

4.félévi beszámoló

Varga Dániel (varga.daniel@wigner.hu)

Statisztikus Fizika, Biológiai Fizika és Kvantumrendszerek Fizikája PhD program

Témavezetők: Domokos Péter, Dombi András

(Wigner FK, Kvantumoptika „Lendület” Kutatócsoport)

Dolgozat címe: *Fény-anyag kvantuminterfész*

Bevezetés:

A “Fény-anyag kvantuminterfész” címen meghirdetett doktori kutatási téma fókuszában az ultrahideg atomok fizikája és a rezonátoros kvantumelektrodinamika áll.

A Wigner Fizikai Kutatóközpontban működő kvantumoptika laborban atomi szintű fény-anyag kölcsönhatást vizsgáló kvantumelektrodinamikai kísérleteket végeznek. Ultranagy vákuumban elhelyezett magneto-optikai csapdában gyűjtött és lézeresen hűtött rubídium atomokat egy Fabry-Perot típusú üregrezonátorban létrehozott egymódusú optikai mezővel hoznak kölcsönhatásba, kontrollált módon. A módus és az atomok között létrejövő kollektíven erős, elektromos dipólkölcsönhatás miatt a rendszer nemlineáris optikai jelenségek vizsgálatára alkalmas. Emellett az erős csatolás lehetővé teszi kvantuminformáció koherens átadását fény és atomi hordozók között.

A doktori kutatómunka fő feladata egy hasonló rendszer megépítése és beüzemelése, amelyben a csapdázott, hideg atomokat a lézerek mellett közeltér mikrohullámú mezőkkel is lehet gerjeszteni.

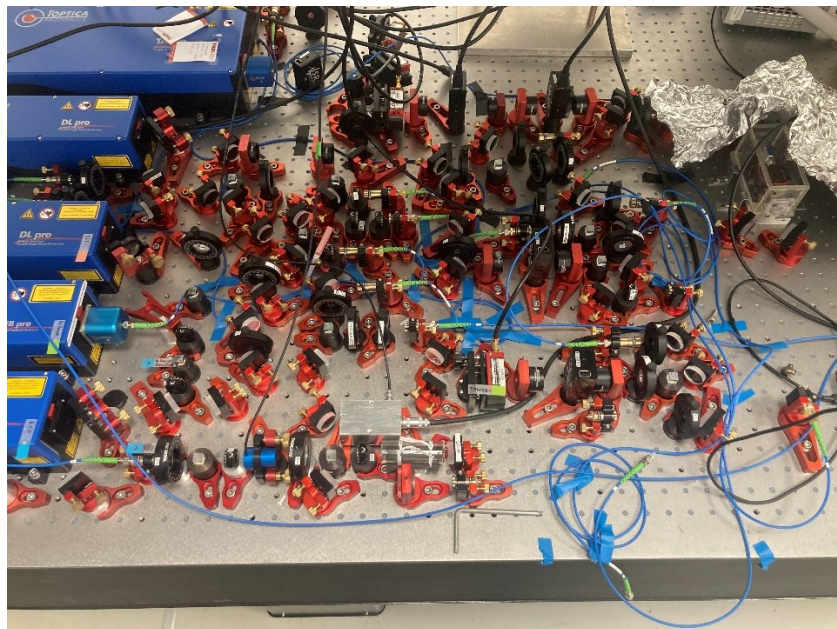
Az optikai és mikrohullámú frekvenciatartomány együttes használatának motivációja a kvantumszámítási műveletek és a nagy távolságú kvantumkommunikáció összekapcsolása. Előbbit többnyire a mikrohullámú tartományban végzik, míg az adattovábbításnál fényjel közvetíti a kvantum információt, optikai szálakon keresztül.

Az elmúlt 3 félév alatt végzett kutatói munka ismertetése:

Az előző három félévben a bevezetőben ismertetett kvantumoptikai labor építést, fejlesztését végeztem.

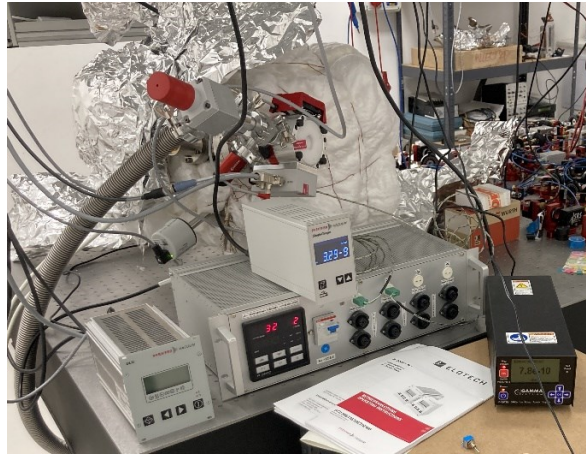
Az új kísérleti rendszerben a csapdázott hidegatomok optikai tartomány mellett már mikrohullámú térrel is besugárzhatóak lesznek. Az ehhez szükséges új elemek és alkatrészek összeszerelésével, kipróbálásával és fejlesztésével foglalkoztam, továbbá a teljes laboratórium építésében is részt vettem.

Egyik feladatként az optikai rendszer tervezését és összeállítását végeztem. A kísérlet során 5 különböző lézerforrást és még több eltérő frekvenciájú modulált fényt használunk, a rubídium atomok csapdázására, hűtésére, illetve a kísérleti kölcsönhatás során. Ezeknek a nyaláboknak az előállítására egy komplex, több optikai elemet tartalmazó rendszert építettünk fel. Az új laborban a már működő kísérlet tapasztalatait felhasználva egy kompaktabb és átláthatóbb optika tervezése volt a feladatom, 2.ábra.



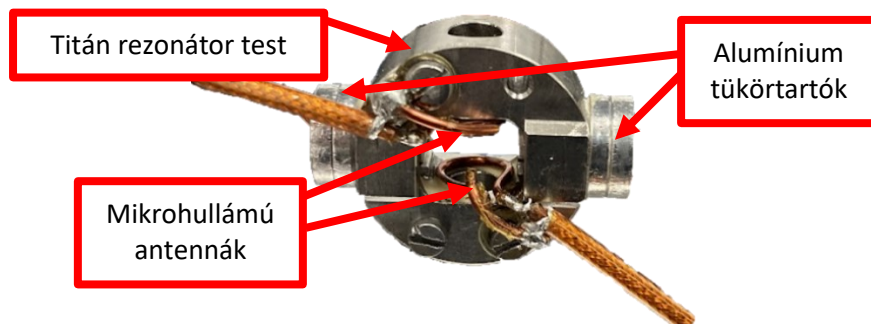
2.ábra Építés alatt álló optikai rendszer

A kísérlet másik fő eleme a vákuumkamra, ennek elhelyezését és összeszerelését is végeztem. A kamrán belül történik a rubídium atomok magneto-optikai csapdázása, hűtése, majd mágneses transzportja az optikai rezonátor terébe. Mindezt a környezettől a lehető legjobban elszigetelt módon szeretnénk kivitelezni, ezért ultranagy vákuumra van szükségünk. Ennek a létrehozásához több különböző típusú szivattyút használunk, megfelelő sorrendben bekapcsolva. Továbbá magas hőmérsékletre fűtjük fel a kamrát, elősegítve a szennyeződések kipárolgását, 3.ábra.



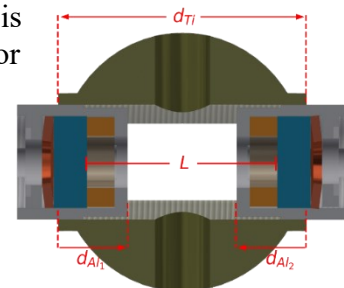
3.ábra A kamra kifűtés közben, szigetelő anyagba burkolva

Egyik fő feladatomban a fény-anyag kölcsönhatási kísérlethez tervezett optikai rezonátor építése és tesztelése volt. A jelenleg is működő laborhoz képest mikrohullámú köztér hurok antennákat helyeztünk el az új konstrukción, így a tükrök közé transzportált atomok már az optikai mellett „hybrid” módon mikrohullámú térrel is besugározhatóak lesznek, 4.ábra.



4.ábra Az összeszeret "hybrid" rezonátor

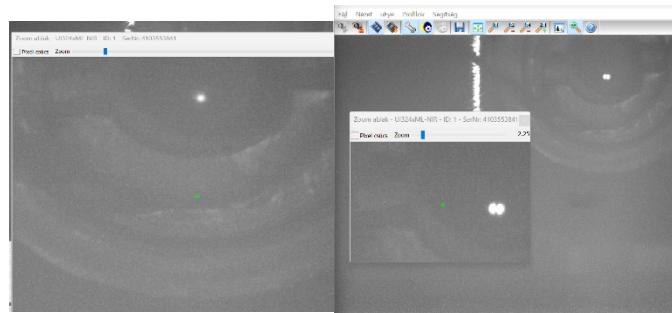
Elsőkét összeállítottam a rezonátort. Vákuumkompatibilis ragasztóval rögzítve az antennákat majd beépítve a rezonátor tükrökbe. Utóbbiakat alumínium tartókba rögzítettem majd ezeket csavartam be a titán rezonátor testbe. Ennek a bimetál konstrukciónak az előnye, hogy hőmérsékletváltozás esetén az alumínium nagyobb hőtágulási együtthatója miatt kompenzálódik a titán tágulásából származó tükrőtávolság változás, 5.ábra.



$$d_{Ti} \cdot \alpha_{Ti} \cdot \Delta T = (d_{Al_1} + d_{Al_2}) \cdot \alpha_{Al} \cdot \Delta T$$

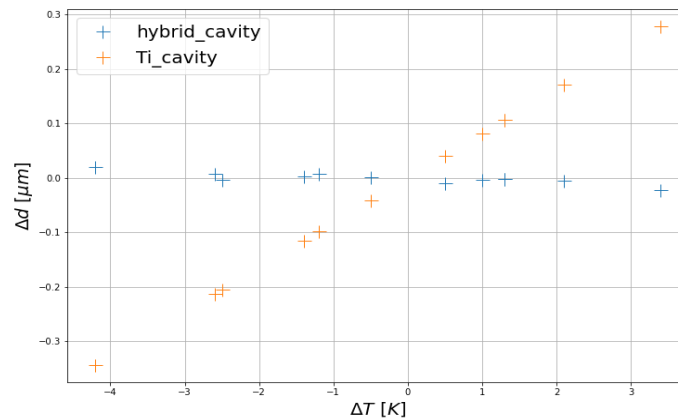
5.ábra A rezonátor sematikus terve, hőkompenzáció szemléltetésével

Miután beállítottam a tükröket, felépítettem egy kis optikai rendszert a rezonátor teszteléséhez. Elsőként módust kerestem az optikai rezonátorban, ami precíziós és időigényes munka, mivel nagy reflexivitással, >99.998% rendelkező tükröket használunk, 6.ábra



6. ábra TEM₀₀ és TEM₀₁ módus transzmissziós felvétele

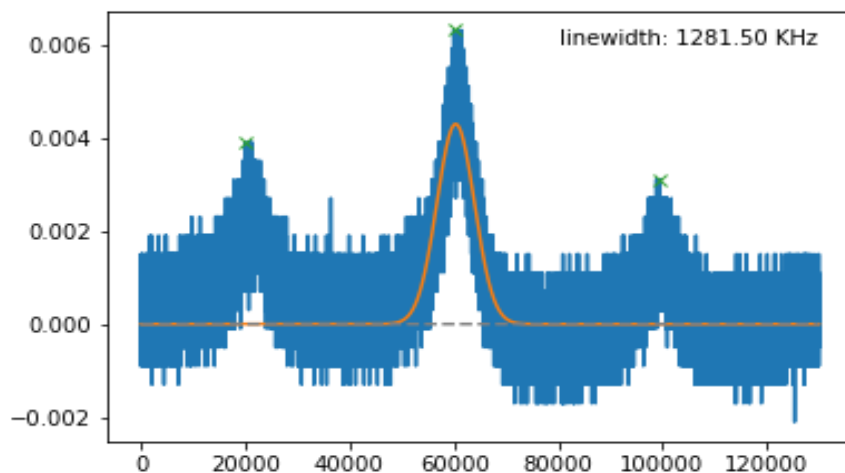
Ezt követően végeztem a rezonátor mechanikai részének vizsgálatát, a tükörtartó alumínium perselyek pozíciójának függvényében, megkeresve egy ideális kompenzációs pontot, 7. ábra.



7. ábra A beállított rezonátor és egy tiszta titán rezonátor hőtágulásának összehasonlítása

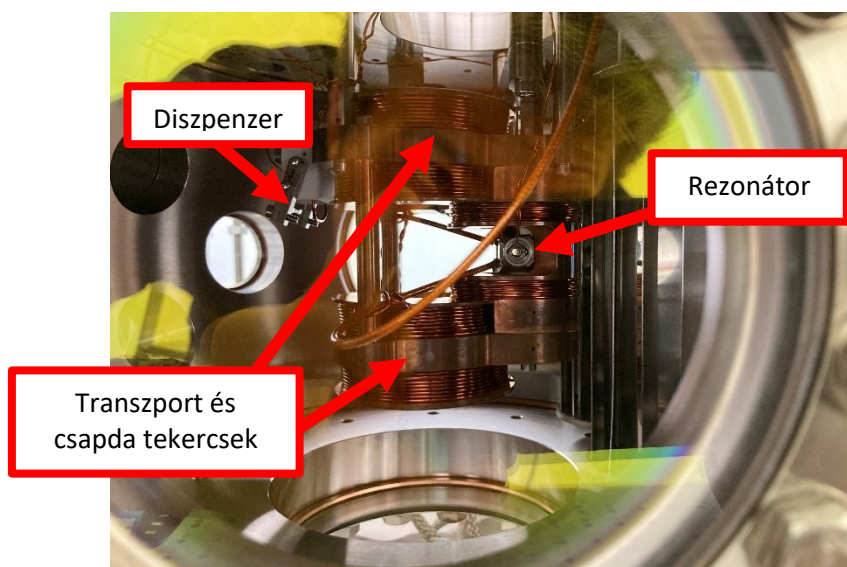
Stabil pont rögzítése után, egymódusú becsatolást állítottam be, és bővítettem a kísérleti elrendezést egy „lock”-rendszerrel. Ennek segítségével a rezonátor saját frekvenciáját tudtam rögzíteni egy stabil, keskeny, 100 kHz vonalszélességű 780 nm-es fénynyalábhoz, 1. ábra. Ehhez az optikai rész mellett a vezérlő elektronika beállításával, optimalizálásával is foglalkoztam.

Ezután a rezonátor vonalszélességének mérését végeztem el. Ehhez a lockolt cavity-n lőttem keresztül egy második, 805 nm-es, modulált lézernyalábot, aminek időben változtattam a frekvenciáját. A transzmittált fény intenzitásának változását a frekvencia függvényében fotodiódával rögzítettem, 8. ábra.



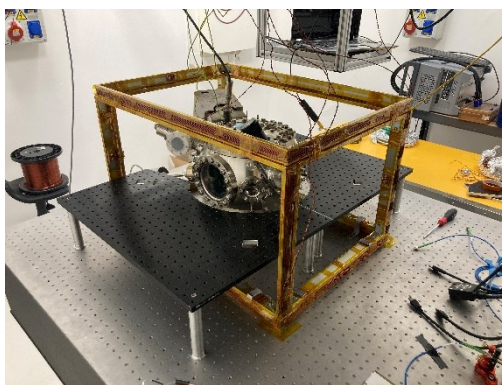
8.ábra Modulált 805 nm-es fény transzmissziója, a számolt vonalszélesség 1.28 MHz

A tesztek után az összeszerelt rezonátort beépítettem a vákuumkamrába. Továbbá elhelyeztem az atomok csapdázásához használt mágneses tekercseket és a rubídiumot tartalmazó diszpenzert is. Elvégeztem a vákuumkompatibilis vezeték kontaktálásokat és lezártuk a kamrát, 9.ábra.



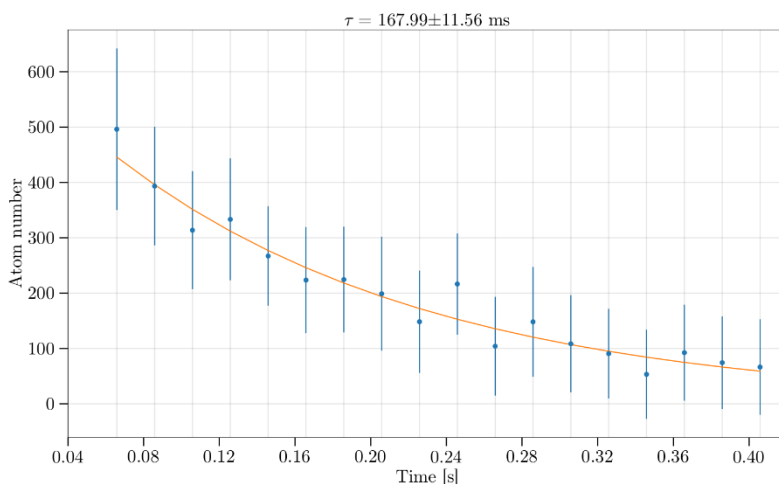
9.ábra A vákuumkamrába épített mágneses tekercsek, diszpenzer és rezonátor A kamra belsejébe épített tekercseket mi készítettük, figyelve a vákuumtisztaság érdekében

Egy teszt kifűtés és hűtési ciklust végeztünk, aminek befejeztével elhelyeztünk mágneses kompenzációs tekercseket a kamra körül. Ezeknek a szerepe, hogy a rezonátor, illetve az atomcsapda helyén ellensúlyozni tudjuk a Föld és más külső forrásból eredő mágneses tereket, 10.ábra.



10. ábra A vákuumkamra és köré épített kompenzációs tekercek

Az új kísérleti rendszer építése mellett, a már működő laborban méréseket végeztem. Ezek során demonstráltuk a hideg atomok mágneses csapdából optikai dipólcsapdába történő áttöltésének működését, illetve a dipólcsapda csapdázási idejét mértük meg, 11.ábra. A kísérlet során rögzített adatok feldolgozásában is részt vettem. Az eredményeket elsőszerzős cikkben közöltük [1].

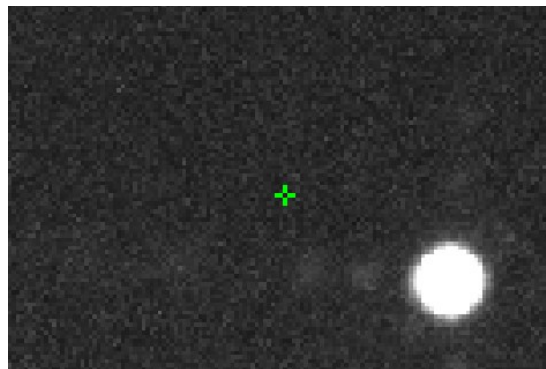


11.ábra Optikai dipólcsapdában lévő atomszám változása az idő függvényében

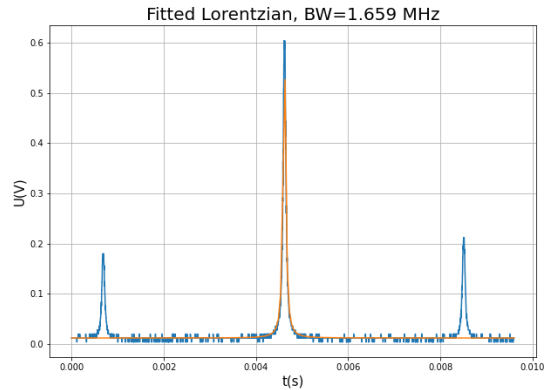
Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése:

A teszt kifűtést követően felépítettem egy optikai rendszert, a már lezárt kamrában lévő rezonátor vizsgálatához. Elsőként módust kerestem, ezzel igazolva, hogy a konstrukció továbbra is rezonátorként viselkedik és nem szenvedett olyan mechanikai változást a fűtés hatására, amitől nagymértékben elállítódott volna a tükrök pozíciója, 12.ábra.

Ezután teszteltem, hogy „lock”-olható a rezonátor, majd modulált fényt használva vonalszélesség mérést végeztem, 13.ábra.



12.ábra A kamrában lévő rezonátor transzmissziós felvétele

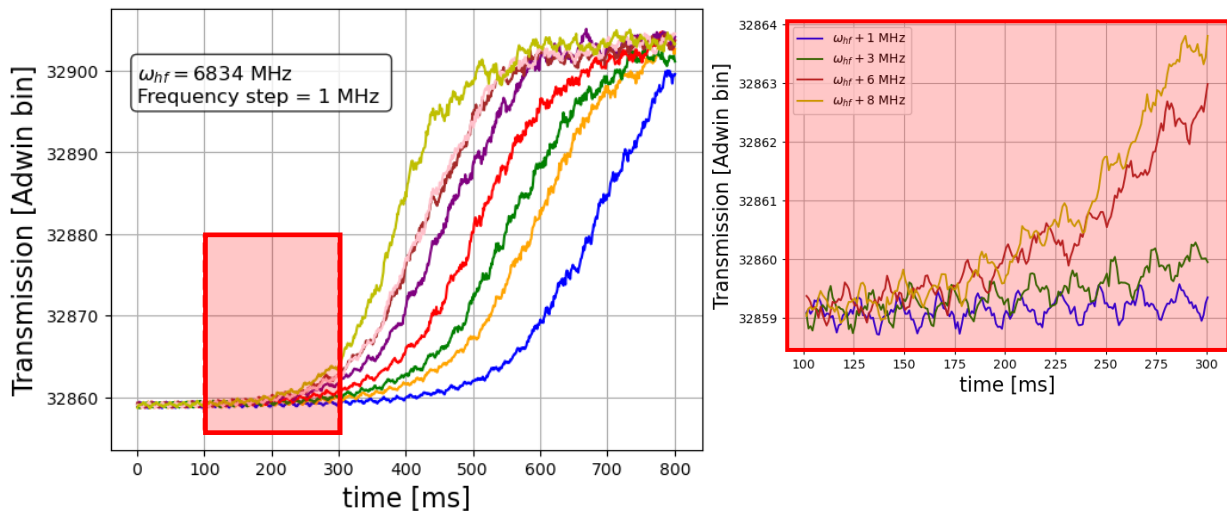


13.ábra A rezonátor transzmissziója és az ebből számolt vonalszélesség, 1,66 MHz

A vonalszélesség a mérések alapján megnőtt a korábbi értékhez képest, 1.28 MHz-ről 1.66 MHz-re. A kapott eredmény a tervezett kísérletekhez még mindig kellően keskeny.

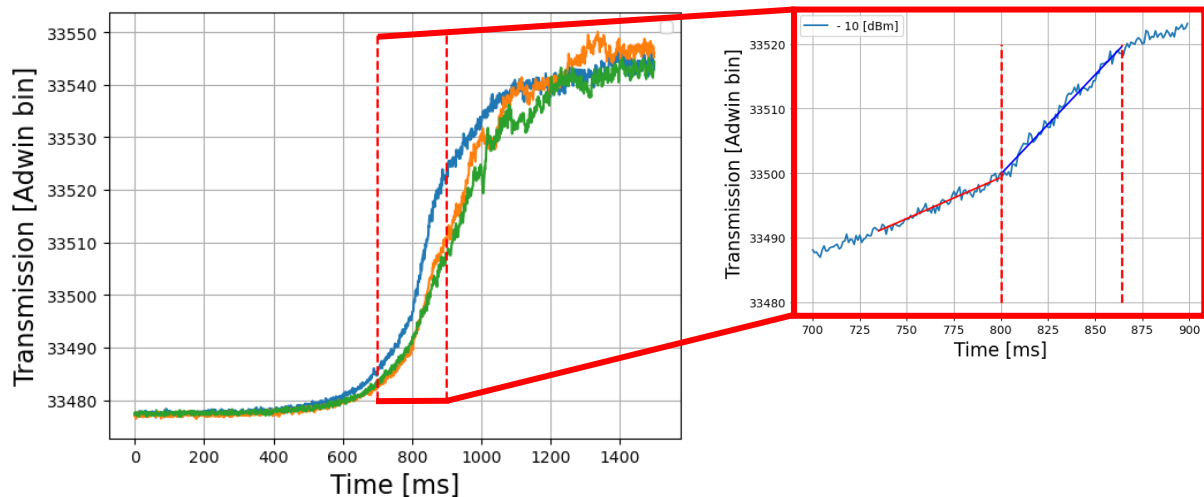
Újra felhelyeztük a fűtőszálakat és a szigetelést és elindítottuk a kifűtési ciklust. Ennek során 150 °C-ra fűtöttük fel a kamrát, amin 4-5 hétig tartjuk, figyelve a nyomásváltozást.

Amíg a kifűtést végeztük, adatfeldolgozással foglalkoztam. Egy korábbi kísérlet során külső mikrohullámú antennával sugároztunk be a kamrába és vizsgáltuk az atomok viselkedését. A cél az volt, hogy találjunk olyan pontot, ahol a mikrohullám rezonáns az atomokkal és ez az effektus megfigyelhető legyen a rezonátor transzmissziójának változásában. Ehhez az atomi rezonancia körül szkenneltünk a forrással, 14.ábra.



14.ábra Detektált transzmissziós értékek eltérő frekvenciájú mikrohullám esetén

Ugyanígy megvizsgáltuk a transzmissziós görbe változást eltérő erősítésű, rezonáns besugárzásokra, 15.ábra.



15. ábra Eltérő erősítésű mikrohullámnál mért transzmissziók

Demonstrálni tudtuk, hogy van hatása az általunk besugárzott mikrohullámnak az atomokra.

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben:

A félév során általam végzett kurzusok:

- Rádiócsillagászat 2. (FIZ/5/010)

Konferenciák a képzés alatt:

- 2022.11.26.-28. Quanterra MOCA „kickoff” meeting, szakmai konferencián vettem részt Bordeaux-ban, ahol posztert mutattam be az általam épített és tesztelt rezonátorról
- 2023.07.03-07. CEWQO (Central European Workshop on Quantum Optics) Milánóban, kvantumoptikai konferencián vettem részt, ahol posztert mutattam be.
- 2023.09.18-20. Wigner 121 Szimpózium, posztert mutattam be.
- 2023.10.01-05. CALI 2023 konferencia Krétán, posztert mutattam be.
- 2024.07.01-05. CEWQO (Central European Workshop on Quantum Optics) Olomucban, poszterben fogom bemutatni a mikrohullámú méréseket.

Megjelent publikációk:

1. D. Varga, B. Gábor, B. Sárközi, K.V. Adwaith, D. Nagy, A. Dombi, T.W. Clark, F.I.B. Williams, P. Domokos, A. Vukics, *Loading atoms from a large magnetic trap to a small intra-cavity optical lattice*, Physics Letters A, Volume 505, 2024, 129444, <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129444>.