

Tuikaineet ja niiden käyttö avaruudessa

Markus Kärpijoki

LuK-tutkielma
IMC
Kemian laitos
Turun Yliopisto

.5.2026

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

Pääaine: Kemia

Tekijä: Markus Kärpijoki

Otsikko: Tuikeaineet ja niiden käyttö avaruudessa

Ohjaaja: Prof. Mika Lastusaari

Sivumäärä: 11 sivua

Päivämäärä: 3.6.2026

Tuikeaineet pystyvät muuntamaan korkeaenergistä säteilyä matalaenergisiksi säteilyksi. Niillä on monia eri ominaisuuksia, jotka mahdollistavat tuikeaineiden monet sovellukset. Tuikeaineita on käytetty esimerkiksi hiukkasfysiikassa, avaruustutkimuksessa, porausreikämittauksissa, lääketieteessä ja meritutkimuksessa. Tässä tutkielmassa käsitellään tarkemmin tuikeaineiden hyödyntämistä avaruudessa.

Tuikeaineet jaetaan orgaanisiin ja epäorgaanisiin tuikeaineisiin. Tuikeaineiden tärkeisiin ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa valosaanto, säteilynkestävyys, hajoamisaika ja energian erottelukyky. Näitä ominaisuuksia vertaillaan, kun etsitään sopivaa tuikeainetta tietylle käyttökohteelle.

Avaruustutkimuksessa tärkeä tuikeaineden sovelluskohde on gammaspektroskopiassa. Gammaspektroskopian avulla pystytään määrittämään taivaankappaleiden koostumuksia. Sen avulla on pystytty analysoimaan Marsin, Kuun, Merkuriuksen ja asteroidien koostumuksia. Tuikeaineet voisivat siis auttaa todella kaukaisten kappaleiden koostumuksia aurinkokuntamme ulkopuoleltakin.

Avainsanat: Tuikeaine, gammaspektroskopia

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Tuikeilmiö	2
2.1	Tuikeaineet	2
2.2	Tuikeaineiden ominaisuudet	3
2.3	Tuikeaineiden sovellukset	5
3	Tuikeaineet avaruudessa	7
3.1	Gamma-spektroskopia	7
3.2	Kalorimetrit avaruudessa	8
4	Yhteenveto	9

Lyhenteet

PET	Eng. Positron Emission Tomography, positroniemissiotomografia
CT	Eng. Computed Tomography, tietokonetomografia
DAMPE	Eng. Dark Matter Particle Explorer, pimeän aineen hiukkastutkija
CALET	Eng. Calorimetric Electron Telescope, kalorimetrinen elektroniteleskooppi
HERO	Eng. High-Energy Ray Observatory, korkeaenergisten säteiden observatorio
PPO	Eng. Polyphenylene oxide, polyfenyylioksidi
PBD	Eng. Pyrrolbenzodiazepine, pyrrolobentsodiatsepiini

1 Johdanto

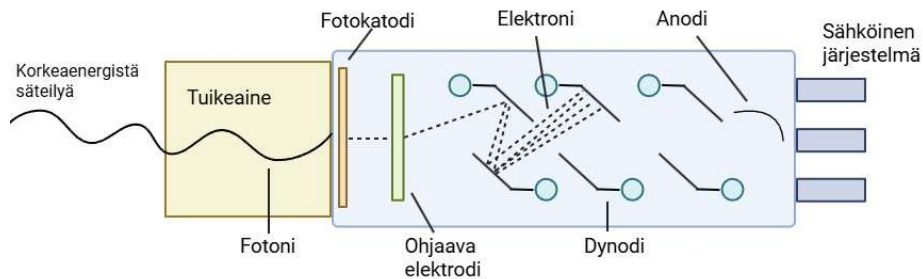
Avaruuden tutkiminen on aina kiehtonut ihmisiä. Avaruudessa on niin paljon tuntematonta ja vaikeasti uskottavia asioita ja ilmiöitä, kuten supernovia ja mustia aukkoja. Itse planeetatkin ovat uskomaton asia. Niiden koostumukset ja olosuhteet ovat ainutlaatuisia. Monet uhraavat koko elämänsä tieteen vuoksi tutkiakseen avaruutta ja sen ihmeellisiä ilmiöitä.

Tuikaineita hyödynnetään monenlaisissa käyttökohteissa, kuten erilaisissa kalorimetreissä ja ilmaisimissa. Tuikaineita on monenlaisia, ja siksi niitä voidaan käyttää erilaisissa sovelluksissa. Tietynlaiset tuikaineet ovat käytössä ääriolosuhteissa, minkä takia tuikaineet voisivat parantaa ja tehostaa avaruustutkimuksia. Tuikaineiden avulla ajatuksemme avaruudesta voisivat mullistua ja ymmärryksemme avaruudesta, sekä sen ilmiöistä voisi selventyä.

Tässä tutkielmassa käsitellään tuikaineita, tutkitaan niiden ominaisuuksia ja käydään läpi niiden tärkeimpiä sovelluksia. Sovelluksista keskitytään etenkin avaruustutkimukseen ja sen tuomiin mahdollisuuksiin. Tutkielman tavoitteena on parantaa ymmärrystä tuikaineista ja pohtia, mitä tulevaisuuden mahdollisuuksia tuikaineet antavat avaruustutkimukselle.

2 Tuikeilmiö

Tuikaineet ovat luminoivia materiaaleja, jotka absorboivat korkeaenergistä ionisoivaa säteilyä ja pystyvät muuntamaan sen matalaenergisiksi säteilyksi [1], [2]. Tätä ilmiötä kutsutaan tuikeilmiöksi. Korkeaenerginen säteily muuttuu yleensä näkyväksi valoksi. Tuikaineita käytetään tuikeilmaisimissa, joista yksi esimerkki on valomonistinputki. Tuikeilmiön toimintaperiaate on samanlainen ilmaisimesta riippumatta. Korkeaenerginen säteily virittää tuikaineen elektroneja ja viritystilojen purkautuessa emittoituu fotoneita, joita voidaan hyödyntää eri tavoin. Kuvassa 1 on esitetty valomonistinputken toimintaperiaate.



Kuva 1: Valomonistinputken toimintaperiaate.

2.1 Tuikaineet

Tuikaineet voidaan jakaa karkeasti orgaanisiin ja epäorgaanisiin tuikaineisiin, jotka jakautuvat vielä omiin alaluokkiinsa. Orgaaniset tuikaineet jaetaan kolmeen kategoriaan: orgaanisiin kiteisiin, orgaanisiin nesteisiin ja muovisiin tuikaineisiin [1]. Orgaanisia kiteitä ovat muun muassa antraseeni ja stilbeeni [3]. Ne ovat erittäin tehokkaita, mutta samalla ne ovat kalliita ja vaikeakäyttöisiä muihin vaihtoehtoihin verrattuna [1, 3]. Lisäksi orgaanisten kiteiden tehokkuus on vahvasti riippuvainen niiden puhtaudesta [3]. Näistä syistä orgaanisia kiteitä ei käytetä usein, mutta niitä yritetään kehittää jatkuvasti. Orgaanisten nesteiden tuikaineet koostuvat liuottimesta ja liukenevasta aineesta [1, 3]. Liuottimen tehtävänä on absorboida säteilyn energia ja liuottaa liukeneva aine, ja liukenevan aineen tehtävänä on tuottaa tuikaineen avulla syntyvää valoa. Liuottimina käytetään muun muassa bentseeniä ja toluenia, kun taas liukenevina aineina käytetään esimerkiksi p-terfeeniä, PPO:ta ja PBD:tä [3]. Orgaaniset liuottimet ovat muita tuikaineita halvempia, joten niitä

käytetään, kun sovelluskohde vaatii suuren määrän tuikeainetta [1]. Kaikkein käytetyin orgaanisten tuikeaineiden luokka on muoviset tuikeaineet, jotka tehdään nestemäisistä tuikeaineista polymeroimalla ne kiinteiksi [1, 3]. Nestemäinen osa sisältää yleensä aromaattisen renkaan. Näitä ovat esimerkiksi styreeni ja vinyylitolueeni [1]. Muovisia tuikeaineita käytetään paljon, koska niitä on helppo muovailta ja tuottaa. Aikaisimmat muoviset tuikeaineet eivät olleet kovin tehokkaita, mutta ne ovat jatkuvasti kehittyneet paremmiksi ja niissä on hyvät tulevaisuuden mahdollisuudet.

Epäorgaaniset tuikeaineet ovat käytetyimpiä tuikeaineita. Erityisesti alkali- ja maa-alkalimetallien halidikiteitä, kuten Tl^+ -aktivoituja NaI- ja CsI-kiteitä käytetään paljon [2]. Epäorgaaniset tuikeaineet ovat usein ionikiteitä. Epäorgaaniset tuikeaineet voidaan jakaa neljään pääryhmään: halideihin, oksideihin ja oksidisysteemeihin, kalkogeniideihin ja laseihin [2]. Halidien ryhmässä ovat aiemmin mainitut NaI:Tl ja CsI:Tl. Kiteissä halidiosana käytetään usein fluoria, klooria tai jodia. Metalliosana käytetään pääasiassa alkali- ja maa-alkalimetalleja, mutta lantanoidit ja aktinoidit ovat myös olleet käytössä osana painavampia tuikeaineita [2]. Oksideihin kuuluvat muun muassa yksinkertaiset oksidit, kuten BeO ja ZnO, sekä suuremmat kiteet, kuten $CdWO_4$ ja $ZnWO_4$ [2]. Oksidien ryhmässä ovat myös oksidisysteemit, joihin kuuluu esimerkiksi erilaisia silikaattiyhdisteitä, kuten $Me_2SiO_3:Ce$ [2]. Kalkogenidit eivät ole suuressa käytössä tuikeaineina, mutta niilläkin on käyttökohteensa [2]. Näihin kuuluvat muun muassa $ZnSe:Te$ ja $CdS:Te$ [2]. Myös erilaiset lasit ovat kehittyneet suuresti tuikeaineina ja antavat hyvät mahdollisuudet tuikeaineiden kehitykselle. Erityisesti HfF_4 -pohjaiset lasit ovat lupaavia tuikeaineina. Näihin kuuluu esimerkiksi $HfF_4-BaF_2-CeF_3-AlF_3-Li(Na,Cs)F$ [2].

Tuikeaineilla on monenlaisia käyttökohteita ja niitä käytetään muun muassa hiukkasfysiikassa, tomografiassa, astrofysiikassa ja porareikämittauksissa [1–3]. Tuikeaineiden ominaisuuksien vaatimukset ovat kasvaneet jatkuvasti, minkä takia tuikeaineisiin kohdistuvia tutkimuksia tarvitaan aina vain enemmän.

2.2 Tuikeaineiden ominaisuudet

Tuikeaineiden käyttökohteet vaativat monenlaisia ominaisuuksia. Jokaista käyttökohdetta varten tuikeaineelta vaaditaan tietynlaisia ominaisuuksia. Tyypillisesti orgaanisia ja

epäorgaanisia tuikeaineita käytetään eri sovelluksissa, mutta niiltäkin vaaditaan tiettyjä samoja piirteitä. Kaikkien tuikeaineiden halutaan olevan kemiallisesti ja mekaanisesti vakaita, helposti tuotettavia ja suhteellisen halpoja. Kuvassa 2 on esimerkkinä yleisimpien epäorgaanisten tuikeaineiden ominaisuuksia.

Name*	Density	Emission λ [nm]	Light yield [photons/MeV]	Decay time τ [ns]	Radiation length [cm]
NaI:Tl	3.67	410	40,000	230	2.59
BGO	7.14	480	4000	300	1.12
BaF ₂ (fast)	4.88	215	1500	<1	2.05
BaF ₂ (slow)	4.88	310	10,000	700	2.05
CsI:Tl	4.51	565	65,000	600	1.68
CsF	4.11	390	2000	3	
PbWO ₄	8.28	480	200	10	0.89
LSO:Ce	7.4	420	28,000	40	1.14
LuAP:Ce	8.3	360	10,000	18	
GSO:Ce	6.71	440	7500	60	1.38
LuPO ₄	6.6	360	13,000	24	
YAP:Ce	5.37	370	16,000	25	2.7
LaBr:Ce	5.3	360	60,000	35	2.13

*The short names for the scintillators stand for the following chemical compounds: BGO = Bi₄Ge₃O₁₂, GSO = Gd₂SiO₅, LSO = Lu₂SiO₅, LuAP = LuAlO₃, YAP = YAlO₃

Kuva 2: Yleisesti käytettyjen epäorgaanisten tuikeaineiden ominaisuuksia

Jarrutusvoima on tuikeaineen tärkeä ominaisuus. Jarrutusvoima on tärkeä etenkin kalorimetrejä varten. Jarrutusvoima tarkoittaa aineen kykyä hidastaa varattuja hiukkasia. Jarrutusvoimaan vaikuttavat suoraan verrannollisesti muun muassa aineen tiheys, säteilypituus, Molieren säde ja järjestysluku [2, 4]. Käytännössä mitä suurempi aineen jarrutusvoima on, sitä vähemmän tarvitsee käyttää itse tuikeinemateriaalia.

Valosaanto on yksi oleellisimmista hyvän tuikeaineen ominaisuuksista. Se kuvaa kuinka tehokkaasti tuikeaine pystyy muuntamaan ionisoivaa säteilyä näkyväksi valoksi. Valosaannon yksikkö kertoo, kuinka monta fonia materiaali emittoi energiayksikköä kohden [2, 4]. Yleisesti valosaannon yksikkönä käytetään $\frac{\text{fotonit}}{\text{MeV}}$. Suhteellinen valosaanto on hyvä tapa vertailla eri materiaalien tehokkuutta, koska se kertoo prosentteina kuinka hyvä valosaanto on vertailukohteeseen nähden [2, 4].

Muita tärkeitä vaatimuksia tuikeaineiden käyttöön ovat muun muassa aineen hajoamisaika, emissiospektri, kestävyys ja säteilynsietokyky [2]. Optinen läpäisevyys, kiteiden mitat,

aineen työstettävyys, hygroskooppisuus ja hinta ovat myös huomioon otettavia asioita, kun arvioidaan, kuinka hyvä tuikeaine on [2].

2.3 Tuikeaineiden sovellukset

Yksi tärkeimmistä tuikeaineiden sovelluskohteista on hiukkasfysiikassa, jossa tuikeaineita käytetään erilaisissa kalorimetreissä. Kalorimetrit ovat ilmaisimia, joilla mitataan hiukkasten energiaa. Tyypillisesti hiukkasfysiikasta voidaan puhua, kun hiukkasten energia on yli 1 GeV. Kalorimetreistä tyypillisimmät ovat elektromagneettiset ja hadroniset kalorimetrit. Elektromagneettisilla kalorimetreillä mitataan elektronien, positronien ja gammasäteilyn energiaa. Hadroniset kalorimetrit mittaavat vahvasti vuorovaikuttavien hiukkasten, kuten protonien, neutronien, pionien ja kaonien energiaa. Tuikeilmiön avulla pystytään myös havaitsemaan kosmisia ilmasuihkuja. Näitä suihkuja syntyy, kun todella korkeaenerginen kosminen säde saapuu ilmakehään ja aiheuttaa monen sekundäärisen hiukkasen leviämisen. Hiukkasfysiikan sovelluskohteita varten tuikeaineen haluttuja ominaisuuksia ovat suuri jarrutusvoima, alhainen valosaanto, alle 20 ns:n hajoamisaika, alle 450 nm:n emissiospektri, ja lisäksi sen halutaan olevan kestävä. Yksi luopava tuikeaine hiukkasfysiikassa on PbWO_4 [1, 2, 5].

Yksi tärkeä lääketieteellinen sovellus, jossa käytetään tuikeaineita, on positroniemissiotomografia eli PET. PET-kuvantamisessa tuikeaineita käytetään gammailmaisimissa. Haluttuja ominaisuuksia ovat suuri valosaanto, suuri jarrutusvoima, mielellään alle 30 ns:n hajoamisaika ja yli 300 nm:n emissiospektri. Hyvä ajanerotuskyky on myös oleellista poikkeuksien minimoimiseksi. PET-kuvantamisessa käytettäviä tuikeaineita ovat esimerkiksi $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, Lu_2SiO_5 ja Gd_2SiO_5 . Toinen lääketieteellinen sovelluskohde tuikeaineille on röntgenkuvantaminen. Röntgenkuvantamisessa toivottuja ominaisuuksia ovat suuri valosaanto, suuri jarrutusvoima, alle 450 nm:n emissiospektri, hyvä kestävyys ja säteilykestävyys. Tuikeaineita käytetään hyväksi myös tietokonetomografiassa eli CT-kuvauksessa, jolloin halutut ominaisuudet ovat samat kuin röntgenkuvantamisessa. Erona on se, että CT-kuvantamisessa ei haluta jälkiloistetta, kun taas röntgenkuvantamisessa sillä ei ole niinkään väliä [1, 2, 5].

Porareikämittaukset vaativat ilmaisimia, joilla on tiettyjä ominaisuuksia. Siksi tukeaineita käytetään ilmaisimissa porareikämittauksia varten. Haluttuja ominaisuuksia ovat muun muassa suuri valosaanto, emissiospektrin huippu lähellä 400 nm:n, pieni hajoamisaika, suuri tiheys ja iso järjestysluku [6]. Mittauksissa käytettäviä tukeaineita ovat esimerkiksi NaI(Tl), CsF ja CdWO₄ [6]. Porareikämittauksissa tärkeä huomioitava asia on lämpötilan vaikutus tukeaineen tehokkuuteen eli sen valosaannon suuruuteen. Tyypillisesti valosaanto ja lämpötila ovat kääntäen verrannollisia [6]. Mittauksissa käytettävillä tukeaineilla lämpötilan kasvaessa tehokkuus vähenee. Mittaukset suoritetaan laajalla lämpötila-alueella välillä 0 °C – 200 °C, joten materiaaleja käyttäessä täytyy tietää, miten lämpötilan muutokset vaikuttavat niiden ominaisuuksiin [6].

Tukeaineita voidaan myös hyödyntää avaruustutkimuksessa. Seuraavassa osassa käydään tarkemmin läpi tukeaineiden avaruustutkimuksen käyttökohteita, tukeaineilta vaadittavia ominaisuuksia ja esitellään avaruuteen sopivimmat tukeaineet. Kuvassa 3 on tukeaineilta eri käyttökohteisiin vaadittavat ominaisuudet.

Scintillator Requirements in Various Applications⁴³

Application	L_R (ph/MeV)	τ_1 (ns)	Density (g/cm ³)	Z	λ_r (nm)	Rug.	Rad H (Mrad)
HEP	>200	≤20	High	High	>450	+	>10
IEP	High	Varies	High	High	>300	+/-	+/-
Nuclear physics	High	Varies	High	High	>300	-	-
Astrophysics	High	Less imp.	High	High/low	>450	+	-
PET	High	<1	High	High	>300	-	-
Gamma cameras	High	Less imp.	High	High	>300	+/-	-
Positron lifetime	High	<1	High	High	>180	-	-
Synch. rad. det.	High	10-100	High	High	>300	-	-
Industrial appl.	High	Varies	High	High	>300	+	-
Neutrons	High	10-100	Low	Li,B,Gd	>300	-	-
X-ray CT	High	No afterglow	>4	>50	>450	-	+
X-ray imaging	High	Less imp.	High	High	>450	+/-	+

Kuva 3: Tarvittavia ominaisuuksia tukeaineiden käyttökohteita varten. [2]

3 Tuikeaineet avaruudessa

Tuikaineilla on monenlaisia käyttötarkoituksia avaruuslentoja ja -tutkimusta varten. Tuikaineita voidaan käyttää avaruustutkimuksessa muun muassa gammaspektrometriassa, dosimetriassa, pimeän aineen tutkimuksessa ja erilaisten hiukkasten havaitsemisessa [7–9]. Sekä orgaanisia että epäorgaanisia tuikaineita käytetään avaruustutkimuksessa. Näistä tyypillisempi vaihtoehto on epäorgaaniset tuikaineet, koska niiden ominaisuudet sopivat yleisesti paremmin avaruustutkimuksen käyttökohteisiin [8, 10, 11].

3.1 Gammaspektroskopia

Gammaspektroskopian avulla pystytään määrittämään taivaankappaleiden koostumuksia. Sitä on käytetty esimerkiksi Kuun, Marsin, Merkuriuksen ja suurten asteroidien koostumusten selvittämiseen [8]. Röntgensäteilyn avulla pystytään määrittelemään taivaankappaleiden pintojen koostumuksia, mutta gammasäteilyn avulla päästään tutkimaan koostumusta 30 cm pinnan alapuolelle [8].

Gammaspektrometri koostuu ilmaisimesta, pulssinkäsittelyyn tarkoitettusta virtapiiristä, sekä järjestelmästä saadun tiedon tallentamista, käsittelyä ja esittämistä varten. Gammaspektroskopiolla on monia hyötyjä. Näytteen valmistelu analyysiä varten on erittäin yksinkertaista eikä siihen yleensä tarvita radiokemiallista erotusmenettelyä. Gammaspektroskopia on hyödyllinen ympäristön radioaktiivisuuden määrittämisessä ja pienten radioaktiivisten materiaalien määrän analysoinnissa. Havaintojärjestelmän antama tieto sopii tietokonekäsittelyyn ja on siksi sopiva automaattisten analyysijärjestelmien suunnitteluun. Gammaspektrometrit ovat kalliita, mutta niillä on korkeatasoinen suorituskyky ja laatu [12].

Gammaspektroskopiassa käytettyjä tuikaineita on monenlaisia, ja niitä kehitetään jatkuvasti lisää. Gammaspektroskopiaa varten tuikaineilta halutaan tiettyjä ominaisuuksia. Haluttuihin ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi suuri valotuotto, hyvä energianerotuskyky, pienet absorptio- ja sirontahäviöt, hyvä säteilynkestävyys, nopea hajoamisaika ja lyhyt jälkiloiste [12–14]. $\text{LaBr}_3:5\%\text{Ce}$ on yksi hyvä vaihtoehto tähän tarkoitukseen. Heikkoutena tällä tuikaineella on sen heikko kestävyys gammasäteilylle. Erilaisia cesiumin konsentraatioita on testattu, mutta 5 % cesium konsentraation on huomattu olevan todennäköisesti optimaalisin [13, 14]. $\text{LaBr}_3:100\%\text{Ce}$ eli käytännössä CeBr_3 on ollut yksi kilpaileva vaihtoehto $\text{LaBr}_3:5\%\text{Ce}$:lle. Sillä

on suurempi tiheys ja todennäköisesti alhaisempi ominaislaskentanopeus kuin $\text{LaBr}_3:5\%\text{Ce}$:lla, joka tekee siitä myös hyvän kandidaatin tuikeaineeksi gammaspektroskopiaa varten [13, 14]. Perinteisillä tuikeaineilla, kuten NaI:Tl ja CsI:Tl , ei ole tarpeeksi hyvää energianerotuskykyä muodostuneiden ionien tarkkaan erotteluun, joten niitä käytetään enemmän esimerkiksi seulontamittauksissa [13, 14]. Yksi uusi lupaava tuikeaine gammasäteilmaisimia varten on $\text{Gd}_3(\text{Ga}, \text{Al})_5\text{O}_{12}$ (GaGG:Ce) [15, 16]. Sillä on suurempi tiheys kuin $\text{LaBr}_3:100\%\text{Ce}$:lla ja $\text{LaBr}_3:5\%\text{Ce}$:lla, mikä tekee GaGG:Ce :stä säteilynkestävän. GaGG:Ce :llä on suuri valotuotto, nopea hajoamisaika, eikä se ole hygroskooppinen [15, 16]. Isoin ongelma GaGG:Ce :llä on sen jälkiloisteen pituus, joka voi kestää vuorokauden [15, 16]. Jälkiloiste synnyttää jatkuvan taustasignaalin, joka heikentää saadun datan laatua [15, 16].

3.2 Kalorimetrit avaruudessa

Tuikeaineita hyödyntäviä kalorimetrejä käytetään myös avaruustutkimuksessa. Näiden kalorimetrien avulla voidaan esimerkiksi tutkia kosmista säteilyä ja etsiä pimeää ainetta kosmisen säteilyn avulla [9, 17–19]. Orgaanisia tuikeaineita käytetään paljon näissä tutkimuksissa epäorgaanisten tuikeaineiden lisäksi. Avaruustutkimuksissa HERO ja CALET käytettiin muovisia tuikeaineita, joissa oli volframia apuna [17–19]. DAMPE-nimisessä ilmaisimessa käytettiin myös muovisia tuikeaineita [9]. Näiden tutkimusten tarkoituksena oli tutkia kosmista säteilyä ja samalla pimeää ainetta. Voisimme saada siis tärkeää tietoa avaruudesta kalorimetrien avulla.

4 Yhteenveto

Tuikaineilla on kyky muuntaa korkeaenergistä säteilyä matalaenergisiksi säteilyksi. Tuikaineet voivat olla orgaanisia tai epäorgaanisia, sekä orgaanisia että epäorgaanisia tuikaineita on paljon ja niiden eri ominaisuudet mahdollistavat erilaiset käyttökohteet.

Tuikaineet ovat olleet tärkeä tutkimuskohde monilla eri aloilla, kuten hiukkasfysiikassa, porausreikämittauksissa, meritutkimuksissa, lääketieteessä ja avaruustutkimuksissa. Hiukkasfysiikassa tuikaineita tarvitaan kalorimetreissä hiukkasten energian mittaamiseen. Lääketieteessä tärkeitä kohteita ovat PET-kuvantaminen ja röntgenkuvantaminen. Avaruustutkimuksessa gammaspektroskopia on keskeisessä asemassa, kun tarvitaan tuikaineita. Samoin tietyt kalorimetrit kosmisen säteilyn ja pimeän aineen tutkimuksessa.

Gammaspektroskopia on mahdollistanut taivaankappaleiden koostumuksien selvittämisen. Olemme saaneet tietää Kuun, Merkuriuksen, Marsin ja S-luokan asteroidien koostumuksista gammaspektroskopian avulla. Tuikaineiden ominaisuuksille on suuret vaatimukset tähän tarkoitukseen. Tuikaineen täytyy olla säteilykestävä ääriolosuhteita varten. Lisäksi vaaditaan tarpeeksi suurta valosaantoa, energianerotuskykyä ja tarpeeksi pientä hajoamisaikaa. Uusia parempia tuikaineita halutaan etsiä jatkuvasti lisää, jotta pystymme tutkimaan avaruutta laajemmin.

Tuikaineet tulevat olemaan merkittävässä roolissa avaruustutkimuksessa. Tuikaineiden kehittämisellä avaruustutkimusta varten voisimme ymmärtää paremmin supernovia ja mustia aukkoja. Tehokkaammat ja paremmat tuikaineet voisivat mahdollistaa paremmat mittauslaitteet esimerkiksi satelliitteihin. Parempien tuikaineiden avulla saamme tehtyä korkeamman resoluution avarusteleskooppeja, joilla voisimme havaita aktiivisia galakseja ja gammadurkauksia. Astronaueteille tuikaineet voisivat mahdollistaa henkilökohtaiset säteilydosimetrit säteilyn määrän mittaamista varten. Kuten nähdään tuikaineet mahdollistavat sekä paremmat tutkimus- ja mittausmahdollisuudet, että auttavat ihmisiä suojautumaan avaruudessa tutkimusten aikana.

Lähteet

- [1] Tavernier, S. In *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*; Tavernier, S., Ed.; Springer: Berlin, Heidelberg, **2010**; pp 167–208.
- [2] Rodnyi, P. A. CRC Press: London, **2020**.
- [3] Qin, L.; Wang, P.; Zhang, H.; Wang, S.; He, W.; Wen, J. *INTI J.*, **2025**, *2025* (5), 1–8.
- [4] Weber, M. J. *J. Lumin.*, **2002**, *100* (1), 35–45.
- [5] Van Eijk, C. W. E. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, **1997**, *392* (1–3), 285–290.
- [6] Melcher, C. L. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, **1989**, *40–41*, 1214–1218.
- [7] Chen, X. J.; Johnson, E. B.; Staples, C. J.; Chapman, E.; Alberghini, G.; Benton, E.; Christian, J. F. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **2010**, *57* (6), 3450–3455.
- [8] Owens, A. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **2008**, *55* (3), 1430–1436.
- [9] Yu, Y.; Sun, Z.; Su, H.; Yang, Y.; Liu, J.; Kong, J.; Xiao, G.; Ma, X.; Zhou, Y.; Zhao, H.; et al. *Astropart. Phys.*, **2017**, *94*, 1–10.
- [10] McConnell, M. L.; Bloser, P. F.; Case, G. L.; Cherry, M. L.; Cravens, J.; Guzik, T. G.; Hurley, K.; Kippen, R. M.; Macri, J. R.; Miller, R. S.; et al. *New Astron. Rev.*, **2006**, *50* (7–8), 633–636.
- [11] Bindi, V.; Del Guerra, A.; Levi, G.; Quadrani, L.; Sbarra, C. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, **2007**, *572* (2), 662–667.
- [12] Arnold, D.; Debertin, K.; Heckel, A.; Kanisch, G.; Wershofen, H.; Wilhelm, C. *Fundam. Gamma Spectrom.*, **2018**.
- [13] Drozdowski, W.; Dorenbos, P.; Bos, A. J. J.; Kraft, S.; Buis, E. J.; Maddox, E.; Owens, A.; Quarati, F. G. A.; Dathy, C.; Ouspenski, V. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **2007**, *54* (4), 1387–1391.
- [14] Drozdowski, W.; Dorenbos, P.; Bos, A. J. J.; Bizarri, G.; Owens, A.; Quarati, F. G. A. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **2008**, *55* (3), 1391–1396.
- [15] Yoneyama, M.; Kataoka, J.; Arimoto, M.; Masuda, T.; Yoshino, M.; Kamada, K.; Yoshikawa, A.; Sato, H.; Usuki, Y. *J. Instrum.*, **2018**, *13* (02), P02023–P02023.
- [16] Dilillo, G.; Zampa, N.; Campana, R.; Fuschino, F.; Pauletta, G.; Rashevskaya, I.; Ambrosino, F.; Baruzzo, M.; Cauz, D.; Cirrincione, D.; et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, **2022**, *513*, 33–43.

- [17] Karatash, Kh.; Kalikulov, O.; Saduyev, N.; Satyshev, I.; Sholtan, Y.; Pan, A.; Utey, Sh. *Adv. Space Res.*, **2026**, 77 (8), 8510–8520.
- [18] Maestro, P. *Adv. Space Res.*, **2019**, 64 (12), 2538–2545.
- [19] Marrocchesi, P. S. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, **2012**, 692, 240–245.