



PELEN RAIVO - havaijilaiset räjähdyspurkaukset

ARTO V. LUTTINEN JA
DONALD A. SWANSON

*Ka Wahine o Pele i hi'a i kana ahi
A a pulupulu,
kukuni, wela ka lani:
He uwila ku'i no ka honua;
Hekili pa'apa'ina i ke ao;
Pohaku puoho, lele iluna;
Opa'ipa'i wale ka Mauna;
Pipili ka lani, pa'a ia moku.
Nalo Hawaii i ka uahi a ka Wahine.*

Tämä on Pelen tapa:
Tulikepillään Hän sytyttää liekin,
joka leimahtaen sytyttää taivaan.
Maailma näkee salamat, kuulee ukkosen
jylinän kaikuvaan vuorten seinämistä;
kivet sinkoavat taivaalle ja moukaroivat päivän
ravistellen vuorta juuriaan myöten.
Taivaankansi putoaa maahan
ja Havaiji peittyi Hänen savuunsa.

(Englanninkielisestä alkuperäis-
käännöksestä suomentanut AVL)

Havaiji on geologisen maailmanku-
van *locus classicus*. Keskelle Tyynen
Valtameren litosfäärilaattaa synty-
nyt vulkaaninen saariryhmä haas-
taa edelleenkin käsityksemme Maan peruspro-
sesseista; sen olemassaolo ei selity laattatekto-
nisen teorian avulla, vaan sen alkuperä on lii-
tetty litosfäärin alla sijaitsevaan lämpöanoma-
liaan, kuumaan pisteeseen. Havaijin saariryh-
mä ja siitä luoteeseen aina Aleutien subdukti-
ovyöhykkeelle jatkuva merenalainen tulivuor-
riketju (Hawaiian – Emperor seamounts) on-
kin oppikirjaesimerkki kuuman pisteen ai-
heuttamasta vaipan sulamisesta ja litosfäärilaa-
tan liikkeestä kuuman pisteen yli.

Havaijin kuuman pisteen syyksi arvellaan
vaipan pluumia, mahdollisesti ytimen ja vai-
pan rajapinnalta kohoavaa virtausta. Viime
vuosina pluumiteoria on ollut kasvavan kri-
tiikin kohteena (<http://www.mantleplumes.org/>). Havaijilla tärkeimpiin pluumimallia
puoltaviin todisteisiin kuuluvat laavakivien ja
niiden oliviinihajarakeiden Mg-Fe-tasapainon
osoittamat korkeat lämpötilat (esim. Putirka
2005), syvään vaippaan viittaavat hivenalku-
aine- ja Os- ja He-isotooppikoostumukset
(esim. Brandon et al. 1998; Kurz et al. 1983;

Moreira and Allègre 1998) ja jopa ytimen pinnalle ulottuva vaipan nopeusanomalia seismisissä tomografiakuviissa (esim. Montelli et al. 2006).

Mallikelpoisen kilpitulivuoren kehitysvaiheet

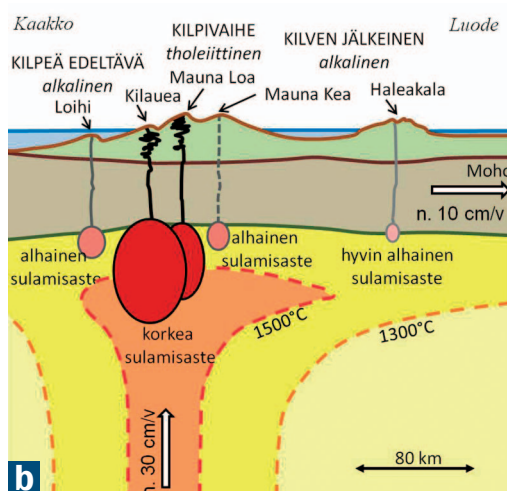
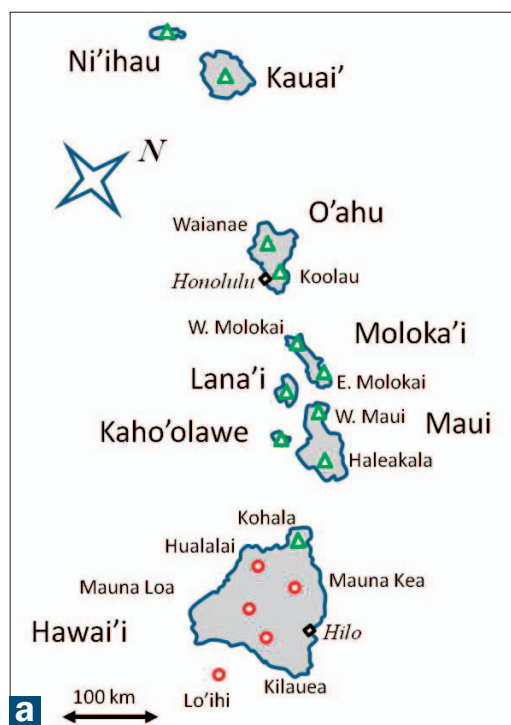
Havaijilaisen tulivuoren kehityskaari näyttää sisältävän 3–4 aktiivista vaihetta, jotka aiheuttavat merellisen litosfäärilaatan liikkeestä kuumen pisteen yli (kuva 1).

Kuuman pisteen eturintamassa vaipan osittainen sulaminen on vähäistä; matala sulamisaste synnyttää alkalisia mafisia sulia, jot-

ka purkautuessaan synnyttävät merenalaisen tulivuoren. Havaijin pääsaaren eteläpuolella sijaitseva Lo’ihi on esimerkki havaijilaisen tulivuoren ensimmäisestä, kilpivaihetta edeltävästä purkaustoiminnasta (Kuva 1).

Kun tulivuori siirtyy kuuman pisteen keskuksen päälle, tehostunut vaipan sulaminen tuottaa suuria määriä tholeiittista mafista sulaa. Tulivuori siirtyy kilpivaiheeseen, jonka kuluessa se kasvaa nopeasti jättiläismäiseksi kilpitulivuoreksi. Mauna Loa on planeettamme suurin tulivuori, jonka laavakerrostuman tilavuus on luokkaa 80 000 km³ ja paksuus enimmillään jopa 17 km (vuoren alapuolella litosfäärilaatta on taipunut n. 8 km alaspäin; <http://hvo.wr.usgs.gov/maunaloa/>).

Kilpivaiheen laavapurkausten koostumus on hyvin tasalaatuinen; kuuma, oliviinihajarakeita sisältävä tholeiittimagma synnyttää pahoehoe- ja ‘a’a-laavoja. Laavasuihkulähteet saavat pontensa purkauksessa kivilsulasta vapautuvista kaasuisista. Mauna Loan pikkuserk-



Kuva 1. Havaijin saariryhmän aktiiviset (punainen ympyrä) ja lepäävät/sammuneet (vihreä kolmio) tulivuoret (a). Kaaviokuva Havaijin pluumista ja kilpitulivuorten kehitysvaiheista litosfäärilaatan liikkues- sa pluumin yli luoteseen (b). Kuvat: Arto Luttinen.

Fig. 1. Hawaiian active (red circles) and dormant/extinct (green triangles) volcanoes (a). A schematic model of the Hawaiian plume and the evolutionary stages of shield volcanoes as the lithospheric plate moves northwest over the plume (b). Figures: Arto Luttinen.

ku Kilauea lienee tätä nykyä planeettamme aktiivisin tulivuori – se on purkautunut katkoksetta jo vuodesta 1983. Purkaustoiminta keskittyy Kilauean itäisellä siirrosvyöhykkeellä sijaitsevaan Pu’u O’o’n roiske- ja kuonakeilaan (spatter and cinder cone), joka on ollut 2000-luvulla useiden tuhoisien laavavirtojen lähteenä (Kuva 2).

Kilpivaihe päättyy tulivuoren siirtyessä pois kuuman pisteen keskuksesta. Lämpötila riittää yhä vaipan vähäiseen sulamiseen. Kilpivaiheen päätyttyä pienet, sopeutumattomista alkuaineista ja vedestä rikastuneet alkaliset magma-annokset synnyttävät purkautuessaan kuonakeiloja ja vähäisiä laavakerroksia. Hidastunut magman tuotto mahdollistaa kiteytymisdifferentiaation, jonka seurauksena laavojen viskositeetti ja fluidipitoisuus kasvavat; kilpitulivuoren kaldera täyttyy ja sen rinteet jyrkkenevät. Mauna Kea ohitti kilpivaiheen noin 200 000 vuotta sitten. Sen rokonarpinen

Kuva 2. Kilauean itäisellä siirrosvyöhykkeellä sijaitseva Pu’u O’o’n roiske- ja kuonakeila on ollut aktiivinen vuodesta 1983 alkaen. Kuvassa on kraatterin laavajärvi 20.9.2011. Laava alkoi virrata ulos kraatterista 24.9.2011. Kraatterin läpimitta on noin 300 m. Kuva: Arto Luttinen.

Fig. 2. Pu’u’O’o’ spatter and cinder cone in Kilauea’s Eastern Rift Zone has been active since 1983. The photo of the lava lake is dated on 20.9.2011. Lava started flowing out of the crater on 24.9.2011. The diameter of the crater is ca. 300 m. Photo: Arto Luttinen.





profiili on lukuisten kuonakeilojen synnyttä-mä (Kuva 3). Purkaustoiminta lakkaa vähitel-len kokonaan, kun tulivuori loittonee kuuman pisteen keskuksesta. Pääsaaren Kohala-tuli-vuori (Kuva 1a) purkautui viimeksi noin 120 000 vuotta sitten ja luokitellaan nyt sam-muneeksi. Jäähtyvän litosfääriin vajoaminen, eroosio sekä massiiviset, jättitsunameja aihe-uttaneet maanvyöryt ovat kutistaneet suuren kilpitulivuoren murto-osaan alkuperäisestä koosta.

Jotkut eroosion ja maanvyöryjen kulutta-mista havaijilaisista tulivuorista aktivoituvat uudelleen jopa 2 miljoonan vuoden tauon jäl-keen kun litosfääriilaatan liike on vienyt sen satojen kilometrien päähän kuumasta pistees-tä. Uuden aktivoitumisen syy on edelleen kiis-tanalainen ja voi liittyä esimerkiksi kuuman pisteen virtausdynamikkaan ja/tai litosfääriin

taipumiseen aktiivisten kilpitulivuorten ym-pärillä (esim. Garcia et al. 2010). O’ahun saa-rella Koolaun tulivuori heräsi uudelleen eloon noin 500 000 vuotta sitten. Uudelleen alka-nut purkaustoiminta on tuottanut kuona- ja tuhkkakeiloja, joista Honolulun vulkaaniseen sarjaan kuuluva Koko-tuhkkakeila on vain 7 000 vuotta vanha (Easton ja Olson 1976) eikä uusi purkaus suurkaupungin lähellä ole mahdollon.

Kilpitulivuoren räjähdyspurkaukset

Edellä yksinkertaistetussa Havaijin tulivuor-ten kehitysmallissa kilpivaihe on näyttävien, mutta suhteellisen harmittomien laavapurka-usten luonnehtima. Aktiivinen Kilauea onkin suosittu turistikohde, varsinainen ”drive-in”



Kuva 3. Uurteinen kivenlohkare Mauna Kealla. Mauna Kean huippu on nykyisin 4205 m merenpinnan yläpuolella. Vähäisen purkaustoiminnan ansiosta jääkaudella syntyneet moreenimuodostumat ja uur-teiset kalliot ovat edelleen näkyvissä, toisin kuin lähes yhtä korkean mutta huomattavasti aktiivisem-man Mauna Loan laella. Taustalla näkyy noin 4500 vuotta vanhoja kuonakeiloja. Kuva: Arto Luttinen.

Fig. 3. Glacial striations at Mauna Kea. The summit of Mauna Kea is currently at 4205 m above sea level. Due to minor eruptive activity, glacial deposits and striated surfaces are still observable unlike at equally high but notably more active Maua Loa. The cinder cones in the background are ca. 4500 years old. Photo: Arto Luttinen.



Kuva 4. Vulkanologisen observatorion tutkija ja entinen johtaja Don Swanson kertoo vierailijaryhmälle Kilauean räjähdyspurkauksista ja kolaristaan pyroklastisen heitteleen kanssa vuonna 2008. Taustalla näkyy Halema'uma'u-kraatterin, Pele-jumalattaren koti. Kuva: Arto Luttinen.

Fig. 4. Don Swanson, a researcher and the former director of the Hawaiian Volcano Observatory, introduces visitors to Kilauea's explosive eruption history and his collision with a pyroclastic block in 2008. Halema'uma'u crater, home of goddess Pele, is in the background. Photo: Arto Luttinen.

tulivuori. Vuosittain noin 2 miljoonaa turista käy ihailemassa sen laavasuihkulähteitä, laavavirtoja ja rikinkatkuista Pelen kotikoloa Halema'uma'un kraatterissa Kilauean kalderassa (Kuva 4). Uusimman tiedon valossa Kilauea on kuitenkin paljastumassa otaksuttua luonteikkaammaksi tulivuoreksi; Pelen raivo nimittäin johtaa toisinaan hyvinkin tuhoisiin räjähdyspurkauksiin.



Kuva 5. Halema'uma'un räjähdyspurkaus vuonna 1927 herätti tutkijoiden ja yleisön huomion ja vaati uhkarohkean valokuvaajan hengen. Vuonna 2008 käynnistynyt räjähdyspurkausten sarja käynnisti havaijilaisten räjähdyspurkauksien tutkimukset. Pikkukuvassa 12.10.2008 tapahtunut räjähdyspurkaus. Kuvat: USGS.

Fig. 5. Explosive eruption of Halema'uma'u in 1927 stirred scientists and the public and led to the death of an adventurous photographer. The series of explosive eruptions since 2008 launched modern research of Hawaiian explosive activity. Inset shows an explosive eruption on October 12. 2008. Photos: USGS.

Kilauea on purkautunut räjähdysmäisesti aiemminkin. Vuonna 1927 uhkarohkea valokuvaaja menehtyi kuvatessaan 17 päivää kestänyttä räjähdyspurkausten sarjaa (Kuva 5). Kilauean rinteillä on todisteita 1900- ja 2000-luvun räjähdyksiä huomattavasti voimakkaamista pyroklastisista purkauksista, joissa kerrostunut aines vaihtelee tuhkasta yli 2 m läpimittaisiin lohkareisiin (Swanson et al. 2010). Kilauean kalderan eteläpuolella on yli 11 metriä paksu pyroklastinen kerrostuma, joka on syntynyt 1500 – 1790 AD ajanjaksona ja jossa voidaan havaita vähintään 12 kuuman pyroklastisen hyökypilven tuottamaa yksikköä (Kuva 6). On todennäköistä, että Kilauean huipun kaldera sai alkunsa vuoden 1500 tienoilla tapahtuneessa suurpurkauksessa (Swanson ja Rausch 2008) ja että vuoden 1790 voimakas räjähdyspurkaus aiheutti mahdollisesti jopa yli 5000 natiivin kuoleman (Kuva 6). Tällä Yhdysvaltain historian kohtalokkaimmalla tulivuorenpurkauksella oli ratkaiseva vaikutus Havaijin historiassa; tuho iski taisteluun matkalla olleen kuningas Keōuan armeijaan ja käänsi vaakakupin ylivaltaa tavoitelleen kuningas Kamehamehan eduksi. Havaijin suullisen perimätiedon, silminnäkijäkuvausten ja pyroklastisten kerrostumien tutkimusten avulla on voitu päätellä, että voimakkaimmat 1500–1790 AD tapahtuneista räjähdyspurkauksista sinkosivat ilmaan jopa yli 20 miljoonaa tonnia kiviainesta ja nostivat tuhkapilven 4–17 km korkeuteen läntisten suihkuvirtausten kuljetettavaksi (Swanson et al. 2008).

Havaintojen perusteella on laadittu malli Kilauean räjähdyspurkauksista (Kuva 7). Kilauean räjähdyspurkaukset aiheutuvat todennäköisesti pohjaveden päätyemisestä magmakanaavaan. Nykyisin kalderan laavajärven pinnan ollessa korkealla ympäristön pohjavesi ei pääse kosketukseen magman kanssa. Jos kuitenkin laavajärven pinta vajoaa pohjaveden pinnan alapuolelle, vesi pääsee virtaamaan



Kuva 6. Kilauean pyroklastisia kerrostumia (a) ja jalanjälki vuoden 1790 lapillikerroksessa (b). Kuva: Arto Luttinen.

Fig. 6. Pyroclastic deposits of Kilauea (a) and a footprint in lapilli of the 1790 eruption (b). Photo: Arto Luttinen.

syöttökanavaan ja olosuhteet räjähdyspurkaukselle avautuvat.

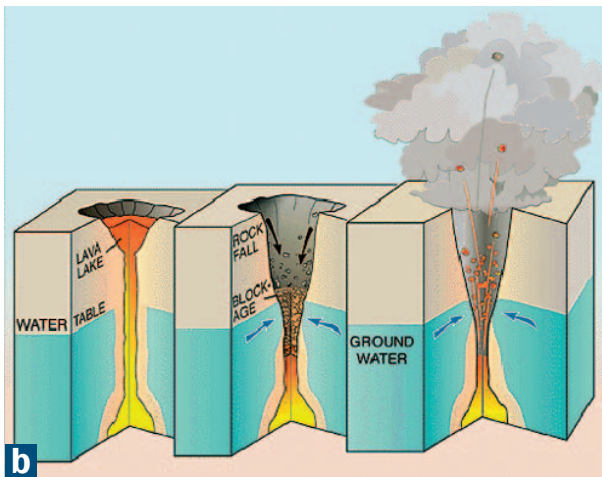
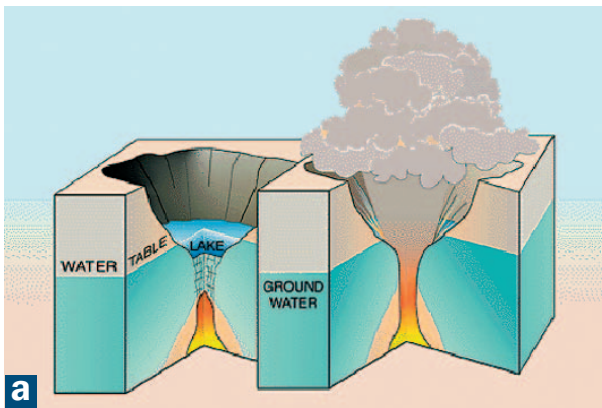
Kilauean kilpitulivuorivaiheeseen on kuullut vähintään kaksi voimakkaiden räjähdyspurkausten luonnehtimaa jaksoa n. 500–1000 AD ja 1500–1790 AD. Luultavimmin vastavia jaksoja on ollut myös aiemmin. Nykyisin, laavapurkausten vallitessa, pohjaveden pinta on noin 500 m Kilauean kalderan pohjan alapuolella eikä suuria mm. lentoliikennettä uhkaavia räjähdyspurkauksia ole odotettavissa lähitulevaisuudessa. Räjähdyspurkausten tutkimuksen käynnistänyt purkaus vuonna 2008 johtuikin luultavasti magmaattisen veden väkivaltaisesta vapautumisesta sortuneen syöttökanavan läpi. Halema'uma'un uusimpien purkauksen ennakoimattomuus on johtanut kraatterin lähimaaston sulkemiseen turisteilta

toistaiseksi. Kilauean menneitä ja mahdollisia tulevia räjähdyspurkauksia pyritään ymmärtämään vulkanologisen observatorion johtamissa tutkimushankkeissa.

Tarinan opetus?

Ensinnäkin, Kilauea ja ehkäpä moni muu kilpitulivuori purkautuu toisinaan väkivaltaisesti räjähtäen. Kulutukselle alttiilla pyroklastisilla kerrostumilla on taipumus tuhoutua; ne ovat mitä todennäköisimmin aliedustettuja vulkaanisissa kerrostumissa. Toiseksi, kansantarinat voivat tarjota arvokasta silminnäkijätietoa; Kilauean tapauksessa kalderan synnyn ajoittaminen vuoden 1500 AD purkaukseen

perustuu paljolti suulliseen perimätietoon Pelen vaiheista. Kolmanneksi, havaijilaisten räjähdyspurkausten tarina muistuttaa meitä niistä filosofisista totuuksista, että ”kiveenkin hakattu” geologinen käsitys voi yllättäen osoittautua peräti virheelliseksi ja että vaikka oppikirjoihin tiensä löytävät käsitteelliset valaisevat, on valokeilan ulkopuolelle jääviä ilmiöitä usein vaikea havaita. Kilauean pyroklastiset kerrostumat ovat olleet kaiken kansan näkyvillä ja räjähdyspurkauksia on jopa valokuvattu, mutta poikkeuksellinen ilmiö on jäänyt sangen vähälle huomiolle. Taitaakin olla niin, että räjähdyspurkauksen merkitys valkenee kilpitulivuoritutkijalle vasta vulkaanisen heitteleen kanssa kolaroinnin myötä!



Kuva 7. Kilauean räjähdyspurkausmalli, jossa laavajärven pinta laskee pohjaveden pinnan tason alapuolelle: Kohoavan magman törmätessä kalderaan muodostuneeseen vesialtaaseen tapahtuu voimakas räjähdyspurkaus (a). Calderan seinämän luhistuminen estää muodostuneen vesihöyryn pakenemisen ja johtaa räjähdyspurkaukseen (b). Kuvat: USGS.

Fig. 7. A model for explosive eruptions of Kilauea involves dropping of the lava lake surface below groundwater level: Rising of magma into caldera lake causes forceful explosive eruptions (a). Collapse of the caldera wall prevents escape of water vapor and leads to explosive eruptions (b). Figures: USGS.

English abstract

Kilauea volcano on the island of Hawai'i, though best known for its frequent quiet eruptions of lava flows, has erupted explosively many times in its history – most recently in 2011. At least six such eruptions in the past 1500 years sent ash into the jet stream, at the cruising altitudes for today's aircraft. The eruption of 1790 remains the most lethal eruption known from a U.S. volcano. However, the tendency of Kilauea's 2 million annual visitors is to forget this dangerous potential. Cooperative research by scientists of the U.S. Geological Survey and its partners is improving our understanding of Kilauea's explosive past and its potential for future violent eruptions.

Kirjallisuus

- Brandon A.D., Walker R.J., Morgan J.W., Norman M.D., Prichard M. (1998). Coupled ^{186}Os and ^{187}Os Evidence for Core-Mantle Interaction. *Science* 280, 1570–1573.
- Easton W.H. and Olson E.A. (1976). Radiocarbon profile of Hanauma Reef, Oahu, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 87, 711–719.
- Garcia M.O., Swinnard L., Weis D., Greene A.R., Takatagami, Sano H., Gandy C.E. (2010). Petrology, geochemistry and geochronology of Kaua'i lavas over 4.5 Myr: Implications for the origin of rejuvenated volcanism and the evolution of the Hawaiian plume. *Journal of Petrology* 51, 1507–1540. doi:10.1093/petrology/egq027
- Kurz M.D., Jenkins W.J., Hart S.R., Clague D. (1983). Helium isotopic variations in volcanic rocks from Loihi Seamount and the Island of Hawaii. *Earth and Planetary Science Letters* 66, 388–406.
- Montelli R., Nolet G., Dahlen F., Masters G. (2006). A catalogue of deep mantle plumes: new results from finite-frequency tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7. doi:10.1029/2006GC001248.
- Moreira M., Allègre C.J. (1998). Helium–Neon systematics and the structure of the mantle. *Chemical Geology* 147, 53–59.
- Putirka K.D. (2005). Mantle potential temperatures at Hawaii, Iceland, and the mid-ocean ridge system, as inferred from olivine phenocrysts: Evidence for thermally driven mantle plumes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6, doi:10.1029/2005GC000915.
- Swanson D.A. (2008). Hawaiian oral tradition describes 400 years of volcanic activity at Kilauea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 427–431.
- Swanson D.A., Rausch, J. (2008). Human footprints in relation to the 1790 eruption of Kilauea. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2008, abstract #V11B-2022*. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AGUFM.V11B2022S>
- Swanson D., Zolkoz S., Haravitch B. (2010). Ballistic blocks surrounding Kilauea's caldera. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #V11D-2313*. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFM.V11D2313S>

ARTO V. LUTTINEN

Geologian museo

Luonnontieteellinen keskusmuseo,

PL 17

00014 Helsingin yliopisto

DONALD A. SWANSON

U.S. Geological Survey

Hawaiian Volcano Observatory

PO Box 51

Hawaii National Park

HI 96718, USA