

Neutraalien hiukkasten gravitaatiokvanttitilat

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Fil. yo. Aino Mäkitalo
Tarkastaja:
FT Janne Ahokas

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Mäkitalo, Aino Neutraalien hiukkasten gravitaatiokvanttitilat

LuK-tutkielma, 20 s., 3 liites.

Fysiikka

Syyskuu 2025

Gravitaatiokvanttitilat (gravitational quantum state, GQS) perustuvat hiukkasen eli niin sanotun kvanttipomppijan vangitsemiseen ja diskreettien kvantttilojen muodostumiseen peilin pinnalle gravitaatiopotentiaalissa. Teoriaa soveltaen ja erilaisia tutkimusnäkökulmia tarjoten ovat syntyneet myös GQS:ien virityksiin perustuva gravitaatioresonanssispektroskopia (gravity resonance spectroscopy, GRS) sekä kaarevaa peiliä hyödyntävä ja kvantttilojen interferenssiin perustuva kuiskausgalleriatilojen (whispering gallery state) tutkimus. Lisäksi alun perin neutroneille kehitetty tekniikka on levinnyt myös vedyn, antivedyn ja positroniumin kanssa työskentelevien tutkimusryhmien pariin ja edelleen jalostunut siellä.

Gravitaatiokvantti- ja kuiskausgalleriatilojen energiat, interferenssi ja vuorovaikutus materian kanssa ovat erittäin tarkkoja mittareita monille pienen mittakaavan ilmiölle, joten sovelluksia on löydetty niin gravitaation ja mahdollisten tuntemattomien vuorovaikutusten, antimaterian, pimeän aineen kuin pintafysiikankin tutkimuksesta. Uusia sovelluksia ja läpimurtoja sopii odottaa tältä monipuoliselta tutkimusalalta jo lähivuosina.

Asiasanat: Gravitaatio, kvanttimekaniikka, neutronit, atomaarinen vety, antivety, positronium

Sisällys

Johdanto	1
1 Kvanttitilat gravitaatiopotentiaalissa	2
2 Kokeet neutroneilla	3
2.1 Gravitaatiokvanttitilojen koejärjestely ja havaitseminen	3
2.2 Gravitaatioresonanssispektroskopia	5
2.3 Kuiskausgalleriatilat	7
3 Rakenteilla olevat kokeet vedyllä	9
3.1 Kryogeeninen vetysuihku, Zürich	10
3.2 Erittäin kylmät vetyatomit, Turku	11
4 Antihukkasillem suunnitellut kokeet	13
4.1 Antivety, CERN	14
4.2 Positronium	16
5 Yhteenveto	16

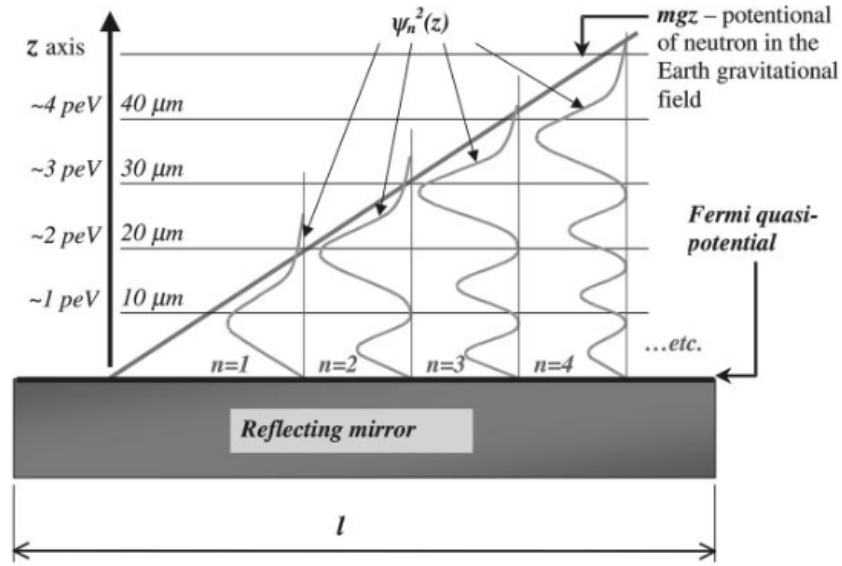
Johdanto

Perusvuorovaikutuksen statuksestaan huolimatta painovoima on tuottanut jo pitkään fyysikoille päänvaivaa. Pienellä mittakaavalla painovoimateorian ja kvanttimekaniikan yhdistäminen sellaisenaan ei ole onnistunut [1] ja kosmologisella mittakaavalla gravitaatioanomaliaita on paikattu vaihtelevalla menestyksellä pimeän aineen olemassaololla [2]. Yksi kvanttimekaniikan tunnettu seuraus on diskreettien kvanttitilojen muodostuminen potentiaalikuoppaan, mikä on tärkeää muun muassa atomien rakenteelle. Painovoimakentässä tätä ilmiötä ei kuitenkaan ollut pitkään pystytty havaitsemaan. [3]

Teoreettinen pohja kvanttihiukkasen käyttäytymiselle gravitaatiopotentiaalissa eli niin sanotulle kvanttipomppijalle on ollut tiedossa jo vuodesta 1928 lähtien [4], mutta kokeellisia tuloksia tästä saatiin vasta vuonna 2002 muun muassa gravitaatiovuorovaikutuksen heikkouden tuomien haasteiden takia. Valery Nesvizhevskyn ja hänen tutkimusryhmänsä todistamat gravitaatiokvanttitilat (gravitational quantum state, GQS) ovat avanneet tien uusiin ja monipuolisiin perustutkimuksen tekniikoihin. [3]

GQS-kokeilla ja sille sukua olevilla koejärjestelyillä on mahdollista tutkia muun muassa ehdotettuja laajennuksia standardimalliin [5], kvanttimekaniikkaan [6] ja painovoimateorioihin [6–9] tai tuntemattomia pienen mittakaavan vuorovaikutuksia [6, 7] tai hiukkasia [8, 10], kuten esimerkiksi pimeän aineen ehdokkaita. Antivedyn gravitaatiokvanttitilat mahdollistavat lisäksi antimaterian painovoimavuorovaikutuksen ja ekvivalenssiperiaatteen tutkimuksen [11], ja GQS:ien hiukkas-materiaalivuorovaikutuksen hyödyntäminen avaa oven myös sovelluksien löytämiseen optiikan ja pintafysiikan aloilta [12].

Tutkielmassa käsitellään gravitaatiokvanttitilojen teoriaa ja käynnissä olevien tutkimusten toteutuksia ja näkymiä. Tekoälyä on opinnäytetyössä hyödynnetty kääntämiseen.



Kuva 1. Neutronin neljän ensimmäisen kvanttitalan todennäköisyystiheydet peilin ja gravitaatiopotentiaalin aiheuttamassa potentiaalikuopassa. [14]

1 Kvanttitilat gravitaatiopotentiaalissa

Normaaliolosuhteissa painovoimakenttä ei yksinään muodosta potentiaalikuoppia tai niissä havaittavia kvanttitaloja, joten gravitaatiokvanttitilojen tutkimuksen koejärjestelyyn kuuluu oleellisesti tutkittavaa hiukkasta heijastava peili. Se toimii seinänä, jonka vaikutusta voidaan kuvata äärettömän korkeana potentiaalienergian nousuna. Koska gravitaatiopotentiaali ohjaa hiukkasta putoamaan sitä vasten, saadaan aikaan hiukkasen vangitseva potentiaalikuoppa. [13]

Kokeessa hiukkanen ohjataan peilille siten, että sen nopeuden pystysuora komponentti on minimaalinen, jolloin voidaan ajatella sen vain hieman pomppivan kulkiessaan vaakasuunnassa peilin pinnalla. Ainoastaan korkeudesta riippuvassa gravitaatiopotentiaalissa muodostuu siis yksiulotteisen Schrödingerin yhtälön kuvaamia kvasistaattisia kvanttitaloja, joita on havainnollistettu kuvassa 1. [14]

Schrödingerin yhtälön ratkaisut voidaan määrittää Airy-funktion avulla ja saatavat ominaisenergiat määräytyvät kaavan $E_k = mgz_0\lambda_k$ mukaan, missä m on hiukkasen massa, g on putoamiskiihtyvyys, λ_k on Airy-funktion nollakohta,

$z_0 = [\hbar^2/(2m^2g)]^{1/3} = 5,87 \text{ }\mu\text{m}$ on karakteristinen pituus ja \hbar on redusoitu Planckin vakio. Huomataan, että energiat eivät riipu mitenkään peilin ominaisuuksista ja ainoa hiukkasen ominaisuuksiin liittyvä suure on sen massa, minkä perusteella kvanttipomppijan teorian arvellaan pätevän hiukkasesta riippumatta. [6]

2 Kokeet neutroneilla

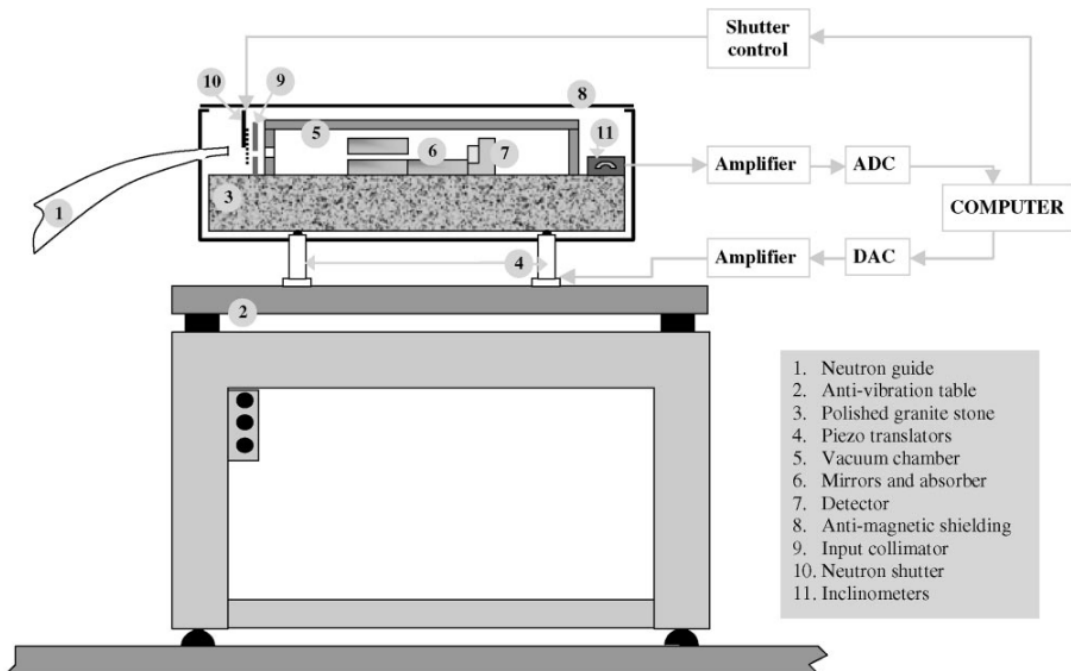
Gravitaatiokvanttitilojen tutkimukselle on hyödyllistä, että käytettävä hiukkanen on sähköisesti neutraali ja pitkäikäinen. Tämän takia neutroni valikoitui ensimmäiseksi käytettäväksi hiukkaseksi ja kokeet ovat myös onnistuneet tähän mennessä vain neutroneilla. [3]

Tässä luvussa tarkastellaan kolmea kvanttipomppijan teoriaan pohjautuvaa koetta neutroneille sekä ensimmäisiä kokeellisia tuloksia gravitaatiokvanttitilojen olemassaolosta.

2.1 Gravitaatiokvanttitilojen koejärjestely ja havaitseminen

Yksinkertaisin koejärjestely gravitaatiokvanttitilojen tutkimiseen on esitetty kuvassa 2. Aluksi neutronisuihku kohdistetaan kollimaattoriin (9), joka kokoaa suihkun poistamalla ei-toivotuilla radoilla olevat neutronit. Tämän jälkeen se ohjataan absorberin ja peilin väliseen rakoon (6), jossa rajoittamalla peilin yläpuolelle jäävää tilaa voidaan poistaa neutronit ja kvanttitilat, jotka ovat korkeaenergisiä kuin mitä halutaan tutkia. Esteen läpäisevät neutronit asettuvat GQS:iin ja havaitaan ilmaisimella (7). [13]

GQS-tutkimuksissa käytetään yleisesti erittäin kylmiä neutroneja (ultracold neutron, UCN), joiden energia on alle 100 neV ja lämpötila noin millikelvinin [15]. Nopeuksien valikoimisen jälkeen niiden pystysuoran liikkeen energiat ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä, peV-luokkaa [3]. Näin kylmät neutronit reagoivat voimak-

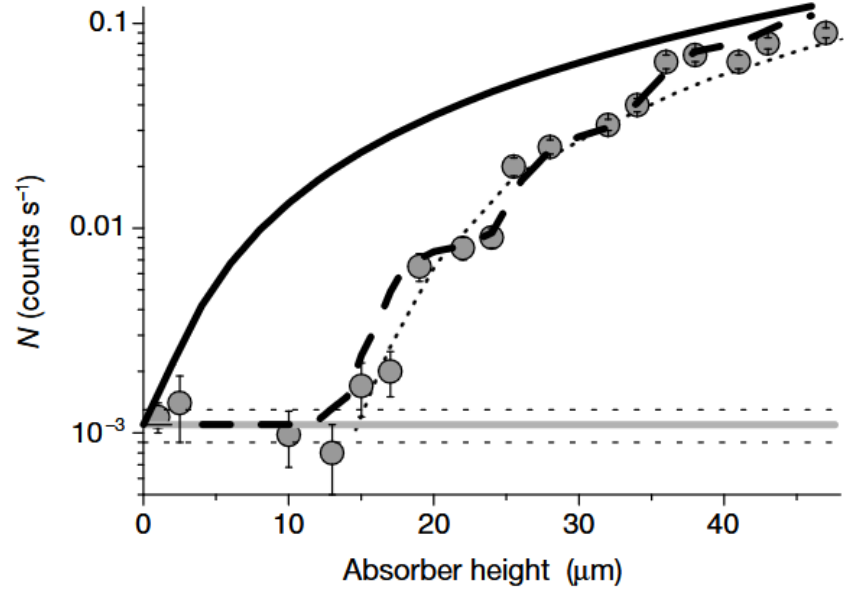


Kuva 2. Koejärjestely neutronien gravitaatiokvanttitilojen havaitsemiseksi. [14]

kaan repulsiivisesti atomiytimien kanssa ja siten heijastuvat pinnoilta tulokulmasta riippumatta [15]. Peiliksi riittää siis yksinkertainen hyvin tasaiseksi hiottu optinen lasi. Absorberi on myös lasia ja makroskooppisesti tasainen, mutta siinä on mikrometriluokan epätasaisuuksia ja Ti-Zr-Gd-päällyste, jotka aiheuttavat siihen osuvan neutronin absorboitumisen tai siroonnan. Näin säätämällä absorberin korkeutta peilistä voidaan valita, mitkä tilat pääsevät raon läpi. [13] Detektori on kokeesta riippuen joko fission perustuva uraani-ilmaisain [14] tai neutronisieppaukseen perustuva helium-3-ilmaisain [13].

Laitteisto suojataan ulkoisilta vaikutuksilta pitämällä se tyhjiökammiossa (5), magneettisessa suojauksessa (8) ja värähtelyä estävällä pöydällä (2). Lisäksi kaltevuusmittareilla (11), pietsosähköisillä tasapainottajilla (4) ja niiden ohjaamalla graniittitasolla (3) koejärjestely pidetään suorassa. [13]

Valery Nesvizhevskyn tutkimusryhmän havainnot on esitetty kuvassa 3. Koejärjestelyn läpi tulleiden neutronien määrän kvantittuminen on selvimminkin nähtävissä siinä, että raon korkeuden ollessa alle ensimmäisen kvanttitilan neutroneja ei pääse



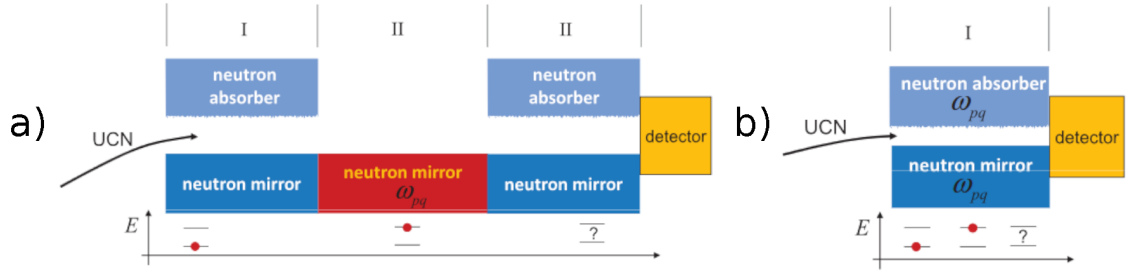
Kuva 3. Läpitulleiden neutronien lukumäärä per sekunti (pallot) absorberin korkeuden funktiona verrattuna eri ennusteisiin. Katkoviiva kuvaa kvanttimekaanisen ja tumma viiva klassisen ennusteen tulosta sekä ohut pisteviiva oletusta, että vain ensimmäinen kvanttitila on olemassa. [3]

lainkaan läpi. Neutronit eivät siis pääse raon läpi ennen noin 15 μm pituutta, vaikka yksittäisen neutronin halkaisija on femtometrinen luokkaa. [3]

Portaittainen kasvu on nähtävissä noin 50 μm korkeuteen asti ja yli 60 μm jälkeen neutroneita pääsee raon läpi suunnilleen klassisen ennusteen mukaisesti. Näitä tuloksia ei ole mahdollista selittää ilman painovoiman vaikutusta, joten kvanttitilojen olemassaolo painovoimakentässä todistettiin onnistuneesti. [7]

2.2 Gravitaatioresonanssispektroskopia

Värisävän tason aiheuttaman energiansiirtymän tutkimuksia soveltaen ollaan huomattu, että myös gravitaatiokvanttitiloja voidaan virittää heiluttamalla peiliä tietyillä taajuuksilla. Tämän resonanssitajuuuden määrittäminen ja hyödyntäminen perustuvat siihen, että tilojen väliset energiat ovat jokaiselle välille uniikit, jolloin mitä tahansa kahta GQS:ää voidaan käsitellä kubittina. Gravitaatioresonanssispekt-



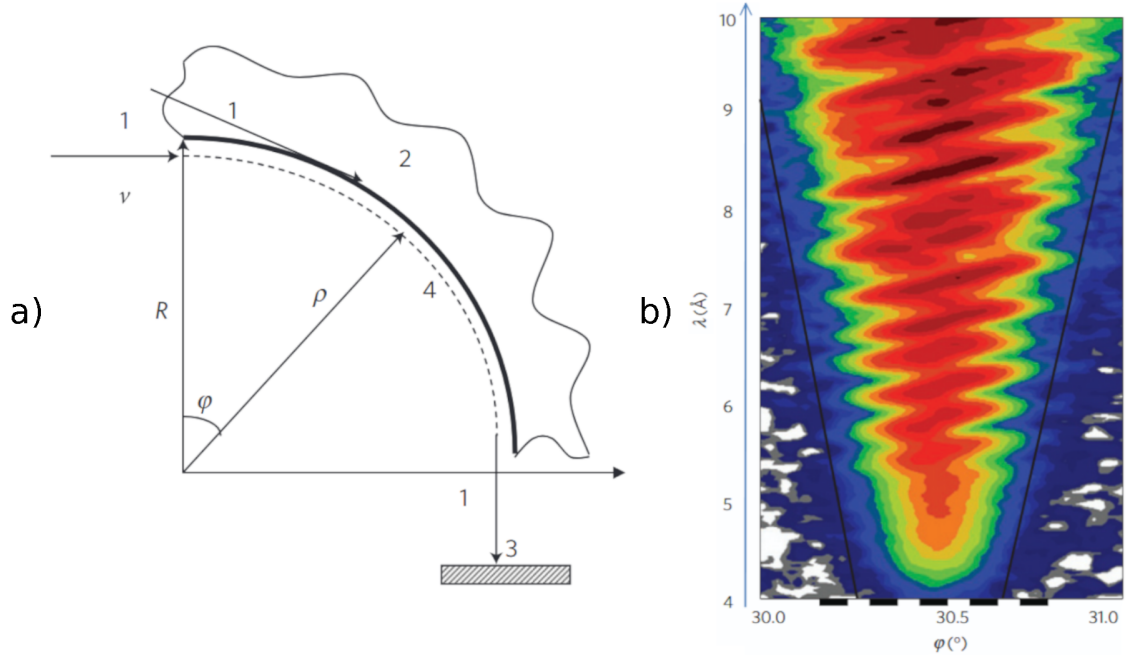
Kuva 4. Neutronien gravitaatioresonanssispektroskopian koejärjestelyn a) monivaiheinen ja b) yksinkertaisempi muoto. [15]

roskopiassa (gravity resonance spectroscopy, GRS) näitä ulkoisen vuorovaikutuksen aiheuttamia siirtymiä hyödynnetään GQS:ien energioiden ja niihin vaikuttavien vuorovaikutusten tutkimiseen. [16]

Tyypillinen GRS-koejärjestely hiukkassuihkulle on esitetty kuvassa 4a. Vaiheessa I preparoidaan kokeen perustila, vaiheessa II hiukkanen viritetään halutulle toiselle tilalle, jonka jälkeen kaikki perustilaa ylemmät tilat suodatetaan pois. Lopuksi vaiheessa III havaitaan, pääsikä läpi hiukkasia. Kuvassa 4b on yksinkertaistettu järjestely, jolla GRS-kokeet tähän mennessä on tehty. Siinä koko laitteiston kattava absorberoi poistaa perustilaa korkeammat kvantttilat ja kun alhaalla oleva peili värähtelee, samalla preparoidaan, viritetään ja poistetaan virittyneet neutronit yhdistäen vaiheet I ja II. Lopuksi läpi päässeet neutronit tai niiden puuttuminen havaitaan. [15]

Mekaanisen virittämisen lisäksi virityksiä voidaan myös tutkia neutronin magneettisen dipolimomentin ja oskilloivan magneettikentän vuorovaikutukseen perustuen. Koejärjestely muistuttaa tilannetta kuvassa 4a. Oskilloiva kenttä vaiheeseen II saadaan aikaan luomalla neutronisuihkun ympärille viritettävällä solenoidilla joko staattinen yhden senttimetrin jaksollinen kenttä, jolloin sen läpi kulkevan suihkun nopeus määrittää neutronin kokeman taajuuden, tai homogeeninen magneettikenttä, joka oskilloi ajassa vaihtovirran mukana. [17]

Gravitaatioresonanssispektroskopiaa voidaan tehdä myös molekyylispektrosko-



Kuva 5. a) Neutronien kuiskausgalleriatilojen koejärjestely, jossa numero 1 kuvaa neutronisuihkun mahdollisia tulokulmia, 2 peiliä, 3 detektoria, 4 neutronin rataa peilin pinnalla sekä φ radan poikkeamakulmaa. b) Pitkäikäisten kuiskausgalleriatilojen sirontatodennäköisyys neutronin aallonpituuden λ ja poikkeamakulman φ funktiona peilin kaaren koolla $30,5^\circ$. Katkoviiva merkitsee raja-aallonpituuden λ_0 . [12]

pian tapaan impulsiivisia virityksiä hyväksikäyttäen. Niitä voidaan aiheuttaa äkillisellä magneettikentän muutoksella tai peilin ravistuksella. Impulsiivisten viritysten tutkimisella on se etu, että resonanssitajuuksia ei tarvitse erikseen etsiä. [18]

2.3 Kuiskausgalleriatilat

Kaarevan peilin pinnalle muodostuvat kvantttilat toimivat kvanttimekaanisena analogiana niin sanotulle kuiskausgalleria-ilmilölle. Kuiskausgalleriatilojen (whispering gallery state) havainnoimisen perusidea on esitetty kuvassa 5a. Kuvassa näkyvät neutronien mahdolliset tulokulmat peilin pinnalle (1) nopeudella v , R -säteinen kaareva peili (2), detektori (3), kvantttilojen liike peiliä pitkin (4) ja neutronin radan poikkeamakulma φ eli kuljettu matka peilin pinnalla. Kuiskausgalleriatilat toimi-

vat gravitaatiokvantttiloja vastaavasti, mutta niihin vaikuttavat potentiaalit ovat peilin pinnan potentiaali ja sitä vastaan oleva efektiivinen keskipakoispotentiaali eli neutronin keskeiskiihtyvyys $a = v^2/R$. [12] Peilin potentiaalia ei voida aiemmas-
ta poiketen kuitenkaan pitää äärettömänä, sillä korkeimpien kvanttilojen energiat ovat hyvin lähellä tätä ja niillä olevat neutronit tunneloituvat voimakkaasti peiliin [5].

Vaikka voisi olettaa neutronin millä tahansa nopeudella kulkevan kaarevaa pin-
taa pitkin klassisten heijastusten avulla matkan pituudesta riippumatta ja siten
sen radan olevan muokattavissa rajattomasti, näin ei kvanttivuorovaikutuksen takia
ole. Neutronin nopeus vaikuttaa huomattavasti kaaren pinnalle syntyvän potenti-
aalikuopan muotoon, joka taas määrää kvanttilojen määrän ja energiat. Suurilla
nopeuksilla tai niin sanotun raja-aallonpituuden λ_c alapuolella potentiaalikuoppa
on kapeimmillaan ja sinne ei mahdu yhtään kvanttilaa. Nämä liian korkeaenergi-
set neutronit tunneloituvat välittömästi peiliin eivätkä pääse matkaamaan kaarta
pitkin eli poikkeamakulma on pieni. Nopeuden laskiessa kuoppa levenee eksponen-
tiaalisesti ja sinne syntyy kvanttiloja, joissa neutroni pääsee kulkemaan pintaa
pitkin. [12]

Kuiskausgalleriatiloja voidaan saada aikaan kahdella hieman erilaisella tekni-
kalla. Neutronien tullessa kuvan 5a koejärjestelyyn peilin sisältä ylemmän nuolen
(1) eli pinnan tangentin suuntaisesti vain korkeaenergisimmät neutronit pääsevät
tunneloitumaan kuiskausgalleriatiloille ja saatavilla olevista tiloista vain korkeim-
mat miehitetään. [12] Niillä olevat neutronit myös herkästi tunneloituvat pois tiloil-
ta korkean energiansa takia, joten niiden elinikä on lyhyt [5]. Neutronien tullessa
pinnalle taas peilin reunalta vaakasuoran nuolen (1) suuntaisesti kaikki kuiskaus-
galleriatilat miehitetään. Näiden syvemmällä potentiaalissa olevien tilojen elinikä ja
ratojen poikkeama ovat suurempia, koska ne eivät juuri tunneloidu. [12]

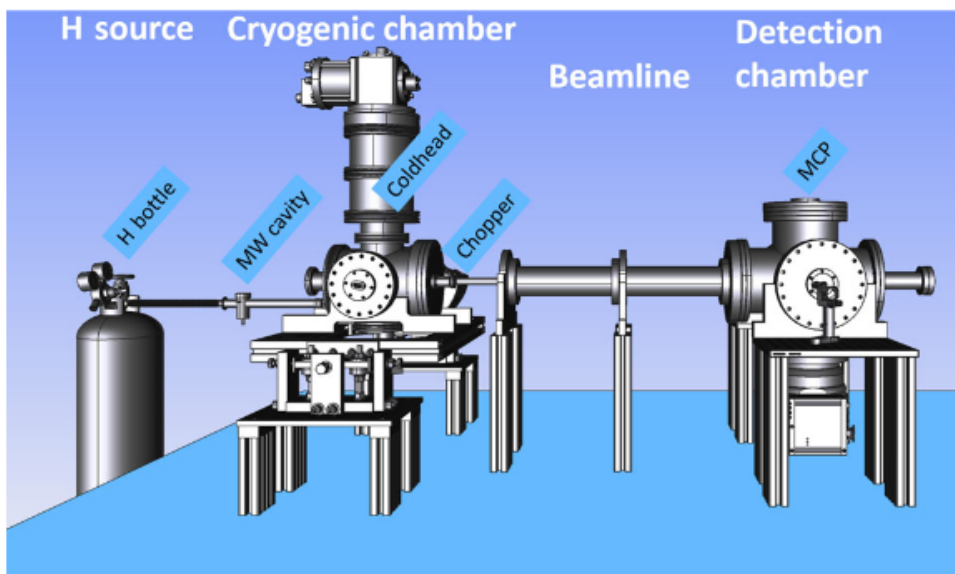
Koejärjestelyn läpi päässeet neutronit havaitaan GQS:istä poiketen kuiskaus-

galleriatilojen välisestä interferenssistä. Kuvassa 5b on esitetty viimeksi mainittujen pitkäikäisten tilojen sironta- eli havaitsemistodennäköisyyden interferenssikuvio. Kuvan alareunassa olevan katkoviivan eli raja-aallonpituuden λ_c yläpuolella havaitaan ensimmäinen kvantttila. Interferenssikuvio syntyy aallonpituuden ollessa noin 5,5 ångströmin yläpuolella useampien kvantttilojen muodostuessa. Nämä syvällä peilin potentiaalissa olevat tilat eivät ole herkkiä pinnan potentiaalin muodolle, mistä johtuu kuvion säännöllisyys. Korkeasti virittyneiden kvantttilojen tapauksessa taas interferenssikuvio on erittäin herkkä peilin ominaisuuksille, mikä voi mahdollistaa monenlaisia sovelluksia muun muassa neutronien ja materian vuorovaikutuksen, neutronikvanttioptiikan ja pintafysiikan tutkimukseen. [12]

Kuiskausgalleriailmiön hyödyntämisessä neutronien tutkimisessa on monenlaisia etuja, sillä koejärjestely on monipuolinen ja joustava. Lisäksi neutronien nopeuden ja peilin kaarevuuden valinnalla voidaan vaikuttaa siihen, että kvantttilojen energiat saadaan pidettyä huomattavasti virheitä suurempina, jolloin epätarkkuudet voidaan suodattaa pois [5]. Kokeissa on myös mahdollista käyttää kylmiä neutroneita erittäin kylmien sijaan, mikä tarkoittaa suurempaa neutronien saatavuutta ja edelleen parempaa tarkkuutta kvantttilojen noin 10^5 kertaa suurempien energioiden ansiosta [12]. Näistä huolimatta vaatimukset peilin tasaisuudelle ovat erittäin tarkat GQS:iin verrattuna [5].

3 Rakenteilla olevat kokeet vedyllä

Gravitaatiokvantttilojen teorian pitäisi päteä neutronien lisäksi myös muille kevyille hiukkasille, mitä pyritään parhaillaan todistamaan. Yksi tähänastisten kokeiden heikkous on erittäin kylmien neutronien huono saatavuus, minkä esimerkiksi vedyllä tehtävät kokeet ratkaisisivat noin 10^4 kertaisella parannuksella. [6] Vety onkin tällä hetkellä neutronin jälkeen lupaavin hiukkasvalinta ja sille suunnitellut kokeet ovat pisimmällä.



Kuva 6. ETH Zürichin kryogeenisen vetysuihkun laitteisto, johon tullaan lisäämään kammio gravitaatiokvanttikokeita varten. [6]

Tässä luvussa esitellään kaksi vedyn GQS:ien todentamiseen pyrkivää GRASIAN-yhteistyön tutkimusprojektia: hieman pidemmällä oleva koe sveitsiläisessä teknillisessä korkeakoulussa ETH Zürichissä ja Turun yliopiston atomaarisen vedyn tutkimusryhmän suunnitteilla olevat kokeet. Zürichissä on rakenteilla neutronikokeita vastaava läpivirtaustyyppinen koejärjestely, jossa tilat pyritään saavuttamaan noin 4 K lämpöisellä vetysuihkulla [6]. Turun yliopistossa on taas kehitteillä vaativampi mikrokelvineissä tapahtuva koejärjestely. Näiden erittäin kylmien atomien lämpöenergia on samaa suuruusluokkaa kuin niiden gravitaatiopotentiaalienergia millimetrin murto-osan korkeudella, jolloin ilmiö saadaan havaittua erittäin tarkasti. Poikkeavaa on myös kokeiden toteuttaminen suprajuoksevan heliumin pinnalla, mikä edelleen parantaa tuloksien tarkkuutta. [19]

3.1 Kryogeeninen vetysuihku, Zürich

ETH Zürichin atomaarisen vedyn tutkimuksen vetysuihku on esitelty kuvassa 6. Vetypullosta H_2 -kaasu kulkeutuu mikroaalto-onteloon, missä mikroaalloilla molekyylit

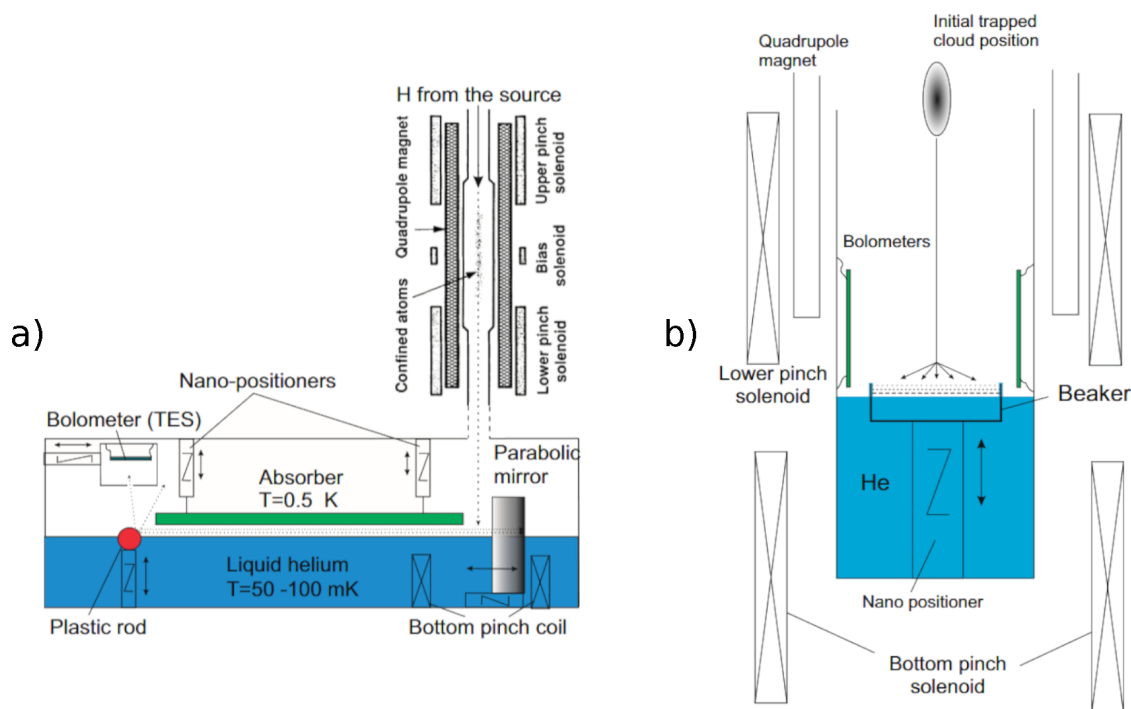
hajotetaan atomaariseksi vedyksi. Kryosäiliössä atomit jäädytetään noin kuuteen kelviniin, jonka jälkeen katkaisin päästää atomeja pienissä ryhmissä eteenpäin. Linjastossa karsitaan edelleen kaikki paitsi tarpeeksi pienellä nopeudella kulkevat atomit, jotka pääsevät ilmaisimelle, missä ne ionisoidaan ultraviolettivalon avulla ja havaitaan mikrokanavalevyllä. [6]

Kokeissa käytettävä hiukkanen vaikuttaa koejärjestelyn toimintaan muun muassa vuorovaikutuksessaan absorberin kanssa. Siinä missä neutronit absorboituvat suurella todennäköisyydellä, kvanttituloille sopimattomien vetyatomien on mahdollista sirota esteiden läpi ja tuottaa ylimääräistä kohinaa. Vuotojen minimoimiseksi ja nopeuksien lisäkarsimiseksi tullaankin asentamaan laitteiston varrelle lisärakojia, että sen osat ennen GQS-kammiota ja detektoria ovat paremmin eristetty toisistaan. Lisäksi herkkyyttä pyritään edelleen parantamaan kehittämällä kryosäiliön jäädytysjärjestelmää ja ilmaisimen ionisointitehoa komponentteja vaihtamalla ja parantamalla. [6] Myös vedyn korvaamista sen painavammalla isotoopilla deuteriumilla on pohdittu, sillä se voisi helpottaa kvanttitulojen erottamista taustakohinasta [20].

Laitteistoon liittyvien haasteiden ratkaisemisen lisäksi suunniteltu UCN-koejärjestelyä huomattavasti vastaava GQS-kammio on vielä asentamatta suihkun yhteyteen, mutta vedyn gravitaatiokvanttitulojen havaitseminen on luultavasti mahdollista jo lähivuosina. Jatkon kannalta positiivista on myös vedyn huomattavasti UCN:iä parempi saatavuus, koska siten koejärjestelyn ja laitteiston ongelmat voidaan huomata nopeasti ja korjauksia ja säätöjä tehdä lähes reaaliaikaisesti. [6]

3.2 Erittäin kylmät vetyatomit, Turku

Turun atomaarisen vedyn tutkimukseen kuuluva Ioffe–Pritchard-tyypin magneettinen ansa on esitetty kuvassa 7a ylhäällä. Vetyatomipilvi pidetään koossa magneettikenttien avulla, kun sitä höyrystysjäädytetään laskemalla ansan korkeutta ja antamalla suurienergisiempien atomien haihtua pois. Samoin hallitaan vangittu-



Kuva 7. Turun yliopistossa suunnitteilla olevat kaksi koejärjestelyä atomaarisen vedyn gravitaatio-ominaisuuksien tutkimiseksi: a) läpivirtaustyyppinen laitteisto ja b) staattinen ansa. [19]

jen atomien pystysuoran nopeuden komponentteja, että päästään gravitaatiokokeille sopiviin energioihin. [19]

Tutkimusryhmällä on suunnitteilla kaksi erilaista koejärjestelyä, joista ensimmäinen vastaa neutronien GQS-koetta. Se on esitelty kuvassa 7a. Siinä vetypilvi laskeaan magneettisesta ansasta solenoidien virtaa muuttamalla nesteheliumin pinnalle. Tämä tehdään rauhallisesti vähintään kymmenen sekunnin aikana, että atomit eivät saa ylimääräistä nopeutta tai induktiovirrat eivät lämmitä laitteistoa. Peiliksi on valikoitunut suprajuokseva helium sen takia, että sen ja vedyn välinen attraktiivinen vuorovaikutus on erittäin heikko. Sen pinta on myös erittäin puhdas ja atomaarisesti tasainen, mikä tekee siitä ideaalin matalien energioiden kokeille. [19]

Heliumin pinnalla atomit alkavat levitä ja peili kuvassa 7a oikealla heijastaa väärään suuntaan lähtevät atomit absorberin luo. Absorberi roikkuu nestepinnan yläpuolella tarkkojen säätölaitteiden varassa, jolloin syntyvän raon korkeutta voidaan

muuttaa. Se on lämpöeristetty muusta koejärjestelystä ja pidetään puolen kelvinin lämpötilassa, että siihen ei muodostu heliumkalvoa ja sen kanssa kontaktiin joutuneet vetyatomit vangitaan. Raosta läpi pääsevät atomit asettuvat gravitaatiokvanttitiloihin ja ne heijastuvat muovisesta sauvasta ilmaisimena toimivaan bolometriin. [19]

Toinen mahdollinen koejärjestely on kuvassa 7b. Siinä nesteheliumiin on osittain upotettu dekantterilasi, johon jäähdytettyä atomaarista vetyä lasketaan hitaasti. Tämän jälkeen dekantterilasia lasketaan syvemmälle, jolloin korkeimpien energioiden atomit pääsevät karkaamaan pois ja ne havaitaan heliumastian reunojen bolometreissä. Reunan korkeuden ollessa alle 0,1 millimetriä alkaa vapautuvien atomien vuo riippua vedyn gravitaatiokvanttitilojen etäisyyksistä. Atomeja voidaan myös tutkia virittämällä ne mekaanisesti lasia tärisyttämällä ylemmille kvanttituloille ja tarkkailemalla ansasta karanneiden atomien määrän muutosta. [19]

4 Antihiuksille suunnitellut kokeet

Myös antimaterian gravitaatiovuorovaikutus on mielenkiintoinen tutkimuksen aihe; esimerkiksi vasta hiljattain onnistuttiin todistamaan myös antimaterian putoavan kohti maata normaalin materian tavoin [21]. Muun muassa antiatomiehdokkaille antivedylle, myoniumille ja positroniumille on suunnitteilla erilaisia kokeita tämän vuorovaikutuksen tutkimiseksi, ja antimaterian gravitaatiokvanttitilojen todentamisesta ollaan myös kiinnostuneita [22]. Intuition vastaisesti on todistettu, että erittäin kylmissä lämpötiloissa kvanttiheijastuminen normaalista materiasta ja siten annihiilaation välttäminen on mahdollista sekä antivedylle [23] että positroniumille [22], mikä mahdollistaa GQS:ien syntymisen [22]. Tässä luvussa käydään läpi näiden kahden hiukkasen gravitaatiokvanttitilojen todistamista tavoittelevia tutkimuksia.

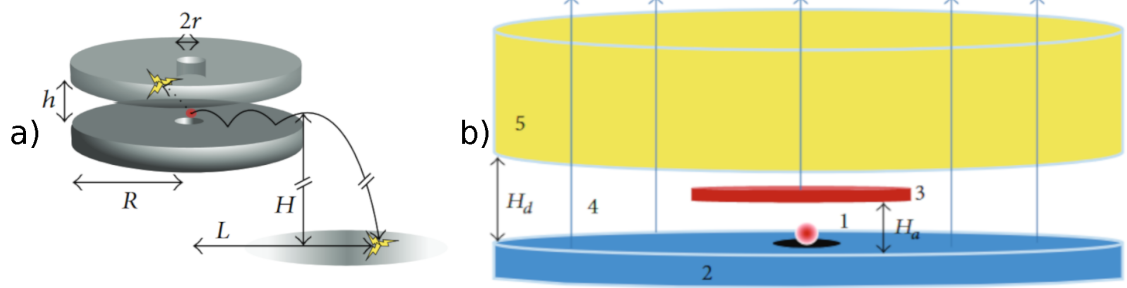
4.1 Antivety, CERN

Antivedyn gravitaatiokvanttitiilojen havaitseminen vaikuttaa realistiselta tavoitteelta [11]. Muodostuvien metastabiilien kvanttitiilojen elinikä on noin 0,1 sekuntia, mikä vastaa hyvin UCN-kokeiden aikaskaalaa [23]. Lisäksi annihiloitumista tapahtuu vain yksittäisten prosenttien tasolla ja siitä syntyy tunnistettava signaali [11]. Antivedyn käsittelyssä on kuitenkin erityispiirteitä neutronien ja vedyn tilanteeseen verrattuna, koska antimaterian gravitaatio- ja inertiaalisen massan ekvivalenssista ei olla varmoja. Tämän takia kvanttimekaanisessa tarkastelussa ne pidetään itsenäisinä ja kaksi erillistä koetta tarvitaan kummankin varmaan selvittämiseen. [11]

CERN:n GBAR-koe (Gravitational Behaviour of Antimatter at Rest) on yksi antivedyn GQS:ien havaitsemiseen pyrkivä tutkimusprojekti, jossa on suunnitteilla kaksi tällaista koejärjestelyä [22]. GBAR:n antivedyn tuotanto on kuitenkin alkanut vasta 2023, joten GQS:ien havaitseminen ei ole ihan vielä ajankohtaista. Tuotannon pitää myös kasvaa huomattavasti, että seuraavaan vaiheeseen eli tuotetun kuuman 6 keV energisen antivedyn jäädyttämiseen päästään. [24] Lisäksi vaaditaan vielä jonkin verran kokeellisten tekniikoiden kehitystä ja soveltamista ennen GQS:ien havaitsemista [11].

Antivedyn jäädytys GBAR:ssa on suunniteltu tehtävän antivetyionien \bar{H}^+ kautta prosessin helpottamiseksi. Ionit jäädytetään sympaattisesti sähköisessä ansassa, jonka jälkeen ylimääräinen positroni irrotetaan laserilla ja saadaan antivetyatomeita noin 10 μ K lämpötilassa eli peV-energialla. [22]

Kuvassa 8a on esitetty koejärjestely antivedyn putoamiskiihtyvyyden selvittämiseksi. Alempi kiekko on sileäpintainen peili, yläkiekko karhea absorberi ja kiekkojen keskellä on reiät, joista antivety tuodaan niiden väliin. Jos atomin pystysuora nopeuden komponentti on liian suuri, se absorboidaan, mutta muuten se jatkaa pömpöä ja putoaa kiekolta, jolloin sen annihilaatio havaitaan. Putoamiskiihtyvyys on määriteltävissä antivetyatomin muodostumisen ja annihilaation välisen ajan pe-



Kuva 8. Ehdotetut koejärjestelyt antivedyn a) putoamiskiihtyvyyden ja b) gravitaatioresonanssispektroskopian tutkimiseksi. [22]

rusteella. [22]

Kuvassa 8b on kuvattu antivedylle suunnitella oleva GRS-koe. Atomi tulee laitteistoon peilin (2) keskellä olevasta reiästä (1). Sisempi kiekko (3) laitteen keskellä on perustilan valitsin, jonka läpäistyään atomi jatkaa peilillä kohti ulkokehää ja kokee virityksen ulkoisessa magneettikentässä (4). Ylempi keikko (5) toimii detektorina, joka on matalammalla kuin virittynyt tila, jolloin atomien virittyminen havaitaan niiden annihiloitumisesta. [22]

Antivedyn kuiskaussalleriatilojen tutkimiseksi on myös suunnitella hyvin samanlainen koe kuin neutroneille. Tällöin ilmaisimella havaitaan kvantttilojen välisestä interferenssistä johtuvaa antivedyn annihiloitumisten jaksollisuutta, joka kertoo erittäin tarkasti antimaterian ja materian vuorovaikutuksesta ja mahdollistaa tämän ominaisuuksien tutkimisen. [25] Toisaalta perinteisemmissäkin antivedyn GQS-kokeissa syntyy kokeiden suuren matemaattisen yhdenmukaisuuden takia kuiskaussalleriakokeille tyypillistä interferenssiä. Olisi siis mahdollista tutkia tällaisia interferenssikuvioita erittäin helposti myös GBAR:n koejärjestelysuunnitelmia mitenkään muuttamatta. [26]

4.2 Positronium

Myös positroniumin gravitaatiokvanttitilojen tutkimista on ehdotettu. Positroniumia on suhteellisen yksinkertaista tuottaa myös pienissä laboratorioissa toisin kuin antivetyä. Positroniumin elinikä on kuitenkin ongelma, sillä se voi annihiloitua protonien kanssa tai spontaanisti, mikä vaatisi sen virittämistä korkealle Rydberg-tilalle ja koejärjestelyn tarkkaa eristämistä ulkoisilta voimilta. [22] Ei ole varmaa onnistuuko positroniumin gravitaatiokvanttitilojen tutkiminen. Läpivirtaustyyppistä GQS-koejärjestelyä on ehdotettu, mutta varsinaisia rakennusaikeita ei ole. [27] Kyseessä on silti mielenkiintoinen hiukkanen ja sen käsittelyn tekniikka on kehittynyt [28]. Muita antimaterian painovoimaan liittyviä kokeita positroniumilla suunnittelevät muun muassa Trenton yliopiston antimaterialaboratorio [28] ja University College London [29].

5 Yhteenveto

Gravitaatiokvanttitilojen aikaansaaminen on vaikeaa, sillä gravitaatiopotentiaalisissa ei muodostu tarvittavia potentiaalikuoppia ilman tehokkaan peilin vaikutusta eikä tiloja pääse myöskään muodostumaan, jos hiukkasella on liian suuri pystysuora nopeus liikkuessaan peilin pinnalla. Lisäksi hiukkanen pitää suojata ympäristön muilta paljon voimakkaammilta vaikutuksilta gravitaation vaikutuksien havaitsemiseksi, minkä takia matka gravitaatiopotentiaalisissa pomppivan hiukkasen teorian todistamiseen oli pitkä. Läpimurron eli neutronien GQS:ien aikaansaamisen ja havaitsemisen tapahduttua teorian mahdollistamat tutkimus- ja sovelluskohteet ovat laajenneet huomattavasti.

GQS:ien teoria ei ole riippuvainen tietyn hiukkasen ominaisuuksista, joten tutkimus koskee nykyään yhtä lailla vety- ja antivetyatomeita. Kummankin kohdalla GQS:ien havaitseminen vaikuttaa mahdolliselta ja vedyn kohdalla se tuntuu olevan

vain ajan kysymys. Positroniumillekin on suunnitelmia, mutta luultavasti sen ominaisuuksien aiheuttamien ongelmien takia GQS-tutkimus ei sen kohdalla ole edistynyt viime vuosina. Vedyn ja antivedyn tutkimisen jälkeen esimerkiksi positronium ja muut antihiukkaset sekä raskaammat alkuaineet voisivat olla tulevaisuuden GQS-tutkimuskohteiden listalla.

Teoriaa ja sen paljastamia ilmiöitä on myös mahdollista tutkia erilaisista kulumista uusilla koejärjestelyillä. Gravitaatioresonanssispektroskopiassa keskeistä on GQS:n vuorovaikutus ulkoisen voiman eli peilin värinän tai oskilloivan magneettikentän kanssa ja siitä johtuva viritys korkeammalle tilalle. Tutkimusta tehdään joko tietyn GQS-parin energiaeron resonanssitaajuutta tai ulkoisen voiman impulsiivista muutosta hyväksikäyttäen. Kaarevalle peilille muodostuvat GQS:iä muistuttavat kuiskaugalleriatilat taas mahdollistavat hiukkasen käyttäytymisen havainnoinnin tilojen interferenssistä. Erityistä on myös potentiaalikuopan muodostuminen hiukkasen kokemasta efektiivisestä keskipakoispotentiaalista sekä peilin potentiaalin ja hiukkasen energian sama mittaluokka. Nämä mahdollistavat koejärjestelyn muokkaamisen monenlaisiin tarpeisiin sekä hiukkasen ja peilin eli eri materiaalien välisen vuorovaikutuksen tutkimisen.

Viitteet

- [1] A. Ashtekar ja E. Bianchi, Reports on Progress in Physics **84**, 042001 (2021).
- [2] K.-H. Chae, The Astrophysical Journal **952**, 128 (2023).
- [3] V. V. Nesvizhevsky, H. G. Börner, A. K. Petukhov, H. Abele, S. Baessler, F. J. Rueß, T. Stöferle, A. Westphal, A. M. Gagarski, G. A. Petrov ja A. V. Strelkov, Nature **415**, 297 (2002).
- [4] G. Breit, Physical Review **32**, 273 (1928).
- [5] V. V. Nesvizhevsky, A. K. Petukhov, K. V. Protasov ja A. Y. Voronin, Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics **78**, 033616 (2008).
- [6] C. Killian, Z. Burkley, P. Blumer, P. Crivelli, F. P. Gustafsson, O. Hanski, A. Nanda, F. Nez, V. Nesvizhevsky, S. Reynaud, K. Schreiner, M. Simon, S. Vasiliev, E. Widmann ja P. Yzombard, The European Physical Journal D **77**, 50 (2023).
- [7] A. Westphal, H. Abele, S. Baessler, V. V. Nesvizhevsky, K. V. Protasov ja A. Y. Voronin, The European Physical Journal. C, Particles and Fields. **51**, 367 (2007).
- [8] H. Abele, T. Jenke, H. Leeb ja J. Schmiedmayer, Physical Review D **81**, 065019 (2010).
- [9] J. M. Rocha ja F. Dahia, Classical and Quantum Gravity **41**, 165001 (2024).
- [10] T. Jenke, G. Cronenberg, J. Burgdörfer, L. Chizhova, P. Geltenbort, A. Ivanov, T. Lauer, T. Lins, S. Rotter, H. Saul, U. Schmidt ja H. Abele, Physical Review Letters **112**, 151105 (2014).
- [11] A. Y. Voronin, P. Froelich ja V. V. Nesvizhevsky, Physical Review A **83**, 032903 (2011).
- [12] V. V. Nesvizhevsky, A. Y. Voronin, R. Cubitt ja K. V. Protasov, Nature Physics **6**, 114 (2010).
- [13] V. V. Nesvizhevsky, H. G. Börner, A. M. Gagarski, A. K. Petoukhov, G. A. Petrov, H. Abele, S. Baessler, G. Divkovic, F. J. Rueß, T. Stöferle, A. Westphal, A. V. Strelkov, K. V. Protasov ja A. Y. Voronin, Physical Review D **67**, 102002 (2003).
- [14] V. Nesvizhevsky, H. Börner, A. Gagarski, G. Petrov, A. Petukhov, H. Abele, S. Bäßler, T. Stöferle ja S. Soloviev, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **440**, 754 (2000).
- [15] H. Abele ja H. Leeb, New Journal of Physics **14**, 055010 (2012).

- [16] T. Jenke, P. Geltenbort, H. Lemmel ja H. Abele, *Nature Physics* **7**, 468 (2011).
- [17] G. Pignol, S. Bäckler, V. V. Nesvizhevsky, K. Protasov, D. Rebreyend ja A. Voronin, *Advances in High Energy Physics* **2014**, 1 (2014).
- [18] I. Tutunnikov, K. Rajitha, A. Voronin, V. Nesvizhevsky ja I. Averbukh, *Physical Review Letters* **126**, 170403 (2021).
- [19] S. Vasiliev, J. Ahokas, J. Järvinen, V. Nesvizhevsky, A. Voronin, F. Nez ja S. Reynaud, *Hyperfine Interactions* **240**, 14 (2019).
- [20] C. Killian, P. Blumer, P. Crivelli, O. Hanski, D. Kloppenburg, F. Nez, V. Nesvizhevsky, S. Reynaud, K. Schreiner, M. Simon, S. Vasiliev, E. Widmann ja P. Yzombard, *The European Physical Journal D* **78**, 132 (2024).
- [21] E. K. Anderson, C. J. Baker, W. Bertsche, N. M. Bhatt, G. Bonomi, A. Capra, I. Carli, C. L. Cesar, M. Charlton, A. Christensen, R. Collister, A. Cridland Mathad, D. Duque Quiceno, S. Eriksson, A. Evans, N. Evetts, S. Fabbri, J. Fajans, A. Ferwerda, T. Friesen, M. C. Fujiwara, D. R. Gill, L. M. Golino, M. B. Gomes Gonçalves, P. Grandemange, P. Granum, J. S. Hangst, M. E. Hayden, D. Hodgkinson, E. D. Hunter, C. A. Isaac, A. J. U. Jimenez, M. A. Johnson, J. M. Jones, S. A. Jones, S. Jonsell, A. Khramov, N. Madsen, L. Martin, N. Massacret, D. Maxwell, J. T. K. McKenna, S. Menary, T. Momose, M. Mostamand, P. S. Mullan, J. Nauta, K. Olchanski, A. N. Oliveira, J. Peszka, A. Powell, C. Rasmussen, F. Robicheaux, R. L. Sacramento, M. Sameed, E. Sarid, J. Schoonwater, D. M. Silveira, J. Singh, G. Smith, C. So, S. Stracka, G. Stutter, T. D. Tharp, K. A. Thompson, R. I. Thompson, E. Thorpe-Woods, C. Torkzaban, M. Urioni, P. Woosaree ja J. S. Wurtele, *Nature* **621**, 716 (2023).
- [22] G. Dufour, D. B. Cassidy, P. Crivelli, P. Debu, A. Lambrecht, V. V. Nesvizhevsky, S. Reynaud, A. Y. Voronin ja T. E. Wall, *Advances in High Energy Physics* **2015**, 1 (2015).
- [23] A. Y. Voronin ja P. Froelich, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **38**, L301 (2005).
- [24] P. Adrich, P. Blumer, G. Caratsch, M. Chung, P. Cladé, P. Comini, P. Crivelli, O. Dalkarov, P. Debu, A. Douillet, D. Drapier, P. Froelich, N. Garroum, S. Guellati-Khelifa, J. Guyomard, P.-A. Hervieux, L. Hilico, P. Indelicato, S. Jonsell, J.-P. Karr, B. Kim, S. Kim, E.-S. Kim, Y. J. Ko, T. Kosinski, N. Kuroda, B. M. Latacz, B. Lee, H. Lee, J. Lee, E. Lim, L. Liskay, D. Lunney, G. Manfredi, B. Mansoulié, M. Matusiak, V. Nesvizhevsky, F. Nez, S. Niang, B. Ohayon, K. Park, N. Paul, P. Pérez, C. Regenfus, S. Reynaud, C. Roumegou, J.-Y. Roussé, Y. Sacquin, G. Sadowski, J. Sarkisyan, M. Sato, F. Schmidt-Kaler, M. Staszczak, K. Szymczyk, T. A. Tanaka, B. Tuchming, B. Vallage, A. Voronin, D. P. Van Der Werf, A. Welker, D. Won, S. Wronka, Y. Yamazaki, K.-H. Yoo ja P. Yzombard, *The European Physical Journal C* **83**, 1004 (2023).

- [25] A. Y. Voronin, V. V. Nesvizhevsky ja S. Reynaud, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **45**, 165007 (2012).
- [26] V. V. Nesvizhevsky, A. Y. Voronin, P.-P. Crépin ja S. Reynaud, *Hyperfine Interactions* **240**, 32 (2019).
- [27] P. Crivelli, V. V. Nesvizhevsky ja A. Y. Voronin, *Advances in High Energy Physics* **2015**, 1 (2015).
- [28] S. Mariazzi, R. Caravita, L. Penasa, A. Chehaimi, R. C. Ferguson, M. Bettonte ja R. S. Brusa, *Acta Physica Polonica A ISSN 1898-794X* **146**, 674 (2024).
- [29] D. S. Hajdukovic, *Modern Physics Letters A* **35**, 2030001 (2020).