

Списък на научните трудове с резюмета на български и английски език

на гл. ас. Любомир Иванов Стойчев

A1. Stoychev L.I., Danailov M.B., Demidovich A.A., Nikolov I.P., Cinquegrana P., Sigalotti P., Bakalov D., Vacchi A., “DFG-based mid-IR laser system for muonic-hydrogen spectroscopy”, Laser Sources and Applications II 9135, 91350J, DOI: [10.1117/12.2052110](https://doi.org/10.1117/12.2052110), 2014. Без IF, със SJR

Abstract

The goal of this work is to prove the feasibility of building a laser system that can generate mid-infrared radiation with the parameters required for the measurement of the hyperfine splitting in the ground state of the muonic hydrogen spectroscopy.

The first experimental results of a very straightforward scheme that, to our knowledge, has not been considered in the literature, are presented. We study a laser test bench system emitting nanosecond pulses of infrared tunable radiation in the spectral range 6.78 μm with high energy and narrow line-width, based on direct difference frequency generation (DFG), in non-oxide nonlinear crystals, using as pump lasers a single-mode Nd:YAG laser and tunable narrowbandwidth Cr:forsterite laser.

The investigated system is based on lithium thioindate (LiInS_2) and silver thiogallate (AgGaS_2) crystals cut for type II difference frequency generation. The pulses of the Nd:YAG laser (1,064 μm) are combined with the pulses at $\sim 1.262 \mu\text{m}$ of the Cr:forsterite laser through a dichroic mirror and sent to the nonlinear crystals in different optical geometries. The generated radiation reaches an output energy up to 80 μJ in a single pass optical geometry, has 10 ns long pulses at 50 Hz frequency repetition rate and is tunable in the range 6595 – 6895 nm. These first results prove the suitability of such an approach for building the laser system for the muonic-hydrogen experiment.

Резюме

Целта на тази работа е да докаже осъществимостта на създаването на лазерна система, която може да генерира средно инфрачервено лъчение с параметрите, необходими за измерване на свръхфиното разделяне в основното състояние на муон-водородната спектроскопия.

Представени са първите експериментални резултати от много изчистена схема, която, доколкото ни е известно, не е била разгледана в литературата преди. Изучаваме тестова версия на лазерна система, излъчваща наносекундни импулси на инфрачервено пренастройваемо лъчение в спектралният обхват 6,78 μm с висока енергия и тясна широчина на линията, базирана на директна генерация с изваждане на честоти (DFG), в неоксидни нелинейни кристали, използвайки като напмпващи лазери едномодов Nd:YAG лазер и пренастройваем Cr:форстерит лазер с тесна ширина на спектралната линия.

Изследваната система е базирана на кристали литиев тиоидат (LiInS_2) и сребърен тиогалат (AgGaS_2), изрязани за тип II генерация с изваждане на честоти. Импулсите на Nd:YAG лазер (1,064 μm) се комбинират с импулсите на $\sim 1,262$

μm на Cr:forsterite лазер през дихроично огледало и се изпращат към нелинейните кристали в различни оптични геометрии. Генерираното лъчение достига изходна енергия до 80 μJ в еднопроходна геометрия, с дължина на импулсите 10 ns при честота на повторение 50 Hz и е пренастройваема в диапазона 6595 – 6895 nm. Тези първи резултати доказват приложимостта на такъв подход за изграждане на лазерната система за експеримента с мюон-водород.

A2. Stoychev L.I., Danailov M.B., Nikolov I.P., Demidovich A.A., Bakalov D., Vacchi A., “Increasing the output energy of MID-IR laser system for muonic-hydrogen spectroscopy”, 2015 Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies, 1-3, DOI: [10.1049/cp.2015.0183](https://doi.org/10.1049/cp.2015.0183). Без IF, със SJR

Abstract

In this paper we describe a promising approach to increase the output energy of a laser system emitting infrared radiation in the spectral range 6.78 μm based on direct difference frequency generation in non-oxide nonlinear crystals using single-mode Nd:YAG laser and tunable Cr:forsterite laser, which was developed for the muonic-hydrogen experiment. The investigated system is based on lithium thioindate (LiInS_2) crystal cut for type II difference frequency generation. The pulses of the Nd:YAG laser (1,064 μm) are combined with the pulses at $\sim 1.262 \mu\text{m}$ of the Cr:forsterite laser through a dichroic mirror and sent to the nonlinear crystals in different optical geometries. The generated radiation reaches an output energy more than 90 μJ in a single pass optical geometry, has 10 ns long pulses at 50 Hz frequency repetition rate and is tunable in the range 6695 – 6870 nm. These results prove the suitability of such an approach for building the laser system for the muonic-hydrogen experiment.

Резюме

В тази статия ние описваме обещаващ подход за увеличаване на изходната енергия на лазерна система, излъчваща инфрачервено лъчение в спектралния обхват 6,78 μm на базата на директна генерация с изваждане на честоти в неоксидни нелинейни кристали, използвайки едномодов Nd:YAG лазер и пренастройваем Cr:форстеритен лазер, който е разработен за експеримента с мюонно-водород. Изследваната система се основава на кристал от литиев тиоидат (LiInS_2), изрязан за генерация с изваждане на честоти тип II. Импулсите на Nd:YAG лазера (1,064 μm) се комбинират с импулсите при $\sim 1,262 \mu\text{m}$ на Cr:forsterite лазера през дихроично огледало и се изпращат към нелинейните кристали в различни оптични геометрии. Генерираното лъчение достига изходна енергия повече от 90 μJ в еднопроходна оптична геометрия, с дължина на импулсите 10 ns, при честота на повторение 50 Hz и е пренастройваемо в диапазона 6695 – 6870 nm. Тези резултати доказват пригодността на подобен подход за изграждане на лазерната система за експеримента с мюон-водород.

A3. Stoychev L.I., Cabrera H., Gadedjisso-Tossou K.S., Nikolov I.P., Sigalotti P., Demidovich A.A., Suárez-Vargas J.J., Mocchiutti E., Niemela J., Baruzzo M., Vasiliev N., Zaporozhchenko Y., Danailov M.B., Vacchi A., “Pulse amplification in a Cr^{4+} :

forsterite single longitudinal mode (SLM) multi-pass amplifier”, *Laser Physics* 29 (6), 065801, 2019. Q2/Q3

Abstract

An efficient multi-pass Cr:forsterite master oscillator-power amplifier laser system operating in the single-longitudinal mode was demonstrated and characterized. A significant increase in energy was obtained in a six-pass amplifier configuration giving a maximum value of up to 10.8 mJ, with a good beam quality and without significantly broadening the linewidth or increasing the M^2 . The amplifier performance was evaluated as a function of the pump energy and the number of passes. A Fourier transformation of the laser pulses was performed to confirm the linewidth value measured using a Fabry–Perot etalon.

Резюме

Демонстрирана и охарактеризирана е ефективна многопроходна лазерна система на Cr:forsterite от типа управляващ осцилатор - усилвател на мощност, работеща в едночестотен режим. Значително увеличение на енергията беше получено при конфигурация на усилвателя с шест прохода, даваща максимална стойност на енергията до 10,8 mJ, с добро качество на снопа и без значително разширяване на ширината на спектралната линия или увеличаване на M^2 . Производителността на усилвателя е оценена като функция от напмпващата енергия и броя на преминаванията. Извършена е трансформация на Фурие на лазерните импулси, за да се потвърди стойността на ширината на спектралната линия, измерена с помощта на Фабри-Перо еталон.

A4. Stoychev L.I., Cabrera H., Gadedjisso-Tossou K.S., Vasiliev N., Zaporozhchenko Y., Nikolov I.P., Sigalotti P., Demidovich A.A., Suárez-Vargas J.J., Mocchiutti E., Pizzolotto C., Niemela J., Baruzzo M., Danailov M.B., Vacchi A., “24 mJ Cr+4:forsterite four-stage master-oscillator power-amplifier laser system for high resolution mid-infrared spectroscopy”, *Review of Scientific Instruments* 90, 093002 (2019); DOI: [10.1063/1.5115105](https://doi.org/10.1063/1.5115105). Q2

Abstract

We present the design of a Cr:forsterite based single-frequency master-oscillator power-amplifier laser system delivering much higher output energy compared to previous literature reports. The system has four amplifying stages with two-pass configuration each, thus enabling the generation of 24 mJ output energy in the spectral region around 1262 nm. It is demonstrated that the presented Cr:forsterite amplifier preserves high spectral and pulse quality, allowing a straightforward energy scaling. This laser system is a promising tool for tunable nonlinear down-conversion to the mid-infrared spectral range and will be a key building block in a system for high-resolution muonic hydrogen spectroscopy in the 6.8 μm range.

Резюме

Представен е дизайн на Cr:forsterite лазерна система от типа едночестотен управляващ осцилатор - усилвател на мощност, осигуряваща много по-висока

изходна енергия в сравнение с предишни доклади в литературата. Системата има четири усилващи степени с двупроходна конфигурация всеки, като по този начин позволява генерирането на изходна енергия от 24 mJ в спектралната област около 1262 nm. Доказано е, че представеният усилвател Cr:forsterite запазва високо качество на спектралните параметри и импулса, позволявайки лесно енергийно мащабиране. Тази лазерна система е обещаващ инструмент за пренастройваемо нелинейно преобразуване в средния инфрачервен спектрален диапазон и ще бъде ключов градивен елемент в система за мюон-водород спектроскопия с висока разделителна способност в диапазона 6,8 μm .

A5. Benocci R., Bonesini M., Gadedjisso-Tossou K.S., Cabrera H., Stoychev L.I., Rossella M., Baruzzo M., Consonni M., Suarez-Vargas J.J., "Laboratory tests for MIR light detection and transport with specialty optical fibres", *Journal of Instrumentation* 15 (04), C04030, 2020. Q1

Abstract

The FAMU (Fisica degli Atomi Muonici) experiment at the RIKEN RAL pulsed muon facility will measure the proton Zemach radius with high precision, thus contributing to the solution of the so-called "proton radius puzzle". The situation is now confused and new measurements will help reduce the discrepancy as measured with electrons or muons. To this aim, FAMU will make use of a high-intensity pulsed muon beam at RIKEN-RAL impinging on a cryogenic hydrogen target and a tunable Mid-infrared (MIR) laser emitting at about 6.78 μm , to measure the hyperfine (HFS) splitting of the 1S state of muonic hydrogen. The injection of light into the cryogenic target and its monitoring via dedicated MIR sensors is an asset for the experiment. A possible solution is via specialty MIR fibres based on hollow core waveguides or polycrystalline fibres. Two dedicated setups based on pulsed QCL lasers, from Alpes Laser, emitting around 6.78 μm have been used to study the fibre attenuation while the high energy laser specifically developed for the FAMU project has been used to study the damage threshold at high energies. The alignment of MIR laser radiation into an optical cavity presents criticalities due to geometrical constraints. Its control requires the use of small and sensitive detectors. The results obtained with a quantum IR sensor with an integrated circuit for signal processing are reported.

Резюме

Експериментът FAMU (Fisica degli Atomi Muonici), който ще се извърши в съоръжението за импулсни мюони в RIKEN RAL, ще измерва протонния радиус на Zemach с висока точност, като по този начин ще допринесе за решаването на така наречения „пъзел на протонния радиус“. Към момента ситуацията е спорна и новите измервания ще помогнат за намаляване на несъответствието, измерено с електрони и мюони, съответно. За тази цел FAMU ще използва високоинтензивен импулсен мюонен сноп в RIKEN-RAL, насочен към водород в мишена при криогенни температури, и пренастройваем лазер в средния инфрачервен диапазон (MIR), излъчващ около 6,78 μm , за измерване на

хиперфиното разцърване на 1S състоянието на мюон-водород. Инжектирането на светлина в криогенната цел и нейното наблюдение чрез специални MIR сензори е предимство за експеримента. Възможно решение за транспорта на светлината до целта е чрез специални MIR влакна, базирани на вълноводи с куха сърцевина или поликристални влакна. Две специални опитни установки, базирани на импулсни QCL лазери, от Alpes Laser, излъчващи около 6,78 μm , са използвани за изследване на поглъщането във влакната, докато високоенергийният лазер, специално разработен за проекта FAMU, е използван за изследване на прага на разрушение при високи енергии. Настройването на MIR лазерно лъчение в оптична система е сложно поради геометрични ограничения. Неговото управление изисква използването на малки и чувствителни детектори. Отчитат се резултатите, получени с квантов IR сензор с интегрална схема за обработка на сигнала.

A6. Stoychev L.I., Cabrera H., Suárez-Vargas J.J., Baruzzo M., Gadedjisso-Tossou K.S., Nikolov I.P., Sigalotti P., Demidovich A.A., Mocchiutti E., Pizzolotto C., Niemela J., Guido T., Danailov M.B., Vacchi A., “DFG-based mid-IR tunable source with 0.5 mJ energy and a 30 pm linewidth”, *Opt. Lett.* 45, 5526-5529 (2020), DOI: [10.1364/OL.405272](https://doi.org/10.1364/OL.405272). Q1

Abstract

We report on a laser system based on difference frequency generation (DFG) to produce tunable, narrow-linewidth (<30 pm), and comparatively high-energy mid-IR radiation in the 6.8 μm region. The system exploits a lithium thioindate (LiInS_2) nonlinear crystal and nanosecond pulses generated by single-frequency Nd:YAG and Cr:forsterite lasers at 1064 and 1262 nm, respectively. Two experimental configurations are used: in the first one, single-pass, the mid-IR energy achieved is 205 μJ . Additional increments, up to 540 μJ , are obtained by performing double-pass through the nonlinear crystal. This laser has been developed for high-resolution photon-hungry spectroscopy in the mid-IR.

Резюме

Докладваме лазерна система, базирана на генерация с изваждане на честоти (DFG), за да получаваме на пренастройваемо с тясна ширина на спектралната линия (<30 pm) и сравнително високоенергийно инфрачервено лъчение в областта 6,8 μm . Системата използва нелинеен кристал от литиев тиоидат (LiInS_2) и наносекундни импулси, генерирани от едночестотни Nd:YAG и Cr:форстерит лазери на 1064 и 1262 nm, съответно. Използват се две експериментални конфигурации: в първата, еднопроходна, постигнатата средна IR енергия е 205 μJ . Допълнително увеличение, до 540 μJ , се получава чрез използване на двойно преминаване през нелинейния кристал. Този лазер е разработен за фотонна спектроскопия с висока разделителна способност в средния IR.

В. Приноси в научни публикации извън хабилитационния труд:

Публикации извън хабилитационния труд, статии и пълни доклади на конференции (класификацията по квартали е според SCImago):

B1. Astadjov D.N., Stoychev L.I., Sabotinov N.V., “CuBr Laser Pulse Shaping by MOPA System”, Proceedings International Symposium “Laser Technologies and Lasers” LTL 2005, pp 111-114

Abstract

Laser pulse shaping for quality micromachining is under worldwide research with different types of lasers. Our preliminary experiments concerning CuBr laser temporal pulse shaping by MOPA system demonstrated the feasibility and relevance of this method.

Резюме

Промяната на лазерни импулси за качествена микромеханична обработка е предмет на световни изследвания с различни видове лазери. Нашите предварителни експерименти относно промяната на формата на времевите импулси на CuBr лазер чрез MOPA система показват приложимостта и уместността на този метод.

B2. Astadjov D.N., Stoychev L.I., Dixit S.K., Nakhe S.V., Sabotinov N.V., “High-brightness CuBr MOPA laser with diffraction-limited throughout-pulse emission” IEEE Journal of Quantum Electronics 41 (8), 1097-1101, 2005, DOI: [10.1109/JQE.2005.850701](https://doi.org/10.1109/JQE.2005.850701), Q1

Abstract

CuBr master oscillator-power amplifier (MOPA) laser system fitted with a generalized diffraction filtered resonator (GDFR) is reported to produce high-quality beam of throughout-pulse diffraction-limited laser emission at the repetition rate of 19 kHz. The comparison with typical (stable and unstable) resonator configurations for CuBr lasers has featured out its high brightness accompanied by a very low beam divergence permanent within laser pulse. This intrinsic characteristic of GDFR-MOPA laser radiation makes it a perfect light source for fine laser applications.

Резюме

Съобщаваме за лазерна система от типа управляващ осцилатор-усилвател на мощност CuBr (MOPA), снабдена с обобщен дифракционно филтриращ резонатор (GDFR), произвеждаща лазерно излъчване с високо качество на снопа, дифракционно-ограничено през целия импулс, при честота на повторение от 19 kHz. Сравнението с типичните (стабилни и нестабилни) резонаторни конфигурации за CuBr лазери показва неговата висока яркост, придружена от много ниска разходимост на снопа, постоянна в лазерния импулс. Тази присъща характеристика на GDFR-MOPA лазерното излъчване го прави перфектен източник на светлина за фини лазерни приложения.

B3. Astadjov D.N., Stoychev L.I., Sabotinov N.V., “M²-factor for MOPA CuBr laser system”, SPIE Proceedings Vol. 6604, 14th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications; 66040Z (2007) DOI: 10.1117/12.726991. Без IF, със SJR

Abstract

M²-factor of the master-oscillator power-amplifier (MOPA) CuBr laser emission compliant with ISO 11146 is studied for first time. M² is an invariant that gives how many times diffraction-limited is a laser beam compared to a perfect Gaussian TEM₀₀ beam. Statistical parameters of the near and far fields of MOPA laser radiation are measured by a beam analyzing technique. Two patterns of the MOPA laser emission are examined: annular that is typical for lasers without addition of hydrogen, and of filled-center (top-hat and Gaussian-like) with addition of hydrogen. 2D intensity profile changes of the near and far fields are recorded as functions of delay time of laser excitation current pulses. The MOPA gain curve is found and the influence of gain on the input signal (from MO into PA) due to the absorption/amplification in PA on the field profiles is shown. The change of position and waveform of laser pulses is given too. For annular radiation M² range is from 13-14 (small delays) to 5-6 (large delays) and for filled-center radiation M² is 6-7 (small delays) and at the end of gain curve is as much as 4.

Резюме

За първи път се изследва M²-факторът на CuBr лазерно излъчване на система управляващ осцилатор - усилвател на мощност (MOPA), съвместим с ISO 11146. M² е инвариант, който дава колко пъти дифракционно ограничен е лазерен сноп в сравнение с перфектния гаусов сноп TEM₀₀. Статистическите параметри на близкото и далечно полета на MOPA лазерното лъчение се измерват чрез техника за анализ на лъча. Разглеждат се два модела на лазерното излъчване на MOPA: пръстеновидно, което е типично за лазери без добавяне на водород, и със запълнен център (топхат и Гаусо-подобен) с добавяне на водород. 2D профил на интензитета на промените на близкото и далечното поле се записват като функции на времето закъснение на токовите импулси на лазерно възбуждане. Представена е кривата на усилването на MOPA и е показано влиянието на усилването на входния сигнал (от MO в PA) поради абсорбцията/усилването в PA върху профилите на полето. Дадена е и промяната на позицията и формата на лазерните импулси. За пръстеновидно излъчване M² диапазонът е от 13-14 (малки закъснения) до 5-6 (големи закъснения), а за излъчване със запълнен център M² е 6-7 (малки закъснения), а в края на кривата на усилване е до 4.

B4. Ivanov O., Vaseashta A., L Stoychev L.I., “Rapid, contactless and non-destructive testing of chemical composition of samples”, Functionalized Nanoscale Materials, Devices and Systems, pp331-334, 2008, Part of the [NATO Science for Peace](#)

[and Security Series B: Physics and Biophysics](#) book series (NAPSB), DOI: 10.1007/978-1-4020-8903-9_26. Q4

Abstract

Our results demonstrate that a new effect can be induced in each solid in a wide spectral range of electromagnetic irradiation. In the present manuscript we prove experimentally that one of the possible applications of this effect is for an express contactless control of the chemical composition of a series of samples, in this case, coins. The method has wide applicability ranging from defense and homeland security to several applications requiring rapid and nondestructive identification of chemical composition.

Резюме

Нашите резултати показват, че във всяко твърдо вещество може да се предизвика нов ефект в широк спектрален диапазон на електромагнитно облъчване. В настоящото съобщение доказваме експериментално, че едно от възможните приложения на този ефект е за експресен безконтактен контрол на химичния състав на серия от проби, в случая монети. Методът има широка приложимост, варираща от отбрана и вътрешна сигурност до приложения, изискващи бърза и неразрушителна идентификация на химическия състав.

B5. Vacchi A., Stoychev L.I., Dzagli M.M., Gadedjisso-Tossou K., Niemela J., “Characterization of a laser source suitable for a muonic-hydrogen experiment: a DFB-QCL emitting at 6,8 μm ”, 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology TST 2012, ISBN 978-3-9815022-1-3

Abstract

Quantum Cascade Lasers (QCLs) are characterized as a potential source for the measurement of the hyperfine splitting of the muonic-hydrogen atom. For the needs of the experiment a pulsed laser source with tunable emission in the 6,8 μm spectral region is required.

Резюме

Квантово-каскадните лазери (QCL) се характеризират като потенциален източник за измерване на свръхфиното разделяне на мюон-водородния атом. За нуждите на експеримента е необходим импулсен лазерен източник с пренастройваема емисия в спектралния диапазон 6,8 μm .

B6. Adamczak A., Bakalov D., Stoychev L.I., Vacchi A., “Hyperfine spectroscopy of muonic hydrogen and the PSI Lamb shift experiment”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms Volume 281, pp 72-76, 2012, DOI: [10.1016/j.nimb.2012.04.001](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.04.001). Q2

Abstract

The recent Lamb shift experiment at PSI and the discussions about the incompatibility of the proton radii extracted using different methods have revived the interest in the measurement of the hyperfine splitting of the ground state in muonic hydrogen. We summarize the existing experimental ideas for this measurement and analyze quantitatively the main methodological difficulties, expected to be related to the required power of the IR laser source, the signal-to-noise ratio and other systematic factors. An elaborate model is developed to estimate the statistical uncertainty of the experimental value of the hyperfine splitting.

Резюме

Неотдавнашният експеримент за отместването на Ламб в PSI и дискусиите за несъвместимостта на протонните радиуси, извлечени с помощта на различни методи, съживиха интереса към измерването на свръхфиното разделяне на основното състояние в мюон-водород. Обобщаваме съществуващите експериментални идеи за това измерване и анализираме количествено основните методологични трудности, които се очаква да бъдат свързани с необходимата мощност на IR лазерния източник, съотношението сигнал/шум и други систематични фактори. Разработен е сложен модел за оценка на статистическата грешка на експерименталната стойност на свръхфиното разделяне.

B7. Stoychev L.I., Danailov M.B., Nikolov I.P., Demidovich A.A., Bakalov D., Vacchi A., “Mid-IR Laser System for Muonic-Hydrogen Spectroscopy”, *Advanced Solid State Lasers*, ATh2A. 4, DOI: [10.1364/ASSL.2015.ATh2A.4](https://doi.org/10.1364/ASSL.2015.ATh2A.4), 2015. Без IF, със SJR

Abstract

A laser system based on difference frequency generation in non-oxide nonlinear crystals (LiInS₂) emitting narrow linewidth mid-IR radiation at $\sim 6.8 \mu\text{m}$ is presented. The system is developed as prototype of the laser system needed for the purposes of the muonic-hydrogen spectroscopy. The generated radiation has a narrow linewidth < 1.5 GHz, reaches an output energy more than $100 \mu\text{J}$, with 10 ns long pulses at 50 Hz frequency repetition rate and is tunable in the spectral range 6695 – 6870 nm. These results prove the suitability of such an approach for building a laser system with output parameters matching the requirements of the muonic-hydrogen experiment.

Резюме

Представена е лазерна система, базирана на генерация с изваждане на честоти в неоксидни нелинейни кристали (LiInS₂), излъчващи лъчение в средния инфрачервен диапазон с тясна ширина на линията при $\sim 6,8 \mu\text{m}$. Системата е разработена като прототип на лазерната система, необходима за целите на мюон-водородна спектроскопия. Генерираното лъчение има тясна ширина на линията $< 1,5$ GHz, достига изходна енергия над $100 \mu\text{J}$, с дължина на импулса 10 ns, при честота на повторение 50 Hz и е пренастройваемо в спектралния диапазон 6695 – 6870 nm. Тези резултати доказват пригодността на подобен подход за изграждане на лазерна система с изходни параметри, отговарящи на изискванията на експеримента с мюон-водород.

B8. Adamczak A., Baccolo G., Bakalov D., Baldazzi G., Bertoni R., Bonesini M., Bonvicini V., Campana R., Carbone R., Cervi T., Chignoli F., Clemenza M., Colace L., Curioni A., Danailov M., Danev P., D'Antone I., De Bari A., De Vecchi C., De Vincenzi M., Furini M., Fuschino F., Gadedjisso-Tossou K.S., Guffanti D., Iaciovano A., Ishida K., Iugovaz D., Labanti C., Maggi V., Margotti A., Marisaldi M., Mazza R., Meneghini S., Menegolli A., Mocchiutti E., Moretti M., Morgante G., Nardò R., Nastasi M., Niemela J., Previtali E., Ramponi R., Rachevski A., Rignanese L.P., Rossella M., Rossi P.L., Somma F., Stoilov M., Stoychev L.I., Tomaselli A., Tortora L., Vacchi A., Vallazza E., Zampa G., Zuffa M., "Steps towards the hyperfine splitting measurement of the muonic hydrogen ground state: pulsed muon beam and detection system characterization", *Journal of Instrumentation* 11 (05), P05007, 2016, DOI: [10.1088/1748-0221/11/05/P05007](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/05/P05007). Q1

Abstract

The high precision measurement of the hyperfine splitting of the muonic-hydrogen atom ground state with pulsed and intense muon beam requires careful technological choices both in the construction of a gas target and of the detectors. In June 2014, the pressurized gas target of the FAMU experiment was exposed to the low energy pulsed muon beam at the RIKEN RAL muon facility. The objectives of the test were the characterization of the target, the hodoscope and the X-ray detectors.

The apparatus consisted of a beam hodoscope and X-rays detectors made with high purity Germanium and Lanthanum Bromide crystals. In this paper the experimental setup is described and the results of the detector characterization are presented.

Резюме

Високоточното измерване на свръхфиното разцепване на основното състояние на мюон-водородния атом с импулсен и интензивен мюонен сноп изисква внимателен технологичен избор както при конструирането на газова мишена, така и на детекторите. През юни 2014 г. мишената с газ под налягане на експеримента FAMU беше изложена на нискоенергиен импулсен мюонен лъч в мюонното съоръжение RIKEN RAL. Целите на теста бяха характеризиране на мишената, ходоскопа и рентгеновите детектори.

Апаратът се състоеше от ходоскоп за снопа и детектори за рентгенови лъчи, направени с кристали от германий и лантанов бромид с висока чистота. В тази статия е описана експерименталната установка и са представени резултатите от охарактеризирането на детекторите.

B9. Mocchiutti E., Bonvicini V., Carbone R., Danailov M., Furlanetto E., Gadedjisso-Tossou K.S., Guffanti D., Pizzolotto C., Rachevski A., Stoychev L., Vallazza E., Zampa G., Niemela J., Ishida K., Adamczak A., Baccolo G., Benocci R., Bertoni R., Bonesini M., Chignoli F., Clemenza M., Curioni A., Maggi V., Mazza R., Moretti M., Nastasi M., Previtali E., Bakalov D., Danev P., Stoilov M., Baldazzi G., Campana G., D'Antone I., Furini M., Fuschino F., Labanti C., Margotti A., Meneghini

S., Morgante G., Pio Rignanese L., Luca Rossi P., Zuffa M., Cervi T., De Bari A., Menegolli A., De Vecchi C., Nardò R., Rossella M., Tomaselli A., Colace L., De Vincenzi M., Iaciofano A., Somma F., Tortora L., Ramponi R., Vacchi A., “First FAMU observation of muon transfer from μp atoms to higher-Z elements”, Journal of Instrumentation 13 (02), P02019, 2018, DOI: [10.1088/1748-0221/13/02/P02019](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/02/P02019). Q1

Abstract

The FAMU experiment aims to accurately measure the hyperfine splitting of the ground state of the muonic hydrogen atom. A measurement of the transfer rate of muons from hydrogen to heavier gases is necessary for this purpose. In June 2014, within a preliminary experiment, a pressurized gas-target was exposed to the pulsed low-energy muon beam at the RIKEN RAL muon facility (Rutherford Appleton Laboratory, U.K.). The main goal of the test was the characterization of both the noise induced by the pulsed beam and the X-ray detectors. The apparatus, to some extent rudimentary, has served admirably to this task. Technical results have been published that prove the validity of the choices made and pave the way for the next steps. This paper presents the results of physical relevance of measurements of the muon transfer rate to carbon dioxide, oxygen, and argon from non-thermalized excited μp atoms. The analysis methodology and the approach to the systematic errors are useful for the subsequent study of the transfer rate as function of the kinetic energy of the μp currently under way.

Резюме

Експериментът FAMU има за цел да измери точно свръхфиното разделяне на основното състояние на мюон-водородния атом. За тази цел е необходимо измерване на скоростта на пренос на мюони от водород към по-тежки газове. През юни 2014 г., в рамките на предварителен експеримент, газова мишена под налягане беше изложена на импулсен нискоенергиен мюонен лъч в мюонното съоръжение RIKEN RAL (лаборатория Rutherford Appleton, Великобритания). Основната цел на теста беше охарактеризирането както на шума, предизвикан от импулсния сноп, така и от рентгеновите детектори. Апаратът, до известна степен първичен, се справи чудесно с тази задача. Публикувани са технически резултати, които доказват валидността на направените избори и проправят пътя за следващите стъпки. Тази статия представя резултатите от физическата значимост на измерванията на скоростта на трансфер на мюон към въглероден диоксид, кислород и аргон от нетермализирани възбудени μp атоми. Методологията на анализа и подходът към систематичните грешки са полезни за последващо изследване на скоростта на пренос като функция на кинетичната енергия на μp в момента.

B10. Mocchiutti E., Bonvicini V., Danailov M., Furlanetto E., Gadedjisso-Tossou K.S., Guffaanti D., Pizzolotto C., Rachevski A., Stoychev L., Vallazza E., Zampa G., Niemela J., Ishida K., Adamczak A., Baccolo G., Benocci R., Bertoni R., Bonesini M., Chignoli F., Clemenza M., Curioni A., Maggi V., Mazza R., Moretti M., Nastasi M., Previtali E., Bakalov D., Danev P., Stoilov M., Baldazzi G., Campana R., D'Antone I., Furini M., Fuschino F., Labanti C., Margotti A., Meneghini S., Morgante G., Rignanese

L.P., Rossi P.L., Zuffa M., Cervi T., De Bari A., Menegolli A., De Vecchi C., Nardò R., Rossella M., Tomaselli A., Colace L., De Vincenzi M., Iacifano A., Somma F., Tortora L., Ramponi R., Vacchi A., “FAMU: study of the energy dependent transfer rate $\Lambda_{\mu p \rightarrow \mu O}$ ”, IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Ser. **1138** 012017, 2018, DOI: [10.1088/1742-6596/1138/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1138/1/012017). Q4

Abstract

The main goal of the FAMU experiment is the measurement of the hyperfine splitting (hfs) in the 1S state of muonic hydrogen $\Delta E_{\text{hfs}}(\mu^- p)1S$. The physical process behind this experiment is the following: μp are formed in a mixture of hydrogen and a higher-Z gas. When absorbing a photon at resonance-energy $\Delta E_{\text{hfs}} \approx 0.182$ eV, in subsequent collisions with the surrounding H_2 molecules, the μp is quickly de-excited and accelerated by $\sim 2/3$ of the excitation energy. The observable is the time distribution of the K-lines X-rays emitted from the μZ formed by muon transfer $(\mu p) + Z \rightarrow (\mu Z)^* + p$, a reaction whose rate depends on the μp kinetic energy. The maximal response, to the tuned laser wavelength, of the time distribution of X-ray from K-lines of the $(\mu Z)^*$ cascade indicate the resonance. During the preparatory phase of the FAMU experiment, several measurements have been performed both to validate the methodology and to prepare the best configuration of target and detectors for the spectroscopic measurement. We present here the crucial study of the energy dependence of the transfer rate from muonic hydrogen to oxygen ($\Lambda_{\mu p \rightarrow \mu O}$), precisely measured for the first time.

Резюме

Основната цел на експеримента FAMU е измерването на свръхфиното разцепване (hfs) в 1S състояние на мюон-водород $\Delta E_{\text{hfs}}(\mu^- p)1S$. Физическият процес зад този експеримент е следният: μp се образуват в смес от водород и газ с по-висок Z. При поглъщане на фотон при резонансна енергия $\Delta E_{\text{hfs}} \approx 0.182$ eV, при последващи сблъсъци с околните H_2 молекули, μp бързо се девъзбужда и се ускорява с $\sim 2/3$ от енергията на възбуждане. Наблюдаваното е разпределението във времето на рентгеновите лъчи на K-линии, излъчвани от μZ , образуван от мюонен трансфер $(\mu p) + Z \rightarrow (\mu Z)^* + p$, реакция, чиято скорост зависи от кинетичната енергия на μp . Максималният отговор на настроената дължина на вълната на лазера на разпределението по време на рентгеновите лъчи от K-линиите на $(\mu Z)^*$ каскадата показва резонанса. По време на подготвителната фаза на експеримента FAMU бяха извършени няколко измервания както за валидиране на методологията, така и за подготовка на най-добрата конфигурация на мишената и детекторите за спектроскопското измерване. Тук представяме решаващо изследване на енергийната зависимост на скоростта на пренос от мюон-водород към кислород ($\Lambda_{\mu p \rightarrow \mu O}$), прецизно измерена за първи път.

B11. Adamczak A., Baccolo G., Banfi S., Bakalov D., Baldazzi G., Benocci R., Bertoni R., Bonisini M., Bonvicini V., Chignoli F., Clemenza M., Colace L., Danailov M., Danev P., De Bari A., De Vecchi C., De Vincenzi M., Furlanetto E., Fuschino F.,

Gadedjisso-Tossou K.S., Guffanti D., Iacofano A., Ishida K., Labanti C., Maggi V., Margotti A., Mazza R., Menegolli A., Mocchiutti E., Moretti M., Morgante G., Nastasi M., Niemela J., Pizzolotto C., Previtali E., Pullia A., Ramponi R., Rachevski A., Rignanese L.P., Rossella M., Rossi N., Sarkar R., Stoilov M., Stoychev ., Tomaselli A., Tortora L., Vallazza E., Zampa G., Vacchi A., “The FAMU experiment at RIKEN-RAL to study the muon transfer rate from hydrogen to other gases”, Journal of Instrumentation 13 (12), P12033, 2018, DOI: [10.1088/1748-0221/13/12/P12033](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/12/P12033), Q1

Abstract

The aim of the FAMU (Fisica degli Atomii Muonici) experiment is to realize the first measurement of the hyperfine splitting (hfs) in the 1S state of muonic hydrogen $\Delta E_{1S}^{\text{hfs}}$, by using the RIKEN-RAL intense pulsed muon beam and a high-energy mid-infrared tunable laser. This requires a detailed study of the muon transfer mechanism at different temperatures and hence at different epithermal states of the muonic system. The experimental setup involves a cryogenic pressurized gas target and a detection system based on silicon photomultipliers-fiber beam hodoscopes and high purity Germanium detectors and Cerium doped Lanthanum Bromide crystals, for X-rays detection at energies around 100 keV.

Simulation, construction and detector performances of the FAMU apparatus at RAL are reported in this paper.

Резюме

Целта на експеримента FAMU (Fisica degli Atomii Muonici) е да се реализира първото измерване на свръхфиното разцепване (hfs) в 1S състояние на муонния водород $\Delta E_{1S}^{\text{hfs}}$, чрез използване на интензивен импулсен муонон сноп в RIKEN-RAL и високоенергиен пренастройваем лазер в средния инфрачервен диапазон. Това изисква подробно изследване на механизма на пренос на муони при различни температури и следователно при различни епитермични състояния на муонната система. Експерименталната установка включва криогенна газова мишена под налягане и система за регистрация, базирана на силициеви фотоумножители - ходоскопи с влакна и германиеви детектори с висока чистота и кристали от лантаниев бромид, легирани с церий, за откриване на рентгенови лъчи при енергии около 100 keV.

Симулация, конструкция и характеристики на детекторите на FAMU оборудване в RAL са докладвани в този документ.

B12. Pizzolotto C., Adamczak A., Bakalov D., Baldazzi G., Baruzzo M., Benocci R., Bertoni R., Bonesini M., Bonvicini V., Cabrera H., Cirrincione D., Citossi M., Chignoli F., Clemenza M., Colace L., Danailov M., Danev P., de Bari A., De Vecchi C., de Vincenzi M., Fasci E., Furlanetto E., Fuschino F., Gadedjisso-Tossou K.S., Gianfrani L., Guffanti D., Hillier A.D., Ishida K., King P.J.C., Labanti C., Maggi V., Mazza R., Menegolli A., Mocchiutti E., Moretti L., Morgante G., Niemela J., Patrizi B., Pirri A., Pullia A., Ramponi R., Rignanese L.P., Roman H.E., Rossella M., Sarkar R., Sbrizzi A., Stoilov M., Stoychev L., Suárez-Vargas J.J., Toci G., Tortora L., Vallazza E., Vannini M., Xiao C., Zampa G., Vacchi A., “The FAMU experiment: muonic hydrogen

high precision spectroscopy studies”, Eur. Phys. J. A **56**, 185, 2020, DOI: [10.1140/epja/s10050-020-00195-9](https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00195-9). Q1

Abstract

The FAMU experiment aims to measure for the first time the hyperfine splitting of the muonic hydrogen ground state. From this measurement the proton Zemach radius can be derived and this will shed light on the determination of the proton charge radius. In this paper, we describe the scientific goal, the method and the detailed preparatory work. This includes the outcome of preliminary measurements, subsequent refined simulations and the evaluation of the expected results. The experimental setup being built for the measurement of the hyperfine splitting to be performed at the RAL laboratory muon facility is also described.

Резюме

Експериментът FAMU има за цел да измери за първи път свръхфиното разделяне на основното състояние на мюон-водород. От това измерване може да бъде извлечен радиусът на протона на Zemach и това ще хвърли светлина върху определянето на радиуса на протона. В тази статия ние описваме научната цел, метода и подробната подготвителна работа. Това включва резултата от предварителните измервания, последващите усъвършенствани симулации и оценката на очакваните резултати. Описана е също експерименталната инсталация, която се изгражда за измерване на хиперфиното разделяне, което трябва да се извърши в лабораторното мюонно съоръжение на RAL.

B13. Gadedjisso-Tossou K.S., Stoychev L.I., Mohou M.A., Cabrera H., Niemela J., Danailov M.B., Vacchi A., “Cavity Ring-Down Spectroscopy for Molecular Trace Gas Detection Using A Pulsed DFB QCL Emitting at 6.8 μm ”, Photonics 7 (3), 74, 2020, DOI: [10.3390/photonics7030074](https://doi.org/10.3390/photonics7030074). Q2

Abstract

A trace gas sensor based on pulsed cavity ring-down spectroscopy (CRDS) was developed for measurement of the ν_4 fundamental vibrational band of ammonia (NH_3) centered at 1468.898 cm^{-1} . A pulsed distributed feedback quantum cascade laser (DFB-QCL) operating at 6.8 μm (1470.58 cm^{-1}) quite well covered the absorption band of the ammonia and strong fundamental vibrational absorption bands of different molecular gases in this unexplored region. The cavity was partially evacuated down to 0.4 Atm by a turbo-molecular pump to reduce the partial interference between the NH_3 spectra and water near the absorption peak of ammonia. A sensitivity of nine parts per billion was reached for a measurement time of 120 s as well as an optical path length of 226 m. The device demonstrated high spectral performance and versatility due to its wide tuning range, narrow linewidth, and comparatively high-energy mid-IR radiation in the relatively unexplored 6.8 μm region, which is very important for high-resolution spectroscopy of a variety of gases.

Резюме

Сензор за следи от газ, базиран на спектроскопия с импулсна cavity ring-down spectroscopy (CRDS) е разработен за измерване на основната вибрационна ивица ν_4 на амоняка (NH_3) с център $1468,898 \text{ cm}^{-1}$. Квантово каскаден лазер от типа distributed feedback (DFB-QCL), работещ при $6,8 \text{ }\mu\text{m}$ ($1470,58 \text{ cm}^{-1}$), покрива доста добре абсорбционната ивица на амоняка и силните основни вибрационни абсорбционни ивизи на различни молекулни газове в този неизследван регион. Кухината беше частично евакуирана до $0,4 \text{ Atm}$ от турбо-молекулярна помпа, за да се намали частичната интерференция между NH_3 спектрите и водата близо до пика на абсорбция на амоняка. Чувствителност от девет части на милиард беше достигната за време на измерване от 120 s , както и дължина на оптичния път от 226 m . Устройството демонстрира висока спектрална производителност и гъвкавост поради широкия си диапазон на настройка, тясна ширина на линията и сравнително високоенергийно лъчение инфрачервено в относително неизследваната област от $6,8 \text{ }\mu\text{m}$, което е много важно за спектроскопия с висока разделителна способност на различни газове.

B14. Mocchiutti E., Adamczak A., Bakalov D., Baldazzi G., Benocci R., Bertoni R., Bonesini M., Bonvicini V., Cabrera Morales H., Chignoli F., Clemenza M., Colace L., Danailov M., Danev P., de Bari A., De Vecchi C., De Vincenzi M., Furlanetto E., Fuschino F., Gadedjisso-Tossou K.S., Guffanti D., Ishida K., Labanti C., Maggi V., Mazza R., Menegolli A., Morgante G., Nastasi M., Niemela J., Pizzolotto C., Pullia A., Ramponi R., Rignanese L.P., Rossella M., Rossi N., Stoilov M., Stoychev L., Tortora L., Vallazza E., Zampa G., Vacchi A., “First measurement of the temperature dependence of muon transfer rate from muonic hydrogen atoms to oxygen”, Physics Letters A 384 (26), 126667, DOI: [10.1016/j.physleta.2020.126667](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126667). Q2

Abstract

We report the first measurement of the temperature dependence of muon transfer rate from muonic hydrogen atoms to oxygen between 100 and 300K. Data were obtained from the X-ray spectra of delayed events in a gaseous target, made of a H_2/O_2 mixture, exposed to a muon beam. This work sets constraints on theoretical models of muon transfer and is of fundamental importance for the measurement of the hyperfine splitting of muonic hydrogen ground state as proposed by the FAMU collaboration.

Резюме

Докладваме първото измерване на температурната зависимост на скоростта на пренос на мюон от мюон-водородни атоми към кислород между 100 и 300 K. Данните са получени от рентгеновите спектри на забавени събития в газова мишена, направена от смес H_2/O_2 , изложена на мюонен сноп. Тази работа поставя ограничения върху теоретичните модели на пренос на мюони и е от фундаментално значение за измерването на свръхфиното разделяне на основното състояние на мюон-водород, предложено от колектива на FAMU.

B15. Pizzolotto C., Sbrizzi A., Adamczak A., Bakalov D., Baldazzi G., Baruzzo M., Benocci R., Bertoni R., Bonesini M., Cabrera H., Cirrincione D., Clemenza M., Colace L., Danailov M., Danev P., de Bari A., De Vecchi C., De Vincenzi M., Fasci E., Fuschino F., Gadedjisso-Tossou K.S., Gianfrani L., Ishida K., Labanti C., Maggi V., Mazza R., Menegolli A., Mocchiutti E., Monzani S., Moretti L., Morgante G., Niemela J., Pullia A., Ramponi R., Rignanese L.P., Rossella M., Stoilov M., Stoychev L., Suarez-Vargas J.J., Tortora L., Vallazza E., Vacchi A., “Measurement of the muon transfer rate from muonic hydrogen to oxygen in the range 70-336 K”, Physics Letters A 403, 127401, 2021, DOI: [10.1016/j.physleta.2021.127401](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127401)

Abstract

The first measurement of the temperature dependence of the muon transfer rate from muonic hydrogen to oxygen was performed by the FAMU collaboration in 2016. The results provide evidence that the transfer rate rises with the temperature in the range 104-300 K. This paper presents the results of the experiment done in 2018 to extend the measurements towards lower (70 K) and higher (336 K) temperatures. The 2018 results confirm the temperature dependence of Λ_{pO} observed in 2016 and sets firm ground for comparison with the theoretical predictions.

Резюме

Първото измерване на температурната зависимост на скоростта на пренос на мюон от мюон-водород към кислород е извършено от колектива FAMU през 2016 г. Резултатите дават доказателства, че скоростта на трансфер се повишава с температурата в диапазона 104-300 K. Тази статия представя резултатите от експеримента, извършен през 2018 г., за разширяване на измерванията към по-ниски (70 K) и по-високи (336 K) температури. Резултатите от 2018 г. потвърждават температурната зависимост на Λ_{pO} , наблюдавана през 2016 г. и поставят твърда основа за сравнение с теоретичните прогнози.