

UDC 533.9.004.14; 621.039.6

<sup>1</sup>S. Sheludiakov\*, <sup>1</sup>J. Ahokas, <sup>1</sup>J. Järvinen, <sup>1,2</sup>D. Zvezdov,  
<sup>1</sup>O. Vainio, <sup>1</sup>L. Lehtonen, <sup>1</sup>S. Vasiliev, <sup>3</sup>S. Mao, <sup>3</sup>V.V. Khmelenko,  
<sup>3</sup>D.M. Lee

<sup>1</sup>Wihuri Physical Laboratory, Department of Physics and Astronomy,  
 University of Turku, 20014, Finland

<sup>2</sup>Kazan Federal University, 420008, 18 Kremlyovskaya St, Kazan, Russia

<sup>3</sup>Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station, TX, 77843, USA

\*E-mail: seshel@utu.fi

### Magnetic resonance study of atomic hydrogen stabilized at high densities in solid H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> matrices

Hydrogen and deuterium solids at low temperatures represent a special class of quantum crystals, where due to the large zero point oscillations and light mass, the effects of quantum tunnelling play important role. Behaviour of atomic impurities in these crystals attracts special attention due to possibility of reaching collective quantum phenomena related with Bose-Einstein Condensation (BEC) or so-called supersolid behaviour. This may happen at high enough densities of atomic hydrogen.

**Key words:** atomic hydrogen, quantum crystals, quantum tunneling, magnetic resonance.

С. Шелюдяков, Д. Ахокас, Д. Джарвинен, Д. Звездов,  
 О. Вайнио, Л. Лехтонен, С. Васильев, С. Мао, В.В. Хмеленко, Д.М. Ли

### Магнитно-резонансное исследование атомарного водорода стабилизированного при высоких плотностях в твердых матрицах H<sub>2</sub> и D<sub>2</sub>

Водород и дейтерий в твердом состоянии при низких температурах представляют особый класс квантовых кристаллов, в которых, благодаря большим нулевым колебаниям и малой массе, эффект квантового туннелирования играет важную роль. Мы обнаружили, что квантовые изотопические реакции обмена  $D+H_2=H+HD$  и  $D+HD=H+D_2$  проходят с достаточно высокими скоростями при температурах ниже 1 К и значительно увеличивают концентрацию атомарного водорода в пленках смеси H;D; H<sub>2</sub>;D<sub>2</sub>. Мы полагаем, что взаимодействие электронов атома водорода с магнитными моментами орто-дейтериевых молекул существенно улучшает возможности существования запрещенных состояний.

**Ключевые слова:** атомарный водород, квантовые кристаллы, квантовое туннелирование, магнитный резонанс.

С. Шелюдяков, Д. Ахокас, Д. Джарвинен, Д. Звездов,  
 О. Вайнио, Л. Лехтонен, С. Васильев, С. Мао, В.В. Хмеленко, Д.М. Ли

### Тұрақтандырылған H<sub>2</sub> және D<sub>2</sub> қатты матрицаларында жоғары тығыздық кезінде атомдық сутегінің магниттік-резонансты зерттеу

Қатты күйдегі сутегі мен дейтерий төмен температура кезінде нөлдік тербелістің және кіші массасының арқасында кванттық туннельдік эффект маңызды болып табылатын кванттық кристалдар класы болып табылады. Біз  $D+H_2=H+HD$  және  $D+HD=H+D_2$  кванттық изотоптық алмасу реакциялары 1 К төмен температурада айтарлықтай жоғары жылдамдықпен өтетінін және H;D; H<sub>2</sub>;D<sub>2</sub> қоспасының қабықшасында атомдық сутегінің концентрациясының артатынын анықтадық. Біз сутегі атомының электрондарының орто-дейтерийдің магниттік моментімен өзара әрекеттесуі тыйым салынған жағдайлардың болу мүмкіндігін айтарлықтай жақсартады деп болжаймыз.

**Түйін сөздер:** атомдық сутегі, кванттық кристалдар, кванттық туннельдеу, магниттік резонанс.

Hydrogen and deuterium solids at low temperatures represent a special class of quantum crystals, where due to the large zero point oscillations and light mass, the effects of quantum tunnelling play important role. Behaviour of atomic impurities in these crystals attracts special attention due to possibility of reaching collective quantum phenomena related with Bose-Einstein Condensation (BEC) or so-called supersolid behaviour. This may happen at high enough densities of atomic hydrogen. In our previous work we succeeded in reaching record high densities of atoms  $4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [1]. This was done by implementing a novel method of in-situ dissociation of H<sub>2</sub> or D<sub>2</sub> molecules by low temperature (2 and D<sub>2</sub> matrices below 1K

Samples of H and/or D in solid H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> crystals were created in two stages: 1) we deposited a thin film of solid molecular para-H<sub>2</sub> (ortho-D<sub>2</sub>) onto a cold (

We found out that quantum isotopic exchange reactions  $\text{D} + \text{H}_2 = \text{H} + \text{HD}$  and  $\text{D} + \text{HD} = \text{H} + \text{D}_2$  go with high enough rate at temperatures below 1K and

effectively increase the concentration of atomic hydrogen in H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> mixture films. Efficient dynamic nuclear polarization (DNP) of H in D<sub>2</sub> matrices was created via both Overhauser and solid effects. We suggest that interaction of electrons of the H atoms with magnetic moments of ortho-D<sub>2</sub> molecules greatly enhances probabilities of forbidden transitions. The presence of D<sub>2</sub> molecules in a close neighbourhood of H and atoms was supported by observation of the holes in both ESR spectra of H and D atoms during pumping the position of the satellite lines which appear due to simultaneous spin flips of the electron of the atom and the deuteron spin on a neighbouring D<sub>2</sub> molecule. In addition, pumping the center of the H spectrum created negative DNP. All attempts to observe DNP via the solid effect and pumping the center of the spectrum in pure H<sub>2</sub> were unsuccessful. We discuss possible explanations of this effect being due to the nuclear polarization transfer between H and D, or strong exchange effects between clusters of H atoms.

#### References

- 1 J. Ahokas, O. Vainio, S. Novotny, V. V. Khmelenko, D. M. Lee and S. Vasiliev, Phys. Rev. B, vol. 81, 104516, (2010)
- 2 S. Sheludiakov, J. Ahokas, O. Vainio, J. Järvinen, D. Zvezdov, S. Vasiliev, V. V. Khmelenko, S. Mao, and D. M. Lee, Rev. Sci. Instrum. 85, 053902, (2014).