svemiru pojavljuju od 1991. godine [7, str. 1]. Prvi hladnjaci lansirani su u satelitima koji istražuju gornju atmosferu (*Upper Atmosphere Research Satellite*) [7, str. 1]. Tri velike NASA-ine platforme, Terra, Aqua i Aura, predstavnice su upotrebe *cryocoolera* u svemirskim primjenama. Misije koje su koristile hladnjake su:

1991 - *Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder* (ISAMS) lansiran je na satelitu *Upper Atmosphere Research Satellite* (UARS) [7, str. 2]. ISAMS koristi 80K Stirling *cryocoolerom* te služi za istraživanje gornje atmosfere [7, str. 2].

1995 - *Cryo System Experiment* (CSE) koristio je *cryocooler* sa savitljivim oprugama na letjelici STS-77 [7, str. 2]. *Cryocooler* je snage 2 W te radi na 60 K [7, str.2]. Razvijen je početkom 1990-ih [7, str. 2].

1996 - *Materials in Devices as Superconductors* (MIDAS) satelit lansiran na STS-79 [7, str. 2-3]. MIDAS je postrojenje za karakterizaciju visokotemperaturnih supravodiča tijekom produženih letova [7, str. 2]. Baziran je na Stirlingovom *cryocooleru* koji ima 1W hlađenja na 80 K [7, str. 2].

1996 - *Brilliant Eyes Ten-Kelvin Sorption Cryocooler Experiment* (BETSCE) lansiran je na letjelici STS-77 [7, str. 3]. JPL apsorpcijski *cryocooler* pokazao je sposobnost hlađenja na približno 11 K pri snazi od 100 mW u manje od dvije minute, čime osigurava relativno nisku prosječnu snagu za vrijeme trajanja hlađenja [7, str.3].

1997 - Satelit *Lewis* lansiran je u letjelici *Athena I* [13]. U ovoj misiji prvi put su lansirani *cryocooleri* s pulsirajućom cijevi. Letjelica je sadržavala TRW mini hladnjak s pulsirajućom cijevi [7, str. 3].



Slika 7.1. TRW mini cryocooler s pulsirajućom cijevi (Boyle i Ross, 2006, str. 3).

1999 - *Measurements Of Pollution In The Troposphere* (MOPITT) lansiran je na svemirskoj platformi *EOS Terra* [7, str. 3]. MOPITT sadrži dva British Aerospace 50-80 K *cryocoolera* koji su unaprijeđeni Stirlingovi *cryocooleri* [7, str. 3] Hladnjaci služe kako bi ohladili par senzora potrebnih za rad samog instrumenta.



Slika 7.2. British Aerospace 50-80 K cryocooler
(Boyle i Ross, 2006, str. 3).

1999 - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) lansiran je na NASA-inoj platformi *EOS Terra* [7, str. 3]. Senzore u ASTER-u hlade dva 80 K Stirlingova *cryocoolera* [7, str. 3]. Jedan *cryocooler* proizveden je od strane Mitsubishija, a drugi od Fujitsua [7, str. 3].

2000 – Hyperion instrument lansiran je na letjelici *New Millennium EO-1* [7, str. 3]. Hyperion sadrži jedan teleskop i dva spektrometra. Spektrometar hladi TRW mini *cryocooler* s pulsirajućom cijevi na 110 K [7, str. 3].

2001 – SABER je lansiran je letjelici TIMED. Koristi radiometar koji služi za istraživanje relativne važnosti radijacijskih, kemijskih i dinamičkih izvora i ponora u Zemljinoj atmosferi [7, str. 3]. SABER sadrži TRW mini *cryocooler* s pulsirajućom cijevi [7, str. 3].

2002 – RHESSI spektrometar koristi Sunpower M77B Stirling *cryocooler* koji radi na 65K – 75K [7, str. 4]. Hladnjak hladi devet germanijskih detektora te predstavlja prvu primjenu komercijalnog *cryocoolera* u svemirskim misijama [7, str. 4].

2002 - *Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer* (NICMOS) sadrži Turbo-Brayton *cryocooler* [7, str. 4]. Nakon oštećenja NICMOS-a bilo je potrebno obnoviti instrument, a to se

postiglo *cryocoolerom*. Astronauti su 2002. godine instalirali hladnjak na NICMOS [7, str. 4]. *Cryocooler Turbo-Brayton* je snage 5 W te hladi na 65 K [7, str. 4].

2002 - *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)* lansiran je svemirskoj platformi *Earth Observing System Aqua (EOS Aqua)* [7, str. 4]. AIRS-iva uloga je izmjeriti temperaturu atmosferskog zraka. On koristi dva 55 K NGST *cryocoolera* s pulsirajućom cijevi [7, str. 4].

2004 - *Tropospheric Emission Spectrometer (TES)* je dizajniran za mjerenje stanja Zemljine troposfere [7, str. 4]. On koristi dva 57 K NGST *cryocoolera* s pulsirajućom cijevi za hlađenje dvije žarišne ravnine na 62 K [7, str. 4]. Ta dva 57 K NGST *cryocoolera* su unaprijeđeni hladnjaci s AIRS-a, a unaprijeđena su tako što je pulsirajuća cijev čvrsto montirana na kompresor [7, str. 4-5].

2004 – *High Instrument Resolution Dynamics Limb Sounder (HIRDLS)* koristi jednostupanjski Stirlingov *cryocooler* od proizvođača Ball Aerospace [7, str. 5]. Hladnjak je služio hlađenju HIRLDS-a na 65 K [7, str. 5].



Slika 7.3. Ball Aerospace Stirling cryocooler (Boyle i Ross, 2006, str. 5).

2004 – *Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging (MESSENGER)* je prva misija putovanja na Merkur [7, str. 5]. MESSENGER misija je sadržavala mali Ricor K508 *cryocooler* [7, str. 5]. *Cryocooler* je služio za hlađenje detektora gama zraka na 90 K [7, str. 5]. Cilj misije je bio snimanje Sunčevog vjetra i kozmičkih zraka dok leti pored planeta [7, str. 5].

2005 - *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* (CRISM) lansiran je na NASA-inoj letjelici *Mars Reconnaissance Orbiter* [7, str. 5]. CRISM dizajniran je za otkrivanje minerala na površini Marsa. On koristi tri Ricor K508 *cryocoolera* na 105 K [7, str. 5].

2009 – Planck misija je prva misija za proučavanje kozmičke mikrovalne pozadine [7, str. 6]. U misiji je korišten 20 K JPL apsorpcijski hladnjak [7, str. 6]. JPL *cryocooler* za apsorpciju vodika dizajniran je za hlađenje LFI detektora na 18 K do 20 K [7, str. 6].

2011 – (ASM-02) Alpha Magnetic Spectrometer–2 je instrument koji mjeri antimateriju u kozmičkim zrakama te se nalazi na međunarodno svemirskoj postaji [7, str. 6]. ASM-02 koristi četiri Sunpower M87 *cryocoolera* [7, str. 7].

2014 - *Orbiting Carbon Observatory* (OCO) je misija stvorena za mjerenje CO₂ u Zemljinoj atmosferi [7, str. 6]. OCO sadrži spektrometar sa žarišnim ravninama koje rade na 120 K do 180 K [7, str. 6]. Hlađenje žarišnih ravnina odvija se pomoći NGST *cryocoolera* s pulsirajućom cijevi [7, str. 6].

2018 – *Advanced Baseline Imager* (ABI) pruža satelitske vremenske fotografije. ABI sadrži dvostupanjski *cryocooler* s pulsirajućom cijevi koji hladi dugovalnu žarišnu ravninu na 60 K te blizu žarišnu ravninu na 200 K [7, str. 7].

2021 - James Webb Space Telescope (JWST) sadrži Mid-Infrared Instrument (MIRI) *cryocooler* (Slika 7.4.). MIRI *cryocooler* je hibridni četverostupanjski hladnjak koji se sastoji od trostupanjskog predhladnjaka s pulsirajućom cijevi i jednog Joule-Thomson hladnjaka [14]. MIRI hladi na temperature ispod 7 K [7, str. 7].



Slika 7.4. MIRI *cryocooler* iz JWST-a (MIRI).

NASA-ine misije koriste veliki broj novih i poboljšanih *cryocoolera*. Dugovječniji životni vijek hladnjaka važan je tehnološki napredak u svemirskoj industriji te u industriji *cryocoolera*. Mnogi *cryocooleri* koji su lansirani prije više od deset godina i danas rade. Trenutne potrebe hladnjaka su da hlade na što nižim temperaturama (6-20 K) i da su što manje snage [7, str. 9]. Smanjenjem snage smanjuje se i sama veličina *cryocoolera*, a samim time i masa. Masa je vrlo važna iz razloga što masa *cryocoolera* utječe na masu letjelice. Letjelice koje su manje mase lakše je i jeftinije je lansirati van Zemljine orbite.

8. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu prikazuje se upotreba *cryocoolera* u svemirskoj misiji RHESSI. Ciljevi ove misije odnosili su se na upoznavanje Sunčevih bljeskova u X i gama području spektra elektromagnetskog zračenja te koronarnih izbačaja mase. Znanstvena opažanja vršena su pomoću spektrometra iz kojeg su dobivane informacije o Sunčevim bljeskovima. Kako bi spektrometar kvalitetno i uspješno radio, bilo je potrebno održavati njegovu temperaturu, a to je postignuto uz pomoć *cryocoolera* Sunpower M77B koji radi na principu Stirlingovog ciklusa. Ovaj *cryocooler* inicijalno nije bio namijenjen za upotrebu u svemirskom okruženju no uz potrebne preinake osposobljen je za njih. Uz različite probleme prvenstveno vezane uz vibracije i snagu hladnjaka, ovaj *cryocooler* premašio je životni vijek od deset godina i ispunio je svoju zadaću. M77B i drugi *cryocooleri* upotrijebljeni u različitim misijama pokazatelji su da se ova tehnologija razvija u željenom smjeru te da će se i u budućnosti misije oslanjati na tu tehnologiju.

LITERATURA

- [1] R. Boyle, „On-orbit performance of the RHESSI cryocooler“, *Cryogenics* 44, str. 389-393, 2004.
- [2] R. Boyle, S. Banks, P. Cleveland i P. Turin, „Design and performance of the HESSI cryostat“, *Cryogenics* 39, str. 969–973, 1999.
- [3] R. Boyle, S. Banks i K. Shirey, „Final Qualification and Early On-Orbit Performance of the HESSI Cryocooler“, „NASA STI Repository, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, 2002.
- [4] M. Fivian, R. Hemmeck, A. Mchedlishvili i A. Zehnder, „Rhessi Aspect Reconstruction“, *Solar Physics* 210, str 87-99, 2002.
- [5] R. Radebaugh, „Cryocoolers: the state of the art and recent developments“, *Journal Of Physics: Condensed Matter* 21, 2009.
- [6] Ronald G. Ross, Jr., „Cryocoolers 13“ 13th International Cryocooler Conference, March 29-April 1, 2004.
- [7] R.G. Ross, Jr. i R.F. Boyle, „An Overview of NASA Space Cryocooler Programs—2006“, The International Cryocooler Conference Annapolis, MD, Juner 14-6, 2006.
- [8] A. Romanelli, „ Alternative thermodynamic cycle for the Stirling machine“, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería Universidad de la República C.C. 30, C.P. 11000, Montevideo, Uruguay, 7.4.2017.
- [9] D. M. Smith, R. P. Lin, B. R. Dennis, G. J. Hurford, A. Zehnder, P. R. Harvey, D. W. Curtis, D. Pankow, P. Turin, M. Bester, A. Csillaghy, M. Lewis, N. Madden, H. F. Van Beek, M. Appleby, T. Raudorf, J. Mctiernan, R. Ramaty, E. Schmahl, R. Schwartz, S. Krucker, R. Abiad, T. Quinn, P. Berg, M. Hashii, R. Sterling, R. Jackson, R. Pratt, R. D. Campbell, D. Malone, D. Landis, C. P. Barrington-Leigh, S. Slassi-Sennou, C. Cork, D. Clark, D. Amato, L. Orwig, R. Boyle, I. S. Banks, K. Shirey, A. K. Tolbert, D. Zarro, F. Snow, K. Thomsen, R. Henneck, A. Mchedlishvili, P. Ming, M. Fivian, John Jordan, Richard Wanner, Jerry Crubb, J. Preble, M. Matranga, A. Benz, H. Hudson, R. C. Canfield, G. D. Holman, C. Crannell, T. Kosugi, A. G. Emslie, N. Vilmer, J. C. Brown, C. Johns-Krull, M. Aschwanden, T. Metcalf i A. Conway, „The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (Rhessi)“, *Solar Physics* 210, str. 3-32, 2002.

- [10] D. M. Smith, R. P. Lin, P. Turin, D. W. Curtis, J. H. Primbsch, R. D. Campbell, R. Abiad, P. Schroeder, C. P. Cork, E. L. Hull, D. A. Landis, N. W. Madden, D. Malone, R. H. Pehl, T. Raudorf, P. Sangsingkeow, R. Boyle, I. S. Banks, K. Shirey i Richard Schwartz, „The Rhesi Spectrometer“, Solar Physics 210, str. 33-60, 2002.
- [11] The Editors of Encyclopaedia Britannica, „Solar Flare“, Britannica, 2013.
<https://www.britannica.com/science/solar-flare> (6.6.2023.).
- [12] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 12. 6. 2023. na <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=18042>.
- [13] NASA Space Science Data Coordinated Archive, NASA Official: Dr. David R. Williams, 2022. Pristupljeno 19.6. 2023. na
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1997-044A>.
- [14] James Webb Space Telescope, NASA, Goddard Space Flight Center. Pristupljeno 19.6.2023. na <https://webb.nasa.gov/content/about/innovations/cryocooler.html>.
- [15] Akcelerometar. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 20. 6. 2023. na
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=1089>.
- [16] Solar Aspect Sytem, Instrument, HESSI. Pristupljeno 21.6.2023. na
https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/ssl_site/instrument/sas.html.
- [17] Roll-Angle System, Instrument, HESSI. Pristupljeno 21.6.2023. na
https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/ssl_site/instrument/ras.html.
- [18] RHESSI Attenuators, NASA Official: Brian Dennis. Pristupljeno 21.6.2023 na
<https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/spacecraft-instrument/attenuators/>.
- [19] RHESSI Spacecraft and Instrument Components, NASA Official: Brian Dennis. Pristupljeno 21.6.2023 na <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/spacecraft-instrument/spacecraft-instrument/index.html>.
- [20] Grids, Instruments. Pristupljeno 23.6.2023. na
<http://hessi.ssl.berkeley.edu/instrument/grids.html>.
- [21] RHESSI Grids, NASA official: Brian Dennis. Pristupljeno 21.6.2023. na
<https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/spacecraft-instrument/grids/>.

- [22] Grid Pairs, NASA official: Brian Dennis. Pristupljeno 21.6.2023. na <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/mission-concept/imaging/grid-pairs/index.html>.
- [23] THE RHESSI MISSION CONCEPT, NASA official: Brian Dennis. Pristupljeno 21.6.2023. na <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/mission-concept/mission-concept/index.html>.
- [24] RHESSI SCIENTIFIC OBJECTIVES, NASA official: Brian Dennis. Pristupljeno 21.6.2023. na <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/scientific-objectives/index.html>.
- [25] RHESSI MISSION FACTS, NASA official: Brian Dennis. Pristupljeno 21.6.2023. na <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/mission-facts/index.html>.
- [26] Ekspanzija, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 23. 6. 2023. na <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=17416>.

Slike:

- *Solar Aspect System* [Slika]. Preuzeto 3.6.2023. sa https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/ssl_site/instrument/sas.html.
- *Germanium detectors* [Slika]. preuzeto 3.6. 2023. sa https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/ssl_site/instrument/germanium.html.
- *The RHESSI spectrometer with removeable attenuators* [Slika]. Preuzeto 12.6.2023. sa <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/spacecraft-instrument/spacecraft-instrument/index.html>.
- *Photo of Grid 1* [Slika]. Preuzeto 30.5.2023. sa <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/spacecraft-instrument/grids/>.
- *Fast Cool Down Joule-Thomson Miniature Cyogenic Cooler* [Slika]. Preuzeto 12.6.2023. sa <https://cryocoolers.eu/joule-thomson-cryocoolers-fast-cool-down/>.
- *Turbo Brayton* [Slika]. Preuzeto 12.6.2023. sa <https://absolut-system.com/space-cryogenics/turbo-brayton/>.
- *RP-082B2 4K Pulse Tube Cryocooler* [Slika]. Preuzeto 12.6.2023. sa <https://www.shicryogenics.com/product/rp-082b2-4k-pulse-tube-cryocooler-series/>.

- *Gifford-McMahon cold head AL200* [Slika]. Preuzeto 12.6.2023. sa <https://absolut-system.com/cryogenics/cryocooler/>.
- *MIRI* [Slika]. Preuzeto 12.6. 2023. sa <https://webb.nasa.gov/content/about/innovations/cryocooler.html>.
- *Computer Aided Design* [Slika]. Preuzeto 12.6.2023. sa <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/spacecraft.htm>.

SAŽETAK

Završni rad prikazuje upotrebu *cryocoolera* u svemirskim misijama, s naglaskom na misiju RHESSI. Prikazane su sastavne komponente letjelice. *Cryocooler*, kao jedna od komponenti, održava radnu temperaturu spektrometra potrebnog za dobivanje slika Sunčevih bljeskova. RHESSI-jev *cryocooler* radi na principu Stirlingovog ciklusa, kao što je opisano u ovom radu. Prikazane su različite vrste *cryocoolera* te njihova svojstva.

Ključne riječi: *cryocooler*, Stirlingov ciklus, RHESSI misija, letjelica.

ABSTRACT

APPLICATION OF THE STIRLING CYCLE IN NON-TERRESTRIAL CRYOCOOLERS ON THE EXAMPLE OF THE RHESI MISSION

This final paper describes use of cryocoolers in space missions with particular emphasis on the RHESSI mission. Description of the components which are integral part of the spacecraft is given. Cryocooler, as one of the components, is used for maintaining the working temperature of the spectrometer, which is necessary when recording observations related to the solar flares. RHESSI cryocooler operates on principles of the Stirling engine, as described in this paper. Different types of cryocoolers and their properties are summarised.

Keywords: cryocooler, Stirling cycle, RHESSI mission, spacecraft.

ŽIVOTOPIS

Filip Repak rođen je 14. lipnja 2001. godine u Slavanskom Brodu. Pohađao je Osnovnu školu Vjekoslav Klaić Garčin. Srednjoškolsko obrazovanje stekao je u Tehničkoj školi Slavonski Brod, koju je završio 2020. godine. U Tehničkoj školi stekao je kvalifikaciju elektrotehničar. Iste godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek te trenutno završava preddiplomski studiji.