

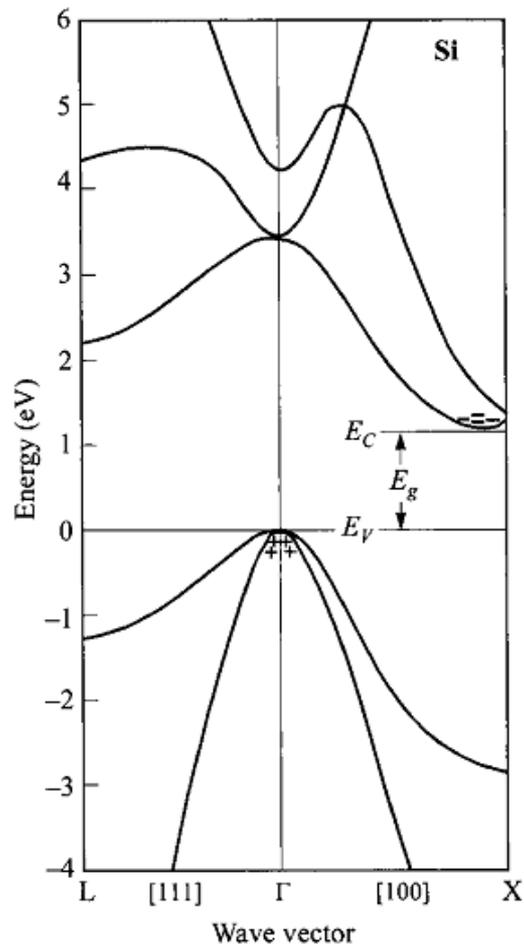
# Экситонные состояния в целочисленных и дробных Холловских диэлектриках



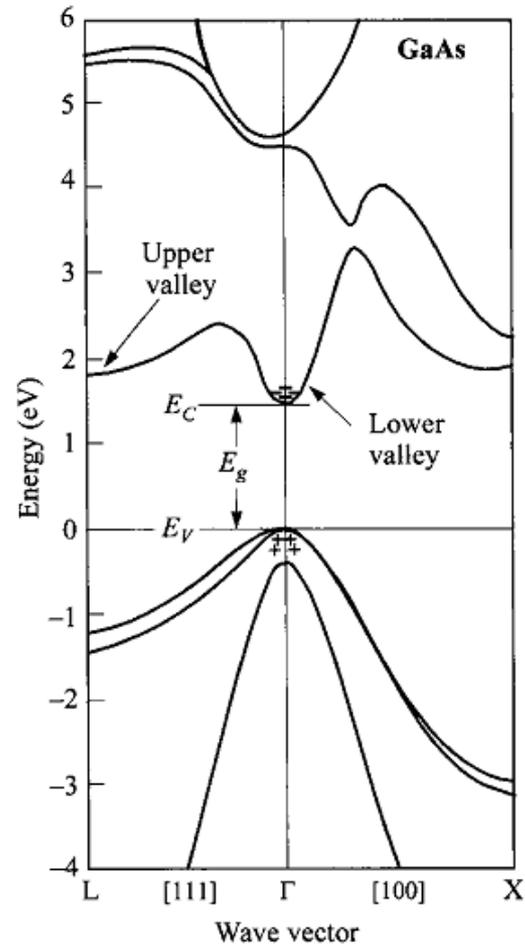
д.ф.-м.н., проф. РАН  
Леонид Викторович Кулик

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна РАН, Черноголовка

# Зонная структура полупроводников

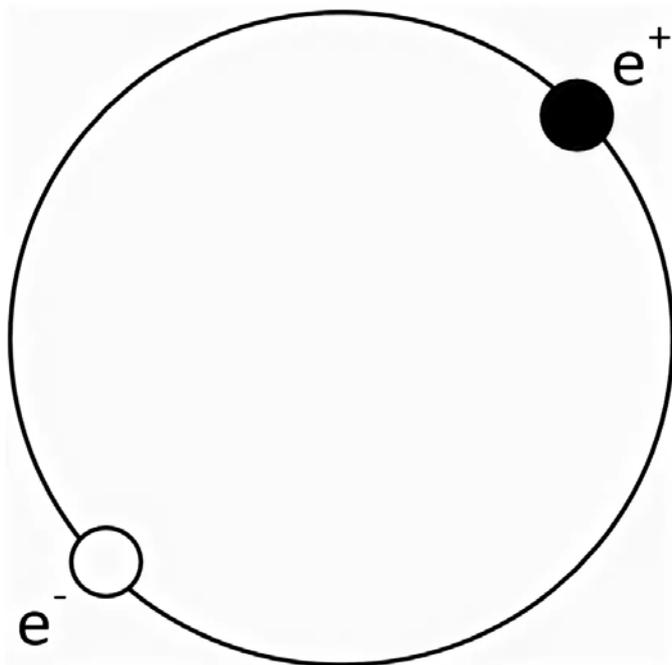


(a)



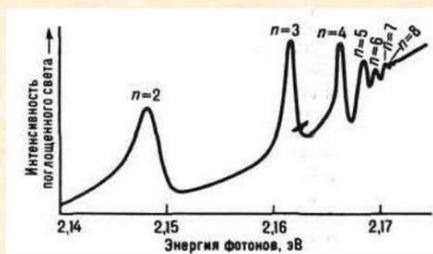
(b)

# ЭКСИТОН



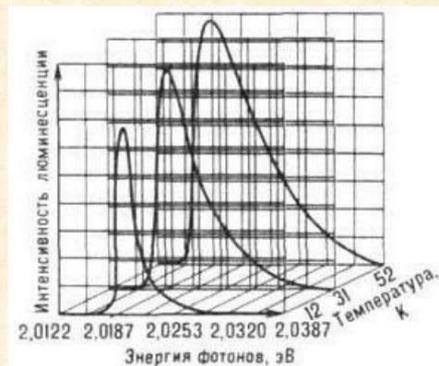
## Открытие экситона

— Е.Ф. Гросс, 1952 г., Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе



Спектр поглощения кристаллической закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

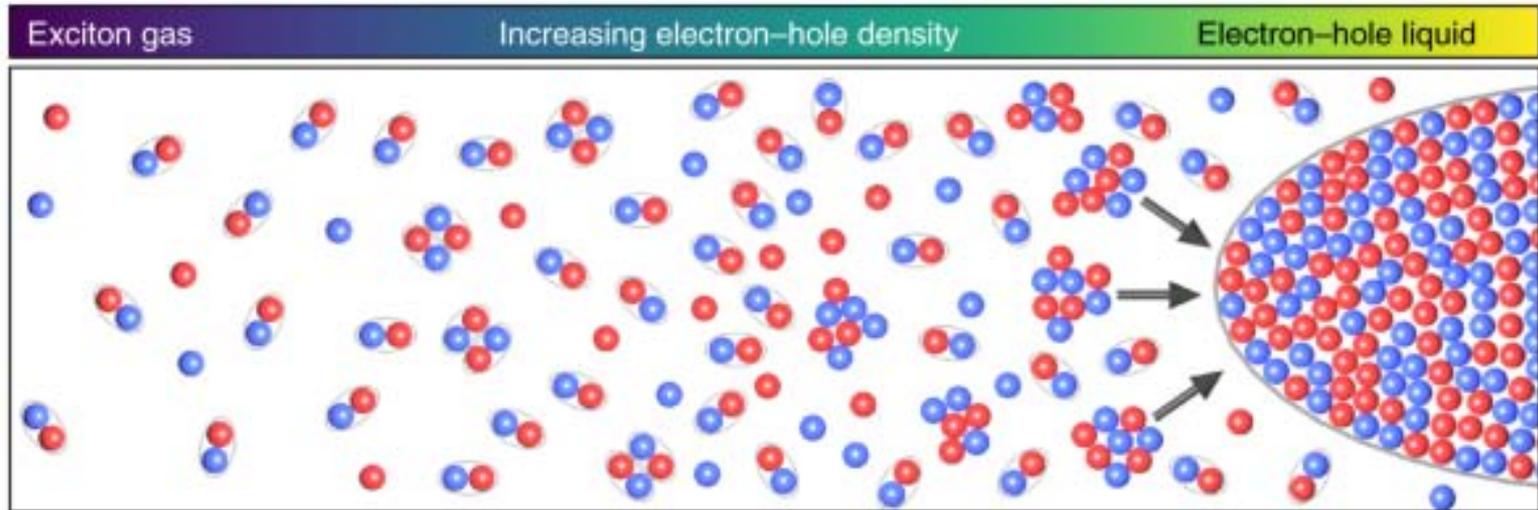
Пики соответствуют энергетическим уровням экситонов.



Спектр люминесценции  $\text{CuO}$ .

(Ширина спектральных линий уменьшается при понижении температуры.)

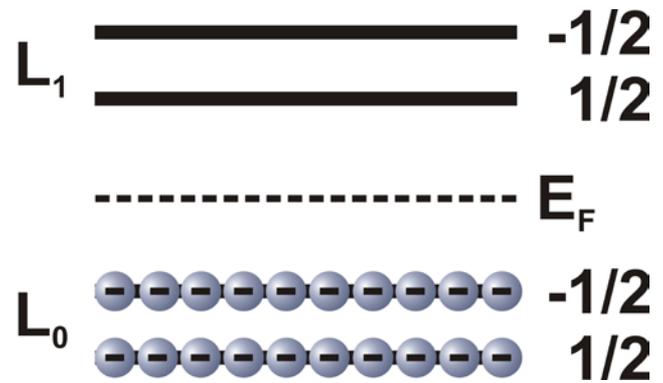
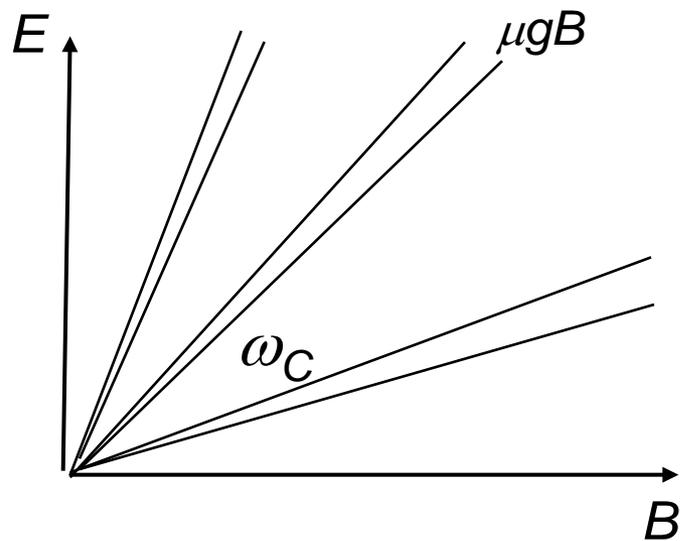
# Электрон-дырочная жидкость



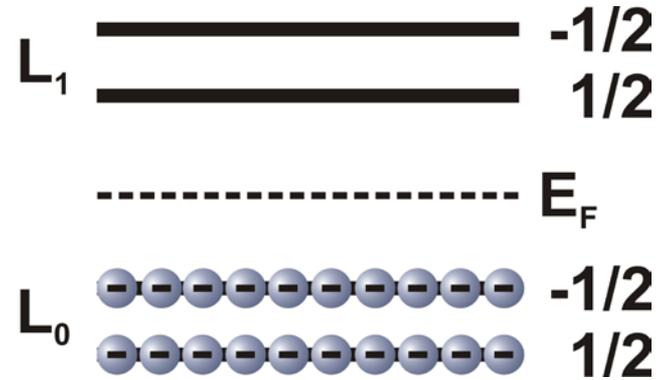
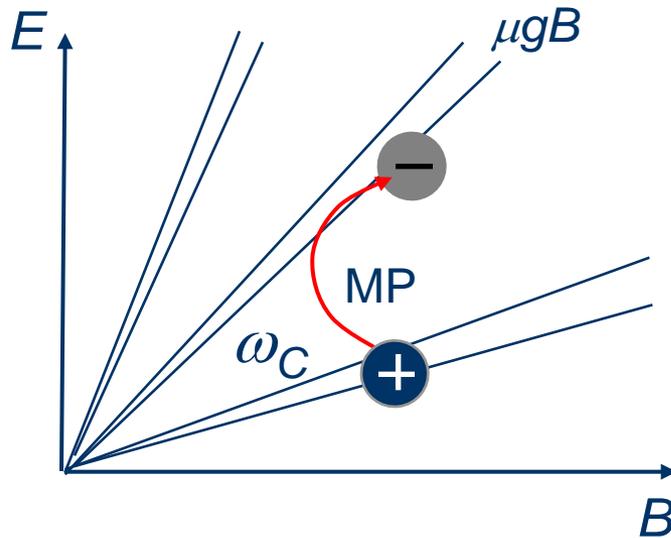
Keldysh, L. V. Proceedings of the 9th International Conference on Physics of Semiconductors 1303 (Nauka, Leningrad, 1968).

Keldysh, L. V. The electron-hole liquid in semiconductors. *Contemp. Phys.* 27, 395–428 (1986).

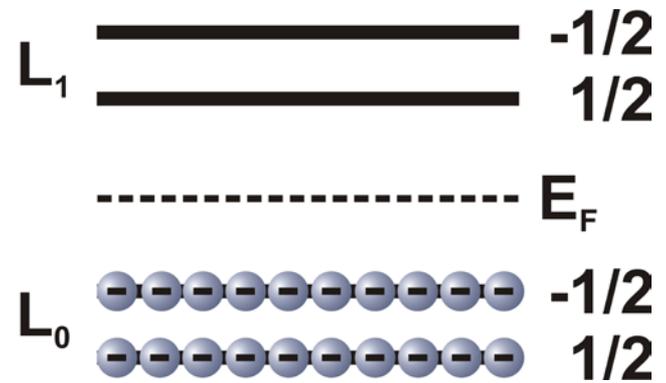
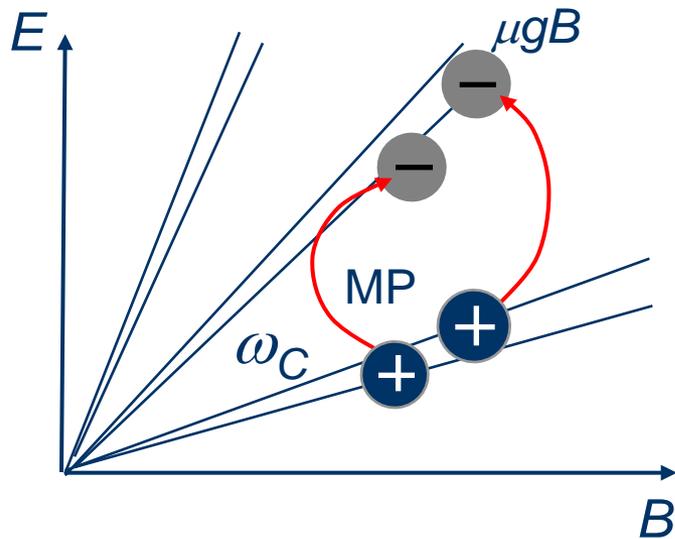
# Магнитоэкситоны



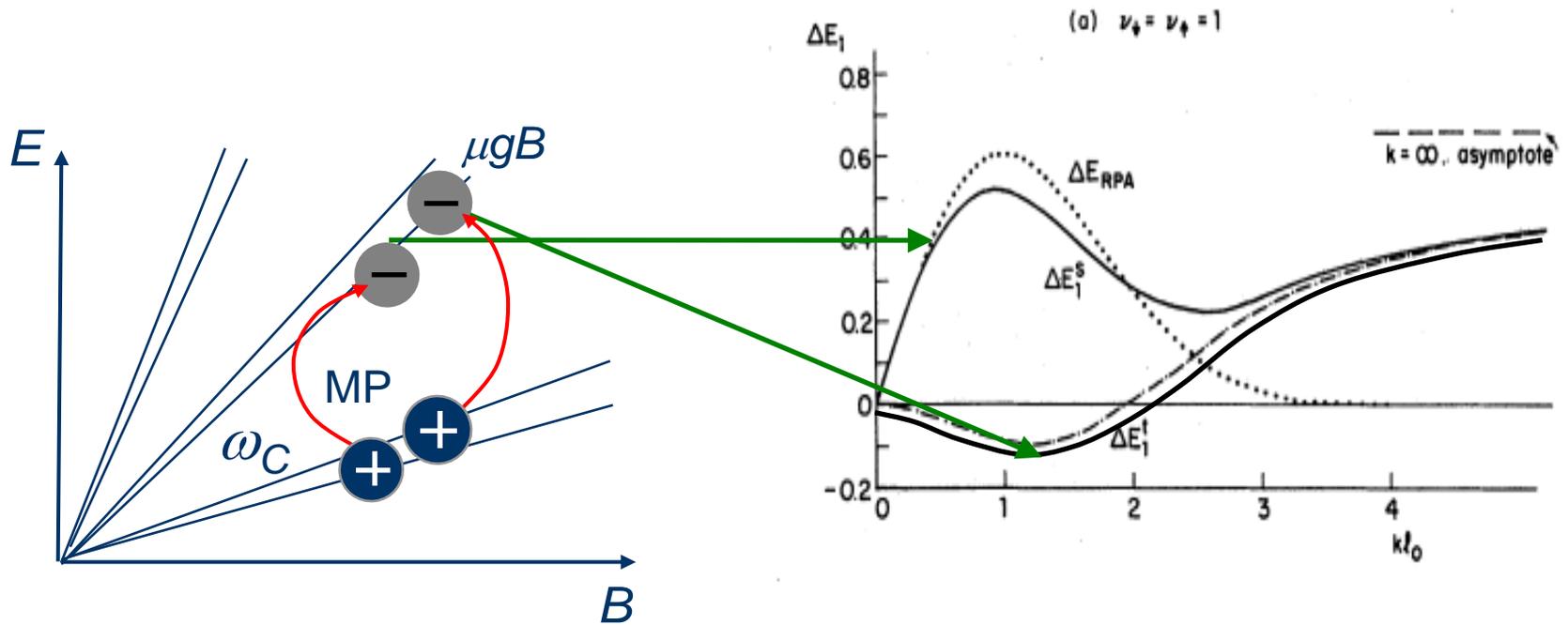
# Магнитоэкситоны



# Магнитоэкситоны



# Магнитоэкситоны



Л.П. Горьков, И.Е. Дзялошинский  
К теории экситона Мотта в сильном магнитном поле  
ЖЭТФ, 53(2), 717-722 (1967)

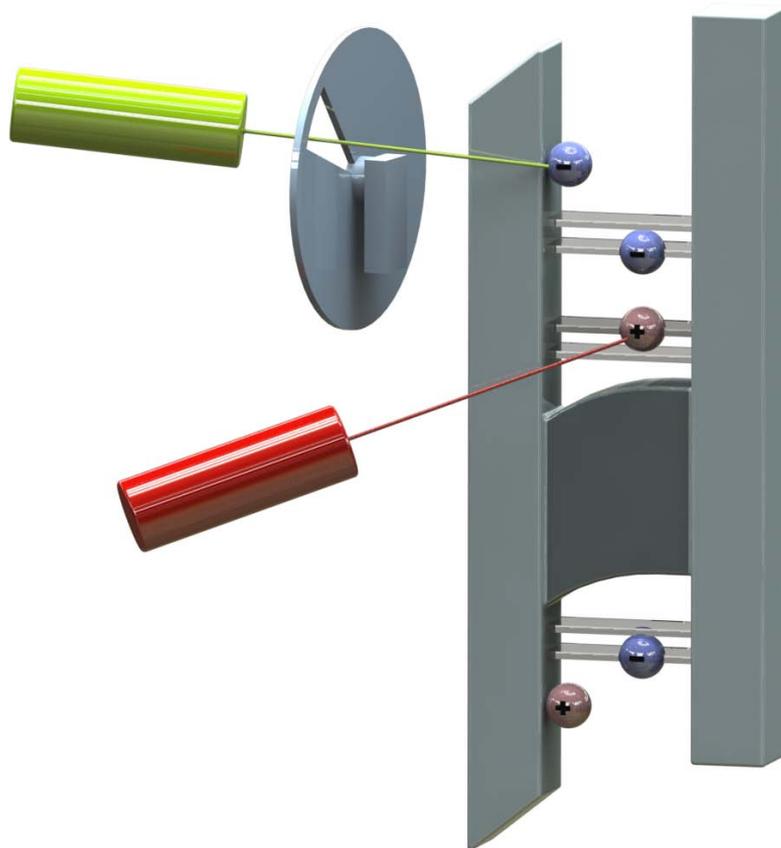
# SCIENTIFIC REPORTS

**OPEN**

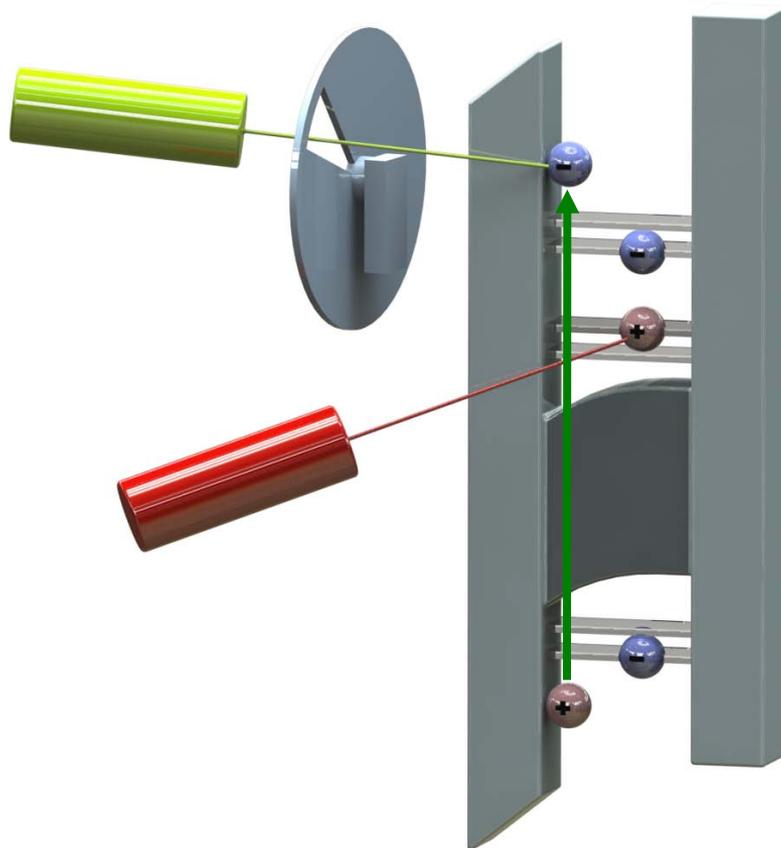
## **Super-long life time for 2D cyclotron spin-flip excitons**

L.V. Kulik, A.V. Gorbunov, A.S. Zhuravlev, V.B. Timofeev, S. Dickmann & I.V. Kukushkin

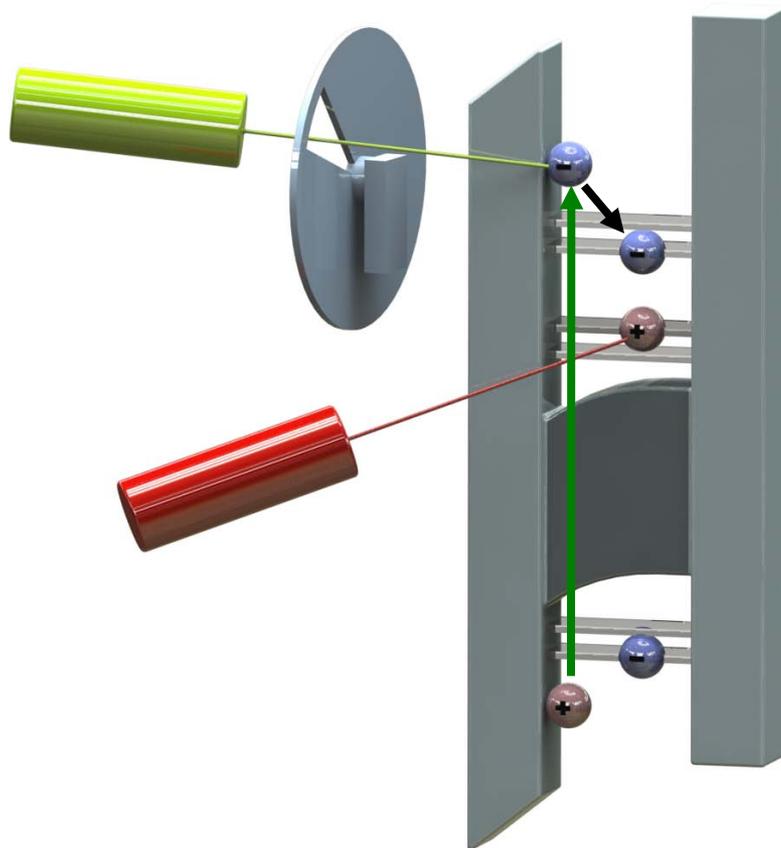
# “Темные” магнитоэкситоны в целочисленном холловском диэлектрике $\nu = 2$



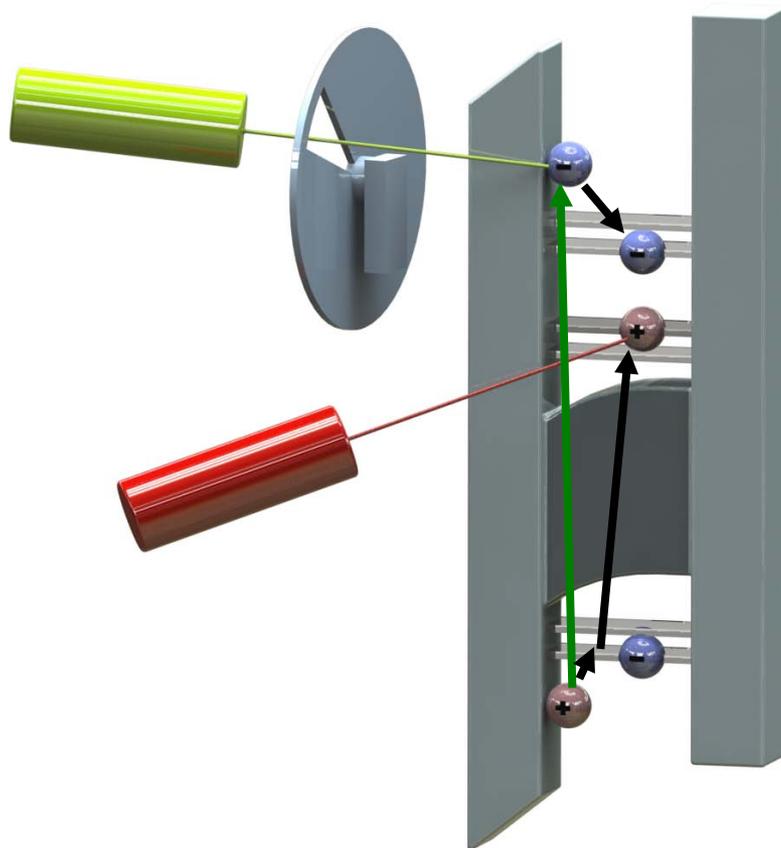
# “Темные” магнитоэкситоны в целочисленном холловском диэлектрике $\nu = 2$



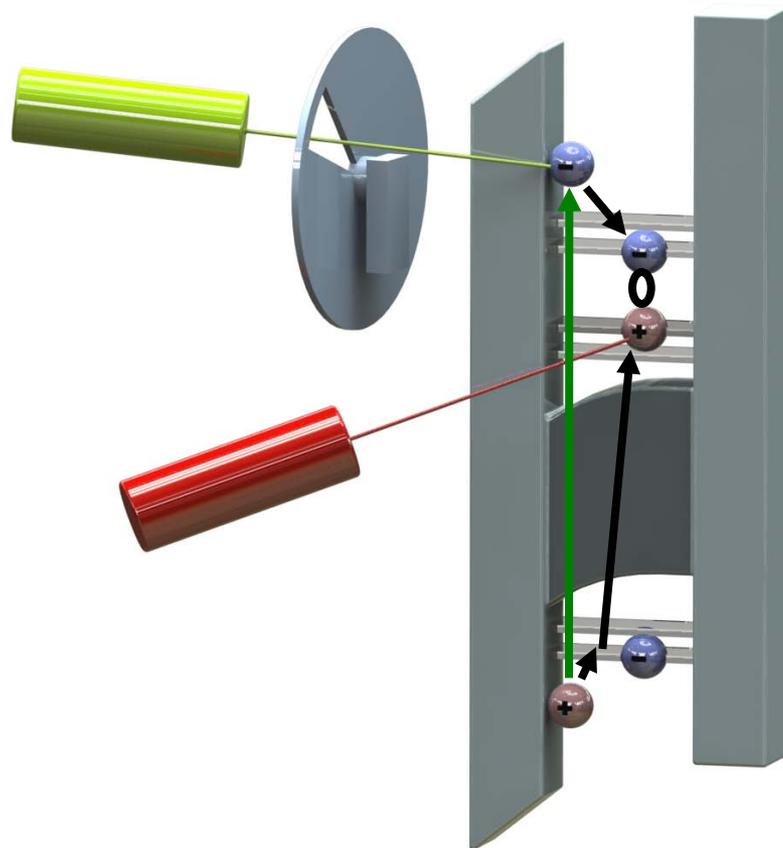
# “Темные” магнитоэкситоны в целочисленном холловском диэлектрике $\nu = 2$



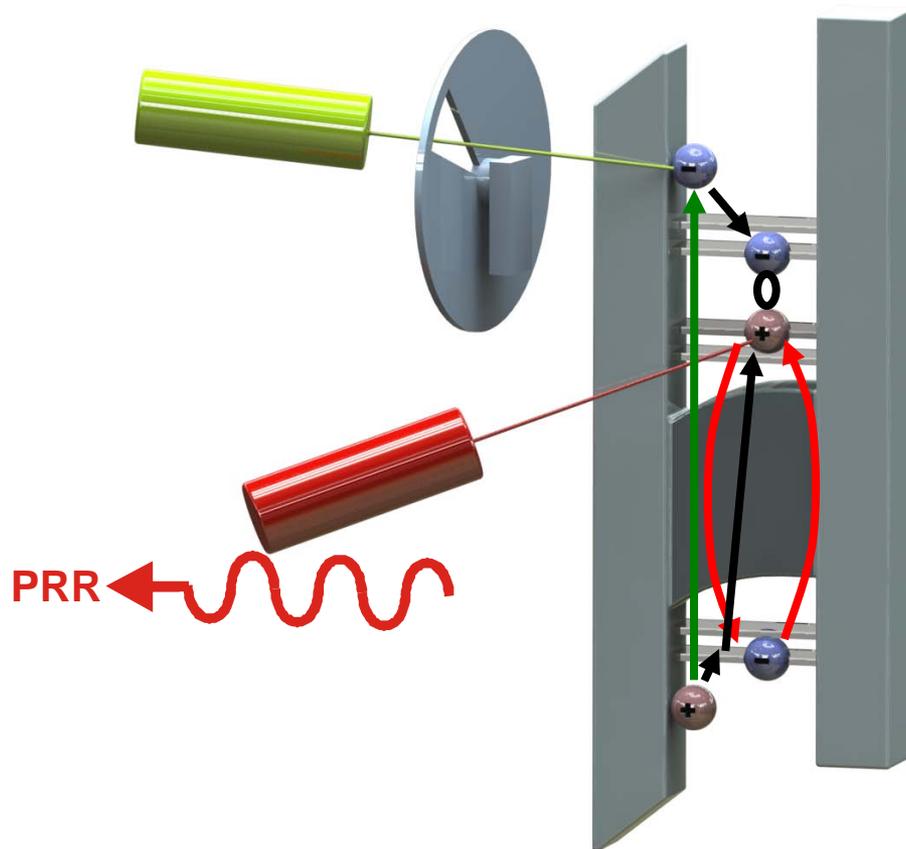
# “Темные” магнитоэкситоны в целочисленном холловском диэлектрике $\nu = 2$



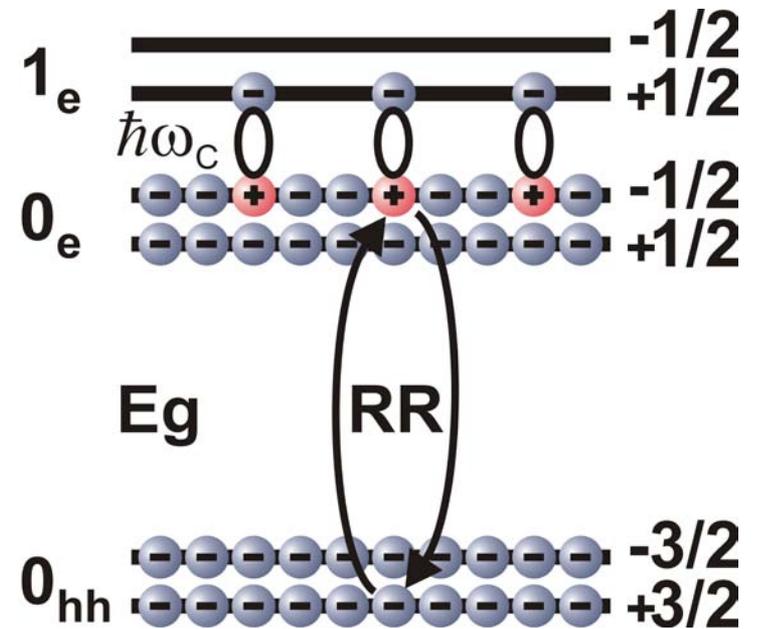
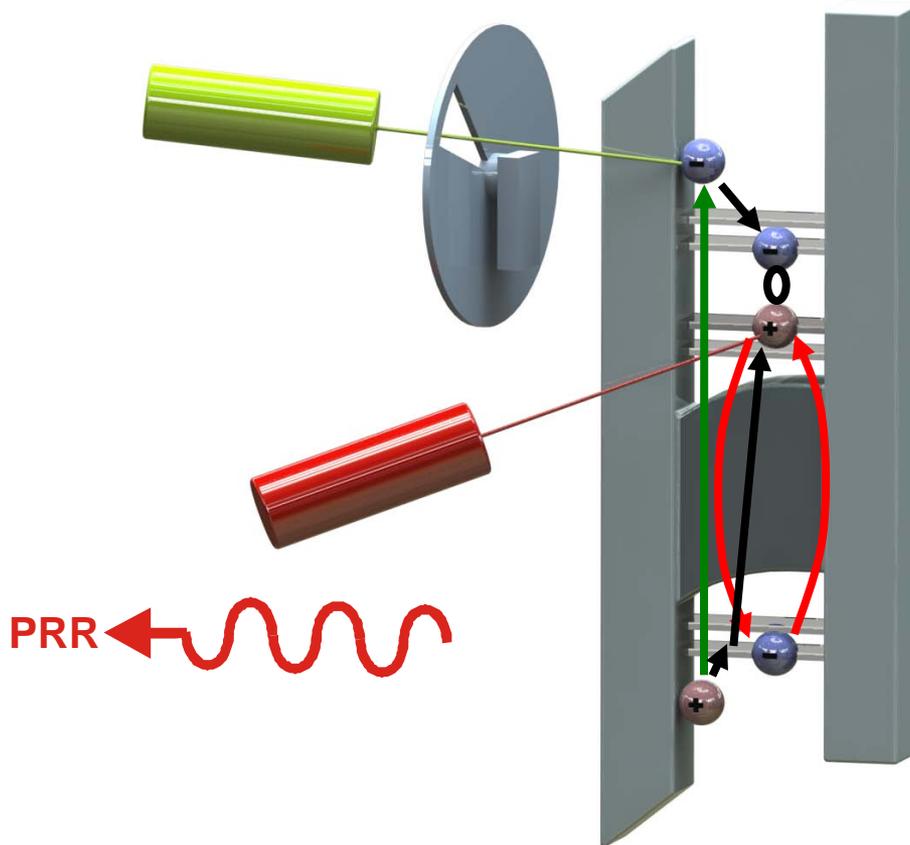
# “Темные” магнитоэкситоны в целочисленном холловском диэлектрике $\nu = 2$



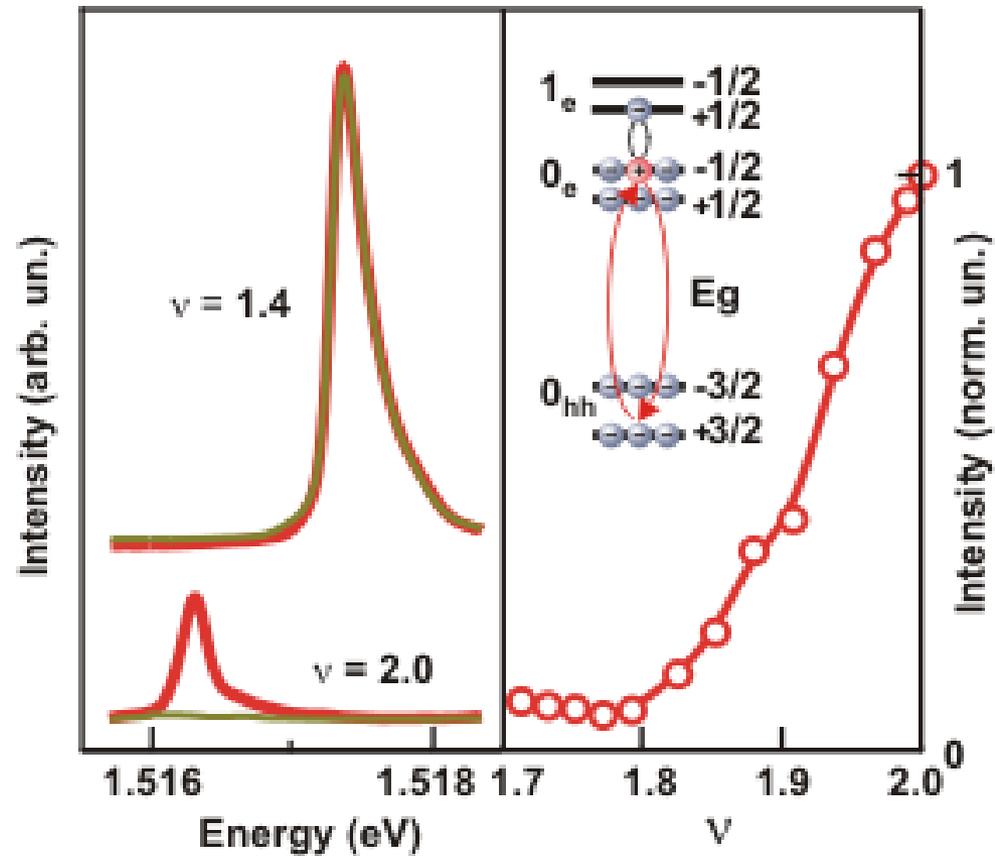
# “Темные” магнитоэкситоны в целочисленном холловском диэлектрике $\nu = 2$



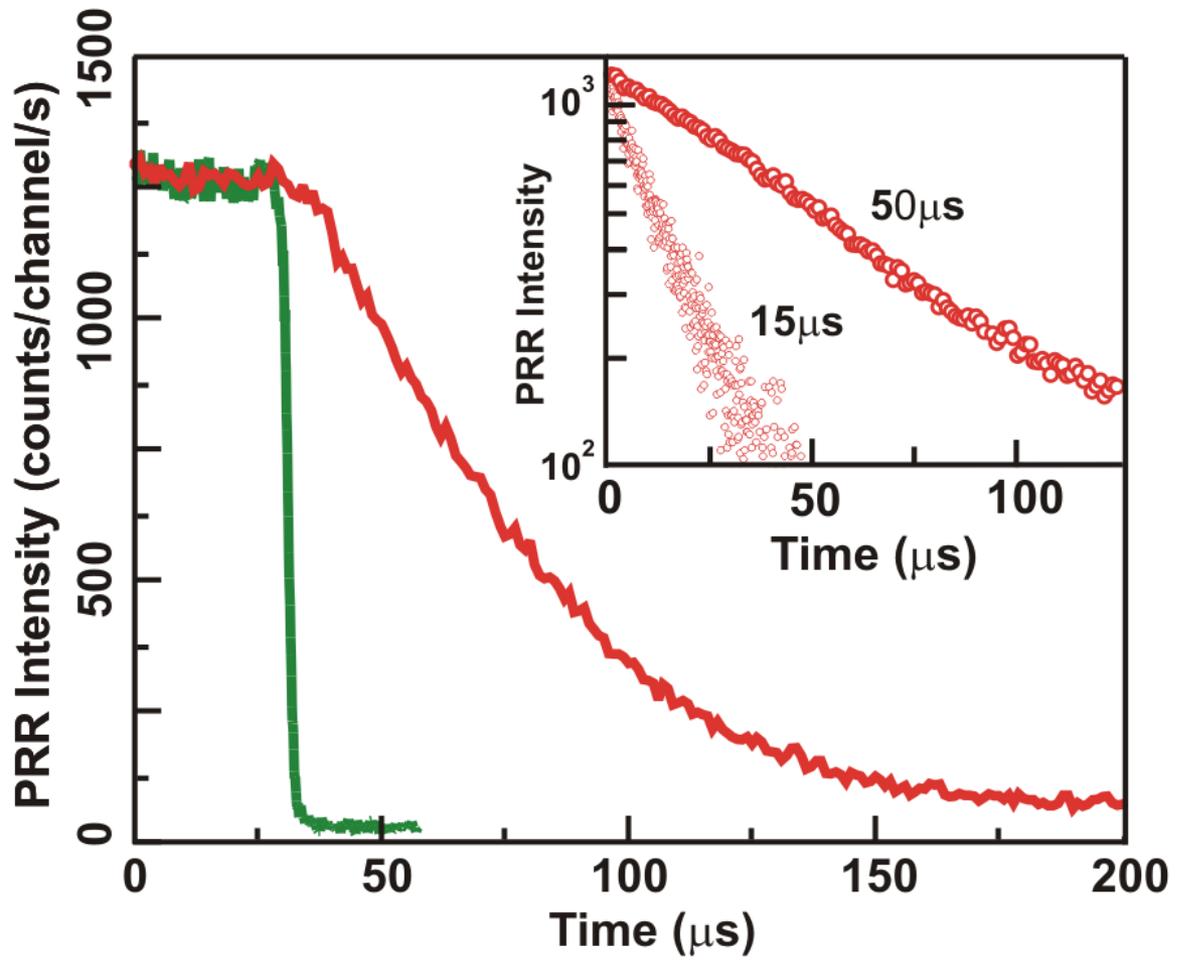
# “Темные” магнитоэкситоны в целочисленном холловском диэлектрике $\nu = 2$



# Фотоиндуцированное Резонансное Отражение



# Фотоиндуцированное Резонансное Отражение



ARTICLE

Received 20 May 2016 | Accepted 7 Oct 2016 | Published 16 Nov 2016

DOI: 10.1038/ncomms13499

OPEN

# Magnetofermionic condensate in two dimensions

L.V. Kulik<sup>1</sup>, A.S. Zhuravlev<sup>1</sup>, S. Dickmann<sup>1,2</sup>, A.V. Gorbunov<sup>1</sup>, V.B. Timofeev<sup>1</sup>, I.V. Kukushkin<sup>1</sup> & S. Schmult<sup>3</sup>

## SCIENTIFIC REPORTS

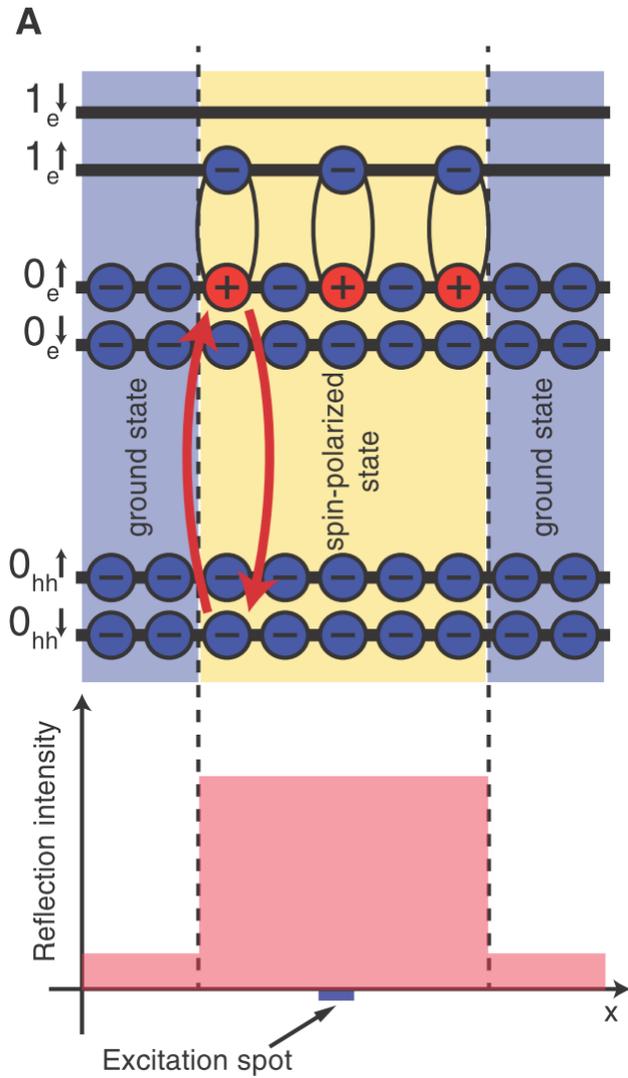


OPEN

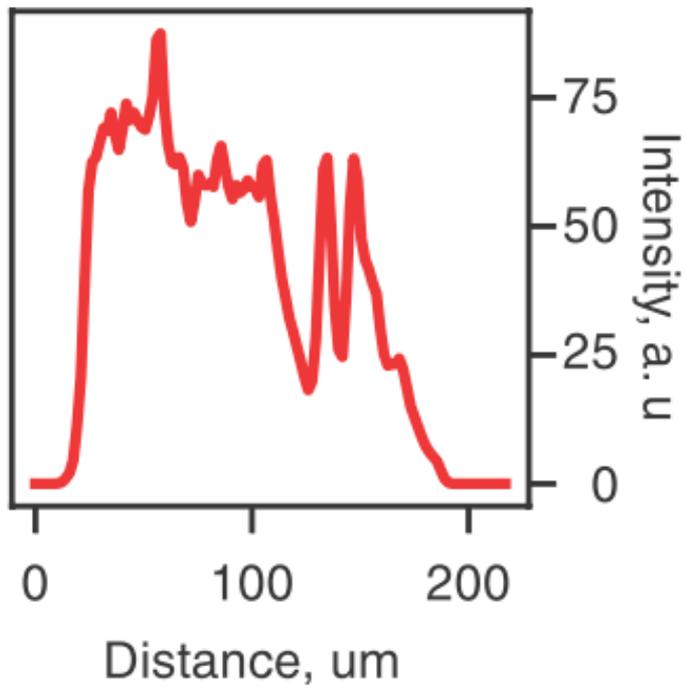
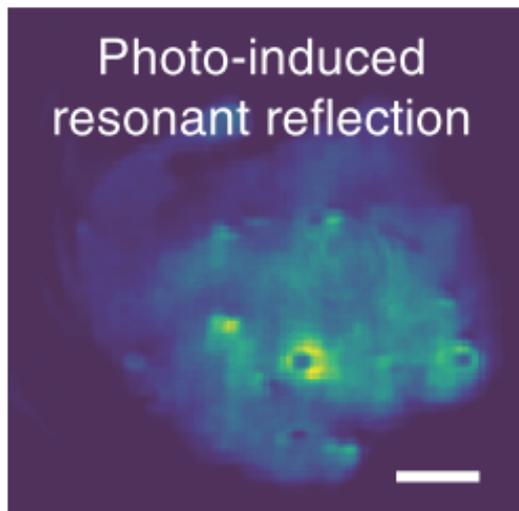
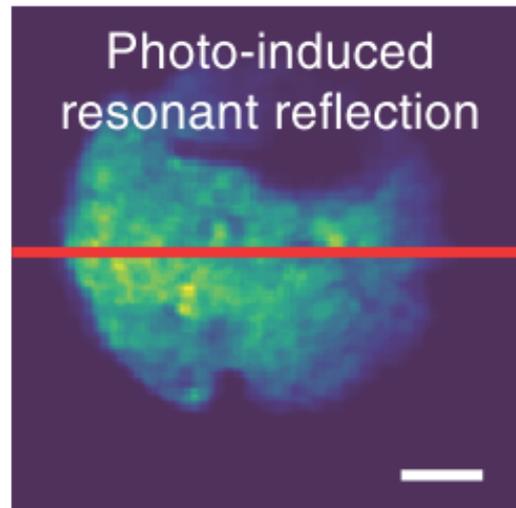
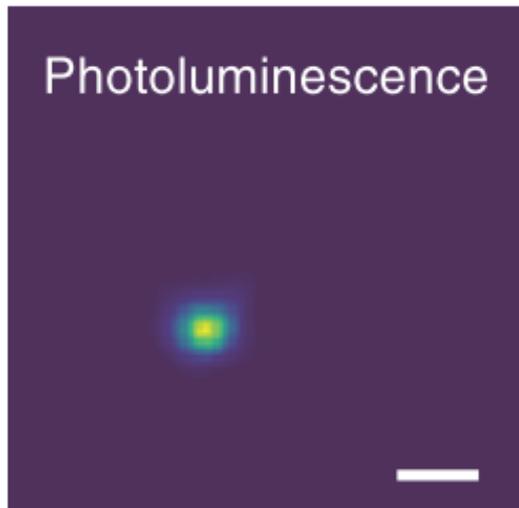
### Long-range non-diffusive spin transfer in a Hall insulator

L. V. Kulik<sup>1</sup>, V. A. Kuznetsov<sup>2,1</sup>, A. S. Zhuravlev<sup>1</sup>, A. V. Gorbunov<sup>1</sup>, V. V. Solovyev<sup>1</sup>,  
V. B. Timofeev<sup>1</sup>, I. V. Kukushkin<sup>1,2</sup> & S. Schmult<sup>3</sup>

# Распространение в реальном пространстве



# Распространение в реальном пространстве

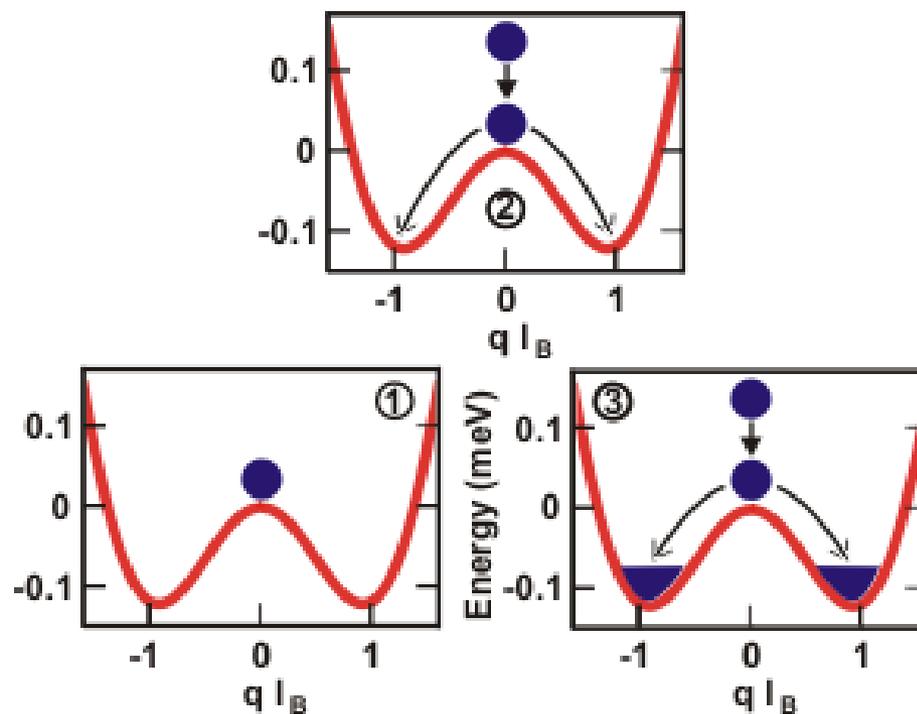


# Spin transport in the bulk of two-dimensional Hall insulator

Cite as: Appl. Phys. Lett. 114, 062403 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5078730>

Submitted: 28 October 2018 . Accepted: 28 January 2019 . Published Online: 13 February 2019

L. V. Kulik , A. V. Gorbunov , A. S. Zhuravlev , V. A. Kuznetsov , and I. V. Kukushkin



**Artificially Constructed Plasmarons and Plasmon-Exciton Molecules in 2D Metals**

A. S. Zhuravlev, V. A. Kuznetsov,<sup>\*</sup> L. V. Kulik, V. E. Bisti, V. E. Kirpichev, and I. V. Kukushkin  
*Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka 142432, Russia*

S. Schmult<sup>†</sup>

Письма в ЖЭТФ, том 106, вып. 10, с. 651–654

© 2017 г. 25 ноября

**Детектирование переноса спинового возбуждения в двумерной  
электронной системе по фотолюминесценции многочастичных  
ЭКСИТОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

*А. В. Горбунов<sup>1</sup>, Л. В. Кулик, В. А. Кузнецов, А. С. Журавлев, А. В. Ларионов, В. Б. Тимофеев,  
И. В. Кукушкин*

PHYSICAL REVIEW B **98**, 205303 (2018)

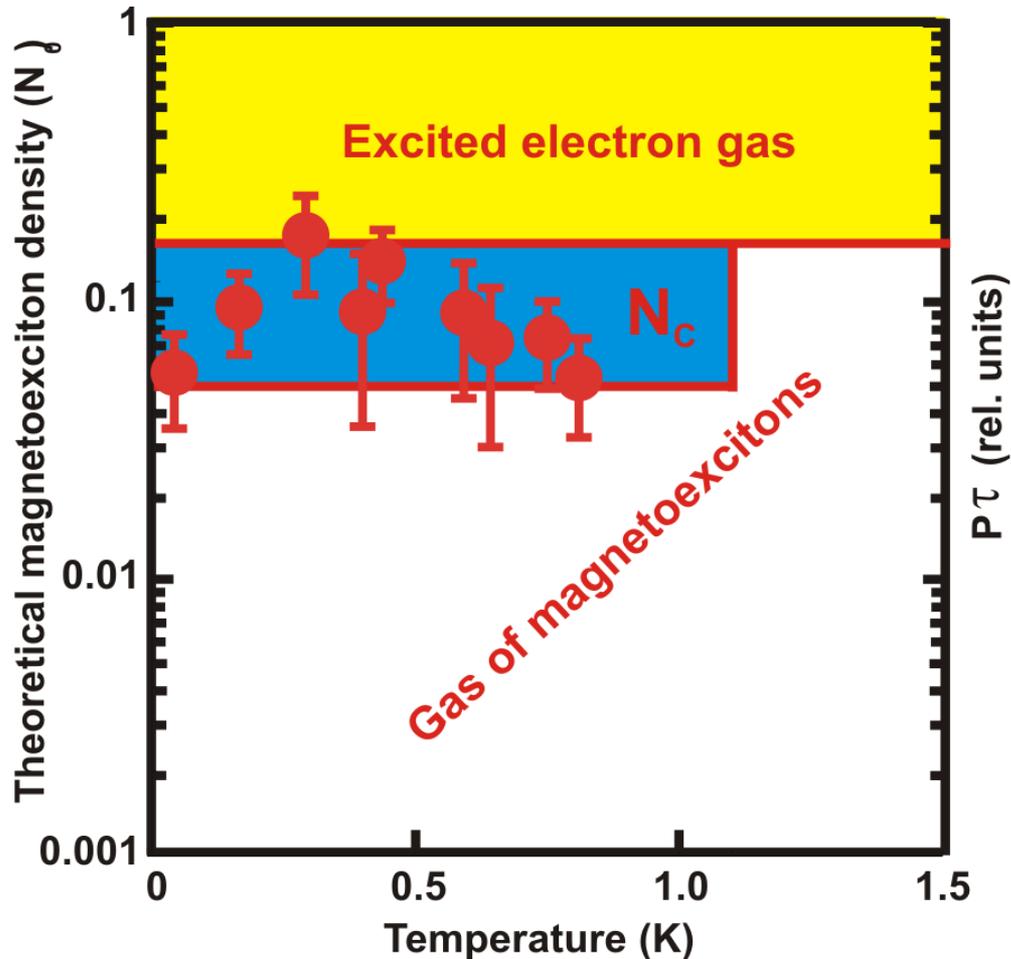
---

**Three-particle electron-hole complexes in two-dimensional electron systems**

V. A. Kuznetsov,<sup>1,2,\*</sup> L. V. Kulik,<sup>2</sup> M. D. Velikanov,<sup>3,4</sup> A. S. Zhuravlev,<sup>2</sup> A. V. Gorbunov,<sup>2</sup>  
S. Schmult,<sup>5,†</sup> and I. V. Kukushkin<sup>1,2</sup>

# Фазовая диаграмма (бозевская магнитоэкситонная жидкость)

A. S. Koreyev, P. S. Berezhnoy, A. V. Gorbunov, V. V. Solovyev, A. B. Van'kov,  
L. V. Kulik, and V. B. Timofeev, Phys. Rev. B 110, 165417 (2024)



PHYSICAL REVIEW B **100**, 155304 (2019)

Coherence-decoherence transition in a spin-magnetoexcitonic ensemble in a quantum Hall system

S. Dickmann

*Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka 142432, Moscow District, Russia*

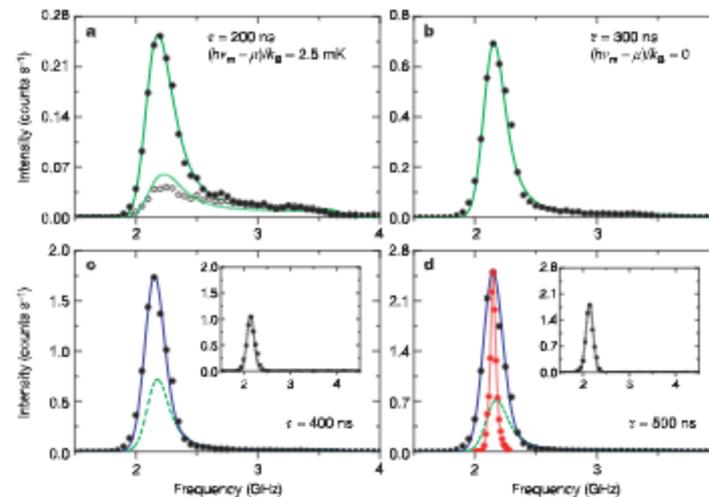
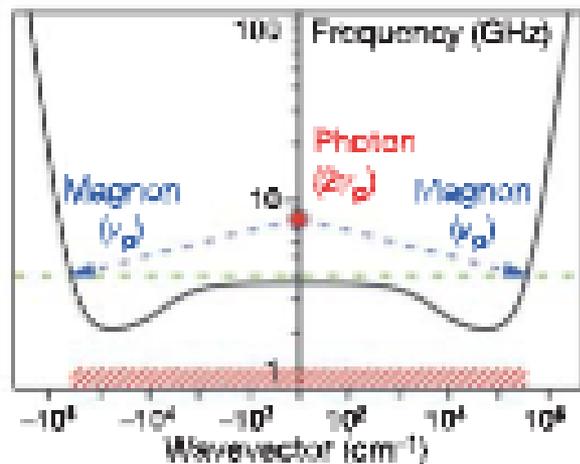
I. V. Kulik and V. A. Kuznetsov

*Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka 142432, Moscow District, Russia  
and National Research University Higher School of Economics, 141700 Moscow, Russia*

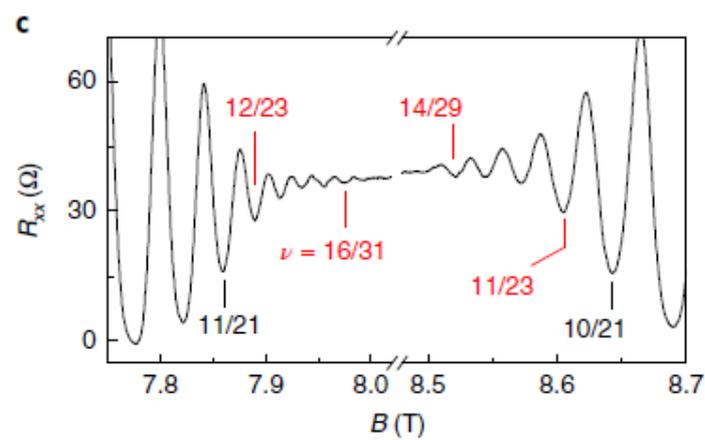
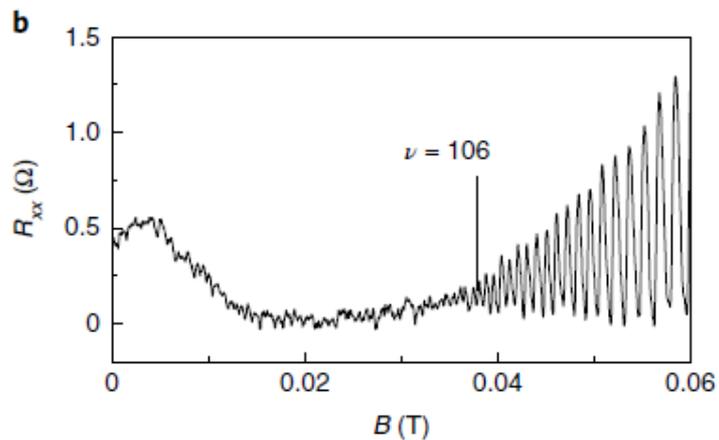
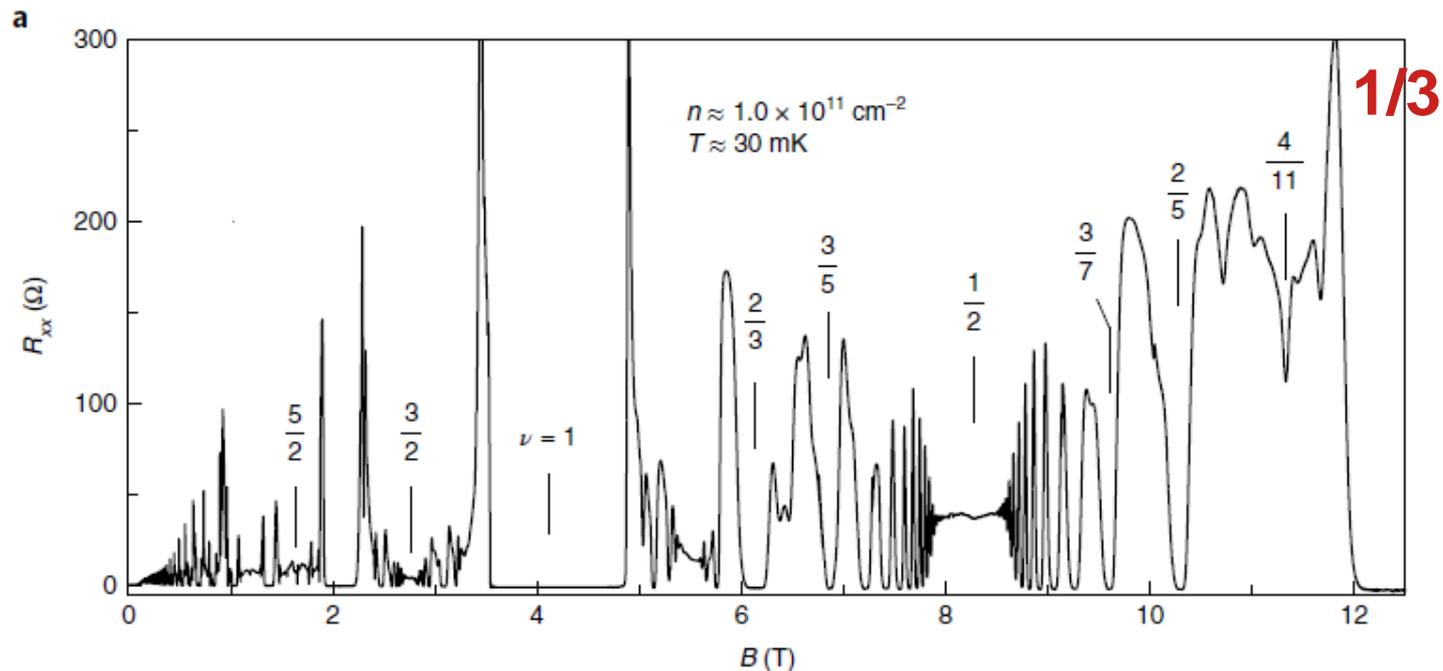
## LETTERS

# Bose-Einstein condensation of quasi-equilibrium magnons at room temperature under pumping

S. O. Demokritov<sup>1</sup>, V. E. Demidov<sup>1</sup>, O. Dzyapko<sup>1</sup>, G. A. Melkov<sup>2</sup>, A. A. Serga<sup>3</sup>, B. Hillebrands<sup>3</sup> & A. N. Slavin<sup>4</sup>



# Дробные холловские диэлектрики



# Первое экспериментальное наблюдение $\pi/3$ анионной статистики в Лафлиновской жидкости $1/3$

PHYSICAL REVIEW  
LETTERS

---

---

VOLUME 49

4 OCTOBER 1982

NUMBER 14

---

---

Quantum Mechanics of Fractional-Spin Particles

Frank Wilczek

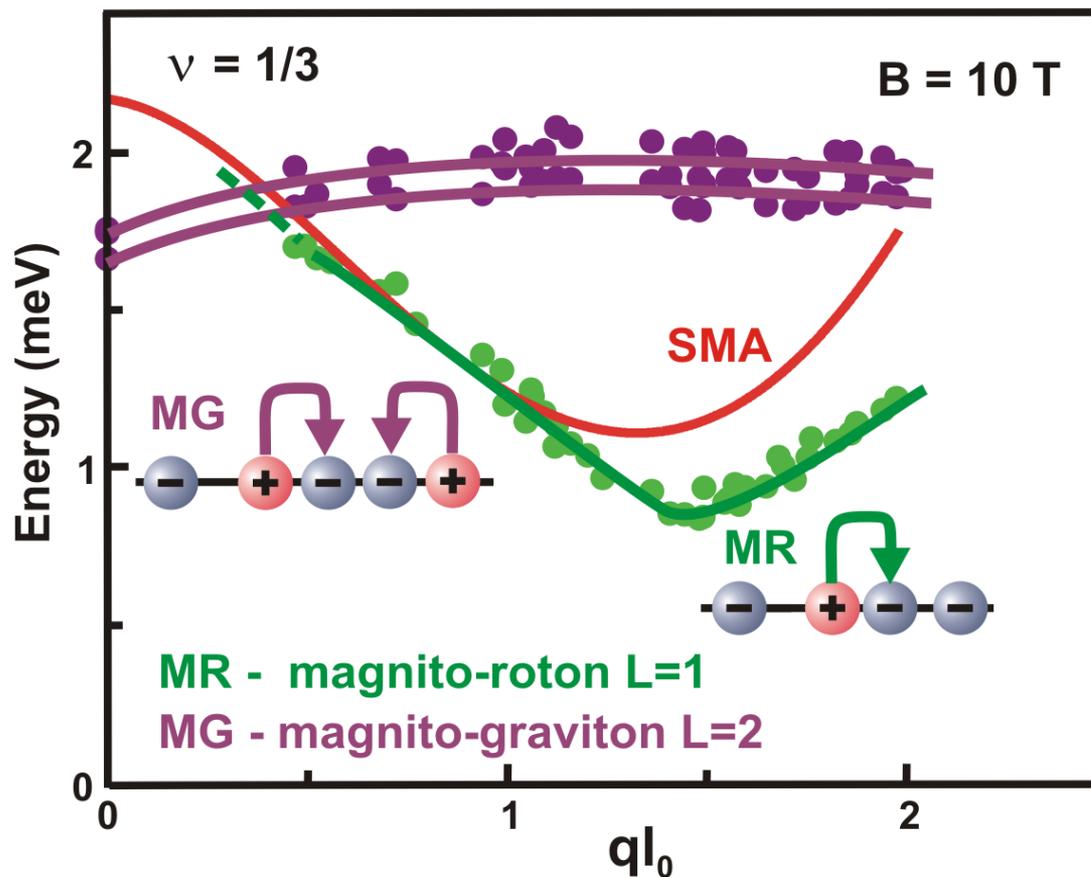
*Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, California 93106*

(Received 22 June 1982)

H. Bartolomei et al., Fractional statistics in anyon collisions, *Science* 368, 173–177 (2020).

J. Nakamura et al., Direct observation of anyonic braiding statistics, *Nature Physics* 16, 931–936 (2020).

# $\nu = 1/3$ возбуждения



**MR** - S. M. Girvin, A. H. MacDonald, P. M. Platzman, Collective-Excitation Gap in the Fractional Quantum Hall Effect, Phys. Rev. Lett. 54, 581 (1985); Phys. Rev. B 33, 2481 (1986).

**MG** - F. D. M. Haldane, Geometrical Description of the Fractional Quantum Hall Effect, Phys. Rev. Lett. 107, 116801 (2011).

ARTICLE



<https://doi.org/10.1038/s41467-021-26873-w>

OPEN

# Laughlin anyon complexes with Bose properties

L. V. Kulik<sup>1,2</sup>, A. S. Zhuravlev<sup>1</sup>, L. I. Musina <sup>3,4✉</sup>, E. I. Belozerov<sup>1,2</sup>, A. B. Van'kov<sup>1,2</sup>, O. V. Volkov<sup>1</sup>,  
A. A. Zagitova<sup>1</sup>, I. V. Kukushkin<sup>1</sup> & V. Y. Umansky<sup>5</sup>

(2021  
)

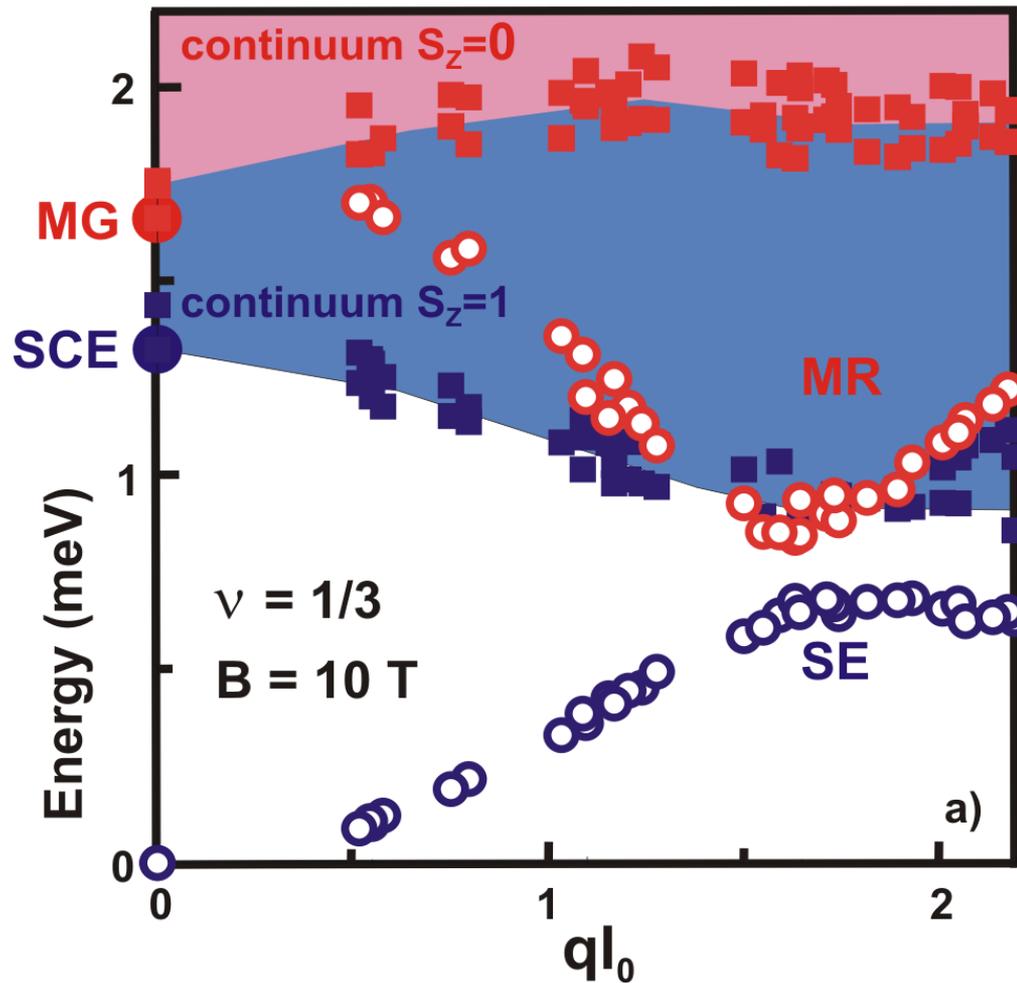
Evidence for chiral graviton modes in fractional quantum Hall liquids  
Jiehui Liang, Ziyu Liu, Zihao Yang, Yuelel Huang, Ursula Wurstbauer, Cory R.  
Dean, Ken W. West, Loren N. Pfeiffer, Lingjie Du & Aron Pinczuk  
**Nature** volume 628, pages78–83 (2024)

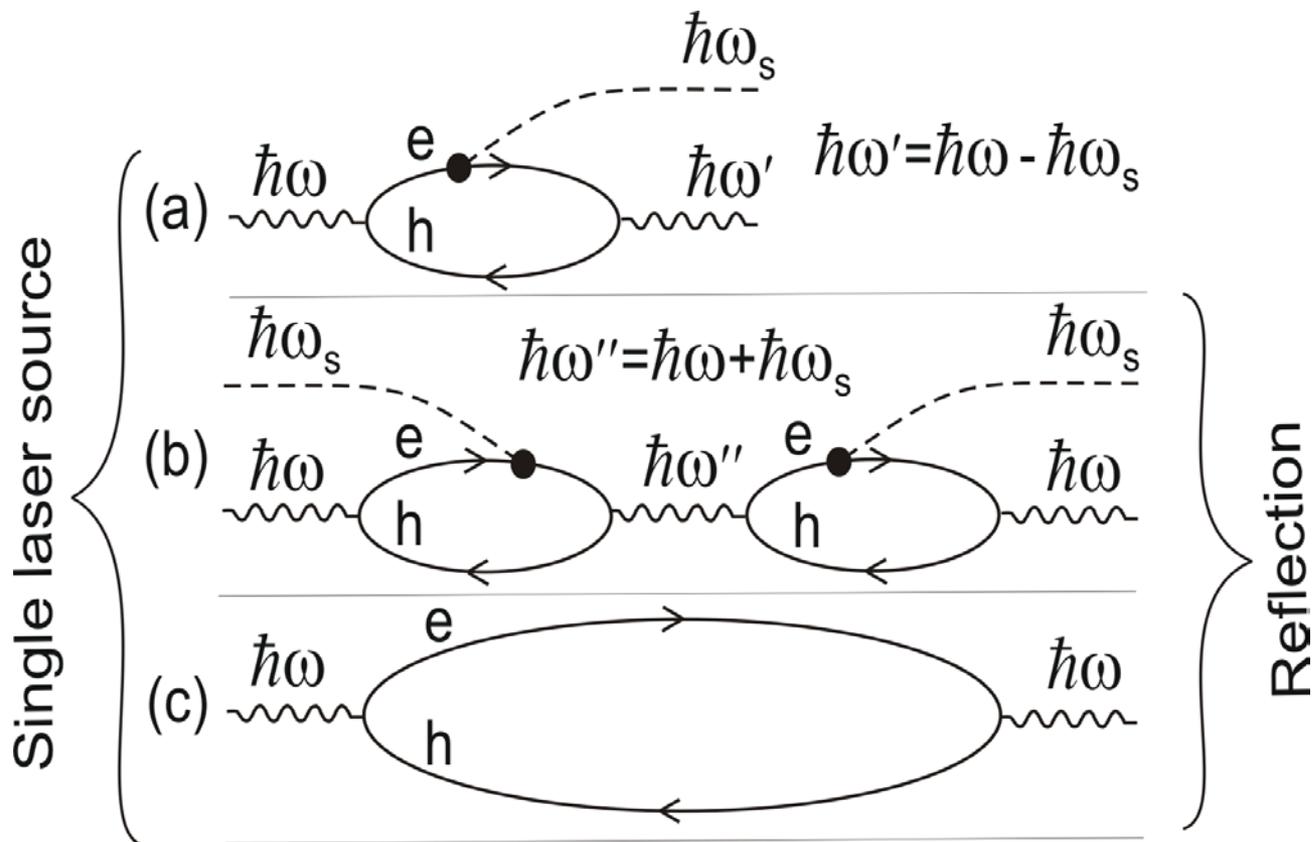
# Спектр нейтральных возбуждений при $\nu = 1/3$

Birotons and “Dark” Quantum Hall Hierarchies

Applied Sciences (Switzerland). 2022. Vol. 12. No. 15. Article 7940.

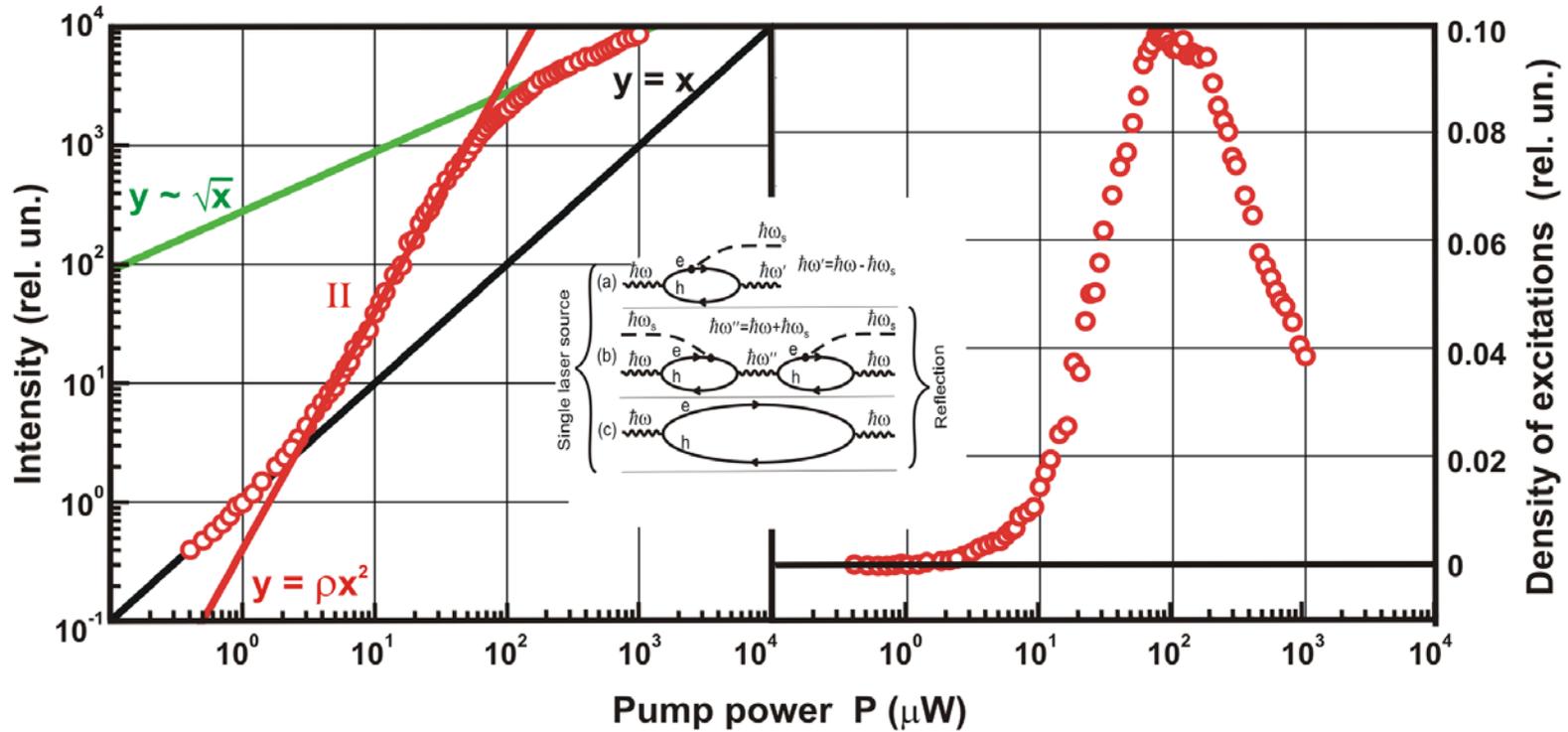
Grigorev O., Musina L., Alexander B. Van'kov, Volkov O., Kulik L.





**Когерентное anti-Stokes-Stokes Раман (ASSR) рассеяния света !**

# Подсчет возбуждений



## Сверхдолгоживущие нейтральные возбуждения лафлиновской жидкости 1/3

А. В. Ларионов<sup>1)</sup>, А. С. Журавлев, Л. В. Кулик, А. А. Загитова, И. В. Кукушкин

*Институт физики твёрдого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

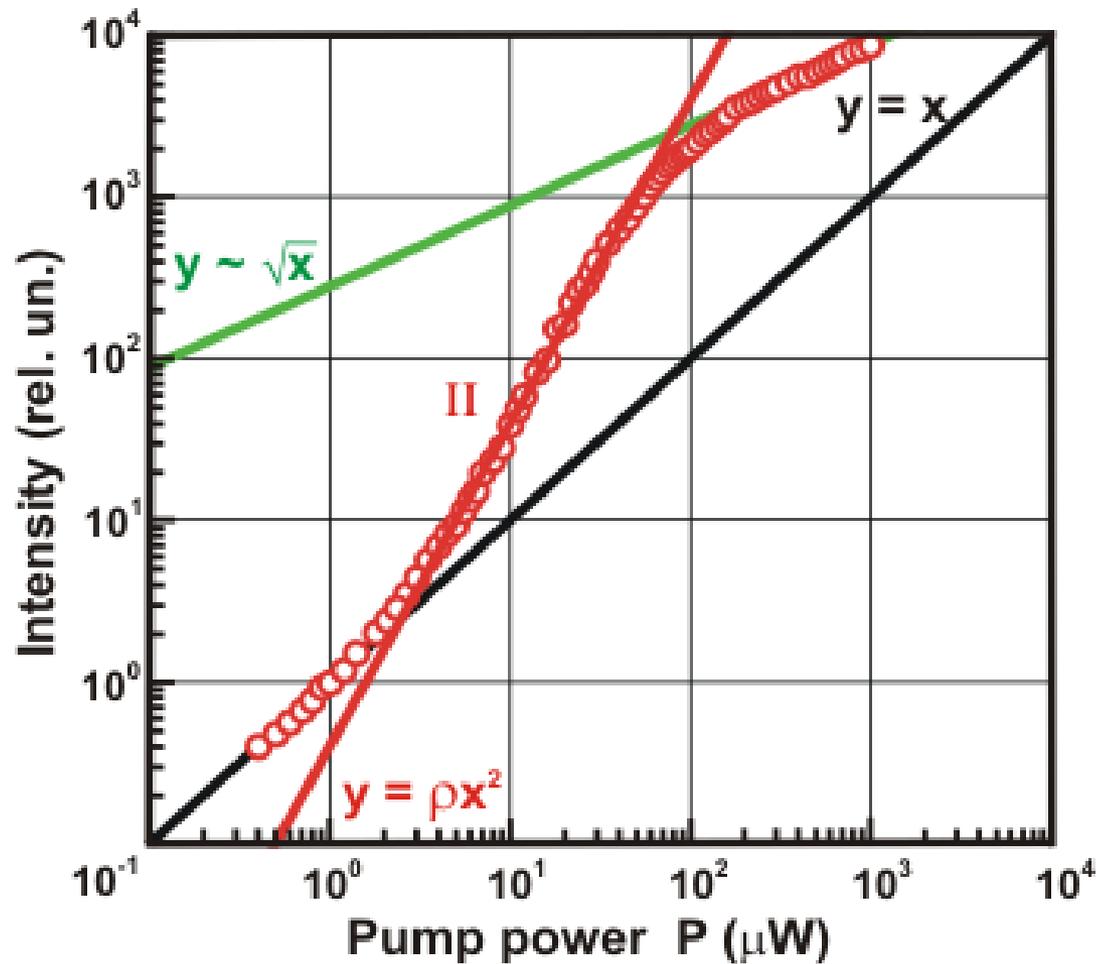
Поступила в редакцию 26 августа 2024 г.

После переработки 26 августа 2024 г.

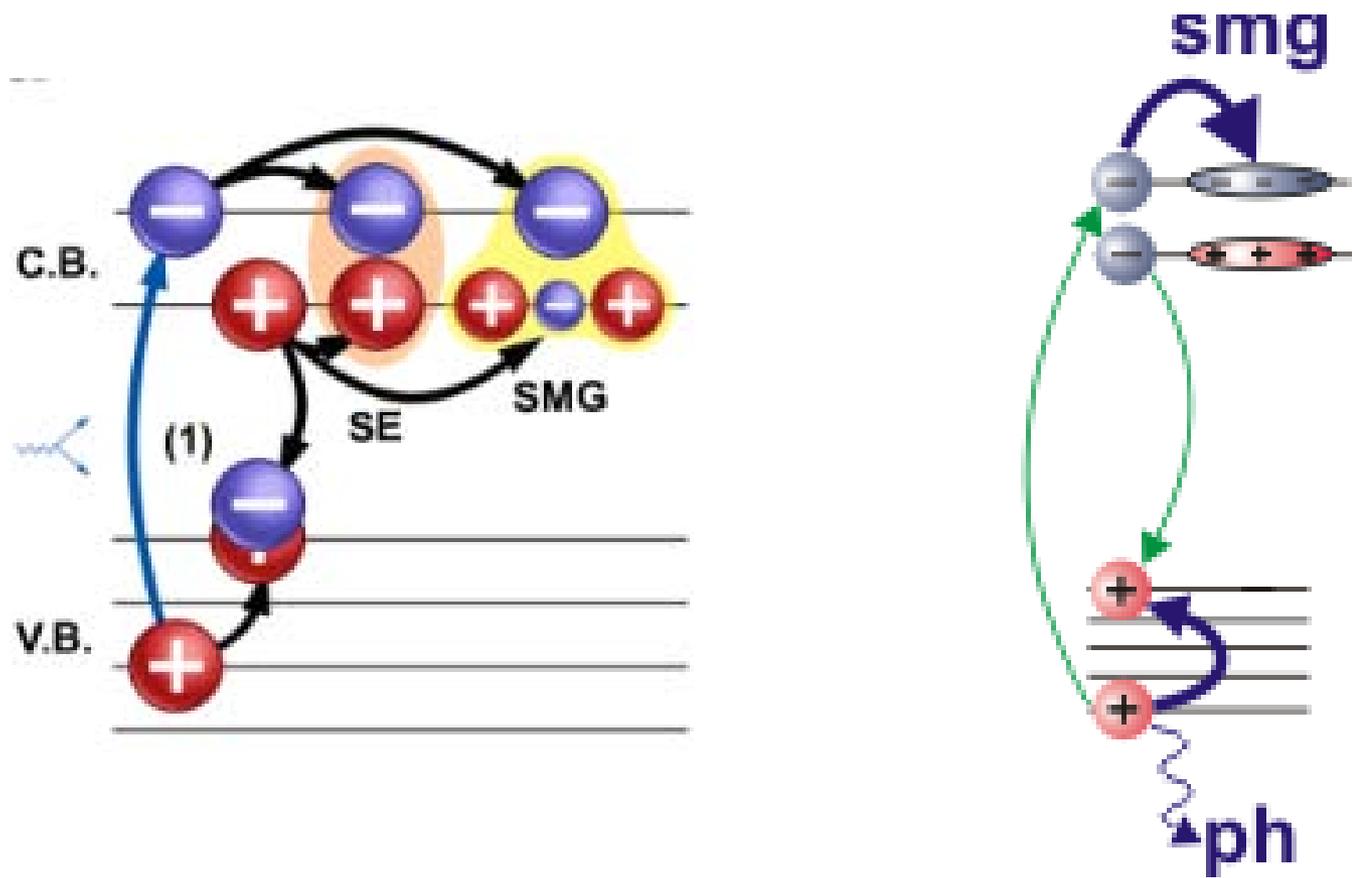
Принята к публикации 27 августа 2024 г.

# Спасибо за терпение !!!

# Зависимость от мощности



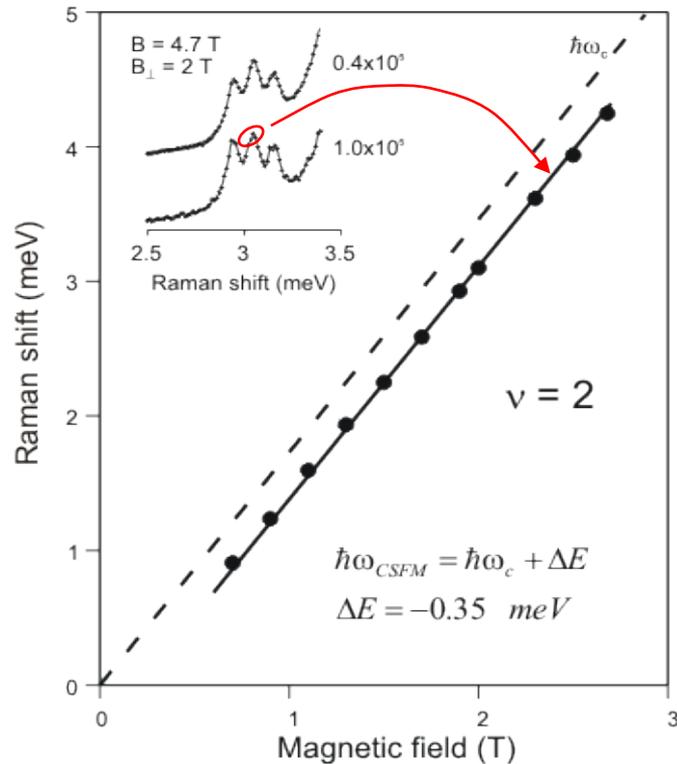
# Возбуждения со спином 1



Cyclotron spin-flip mode as the lowest-energy excitation of unpolarized integer quantum Hall states

L. V. Kulik,<sup>1,2</sup> I. V. Kukushkin,<sup>1,2</sup> S. Dickmann,<sup>1</sup> V. E. Kirpichev,<sup>1,2</sup> A. B. Van'kov,<sup>1</sup> A. L. Parakhonsky,<sup>1</sup> J. H. Smet,<sup>2</sup> K. von Klitzing,<sup>2</sup> and W. Wegscheider<sup>3,4</sup>

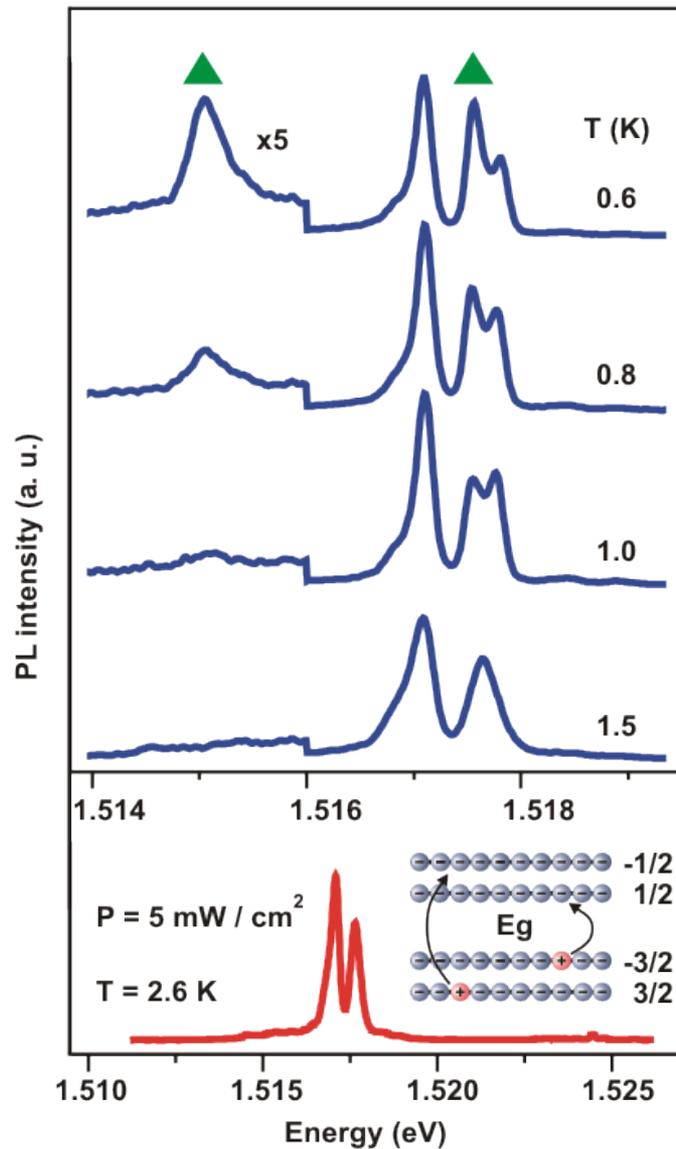
Спин-триплетные  $S=1, S_z = \{-1, 0, 1\}$   
 МАГНИТОЭКСИТОНЫ



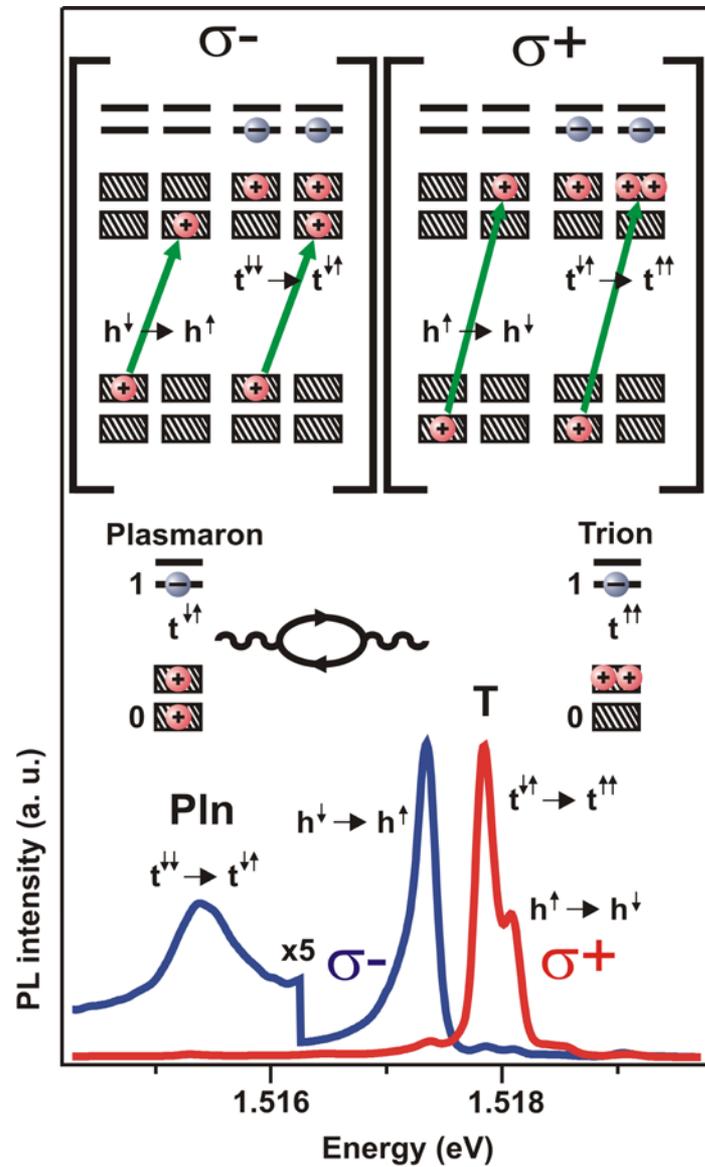
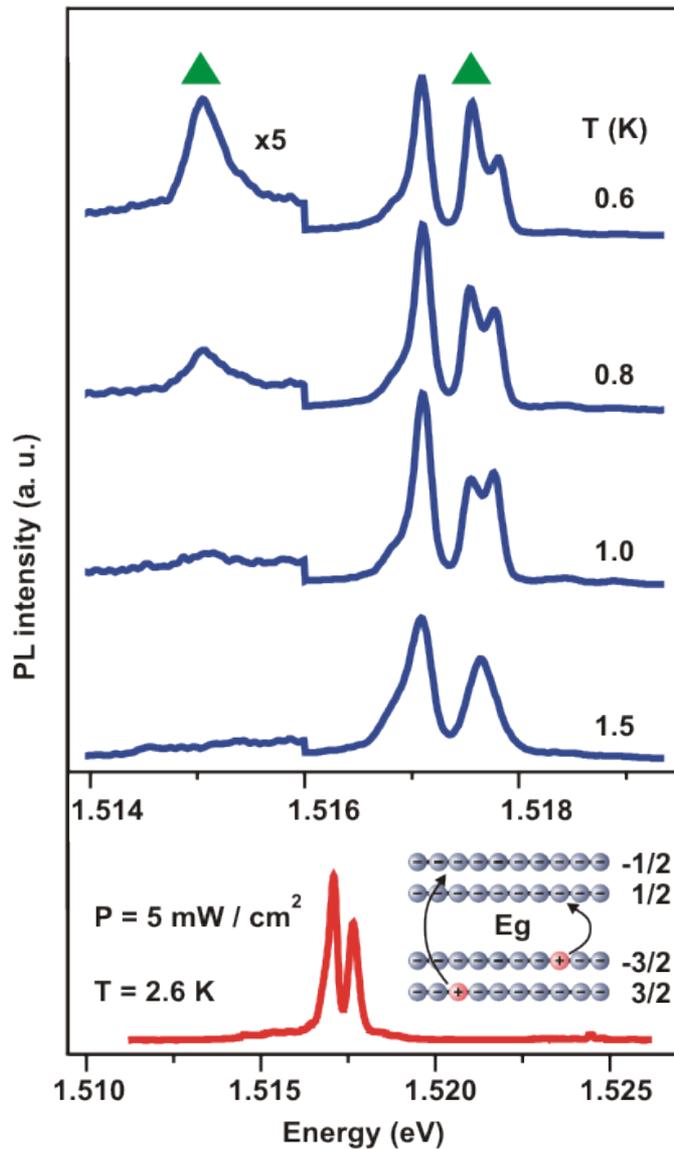
$$\Delta = \ln 2 - 1 = -0.3068\dots$$

$$Ry = \frac{m_e e^4}{\hbar^2 \epsilon^2}$$

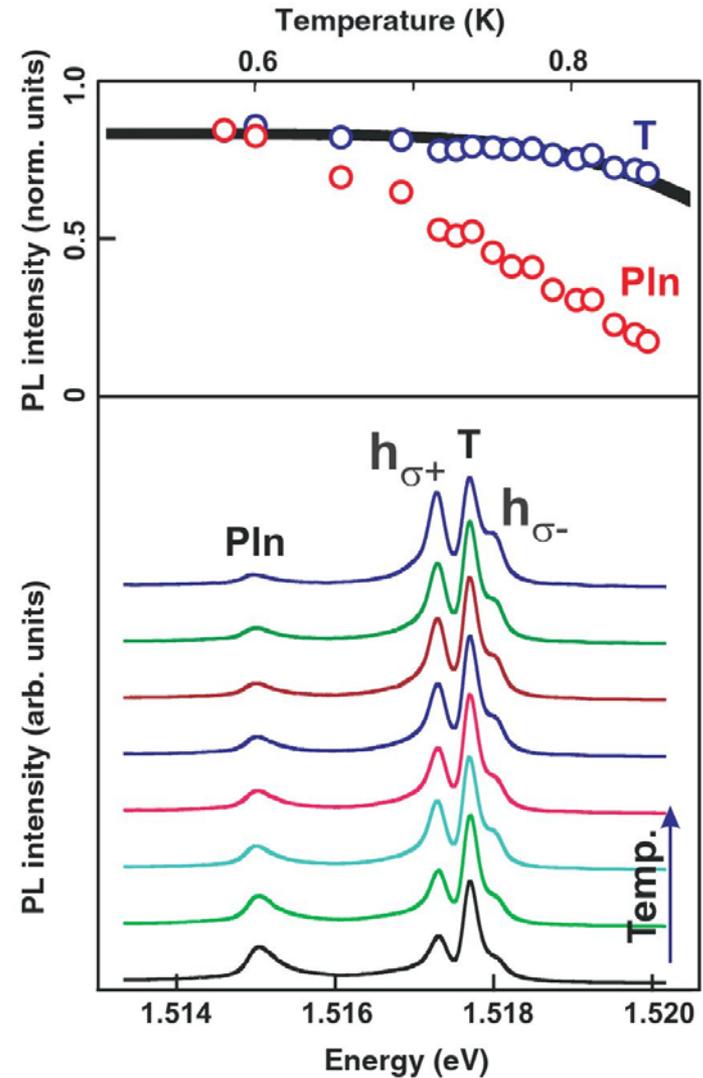
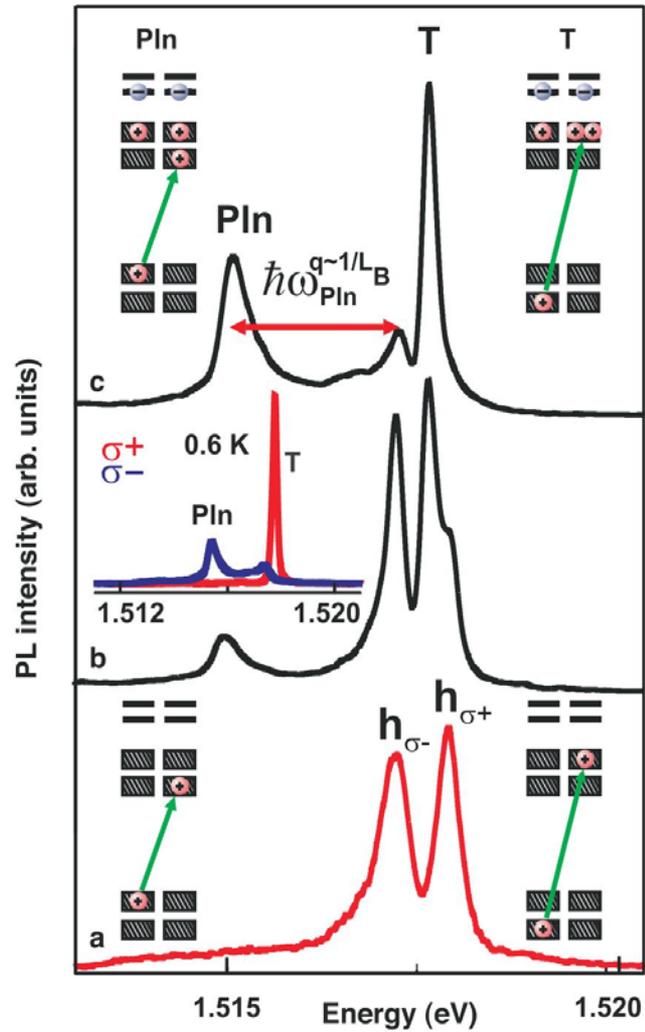
# Фотолюминесценция возбужденного холловского диэлектрика



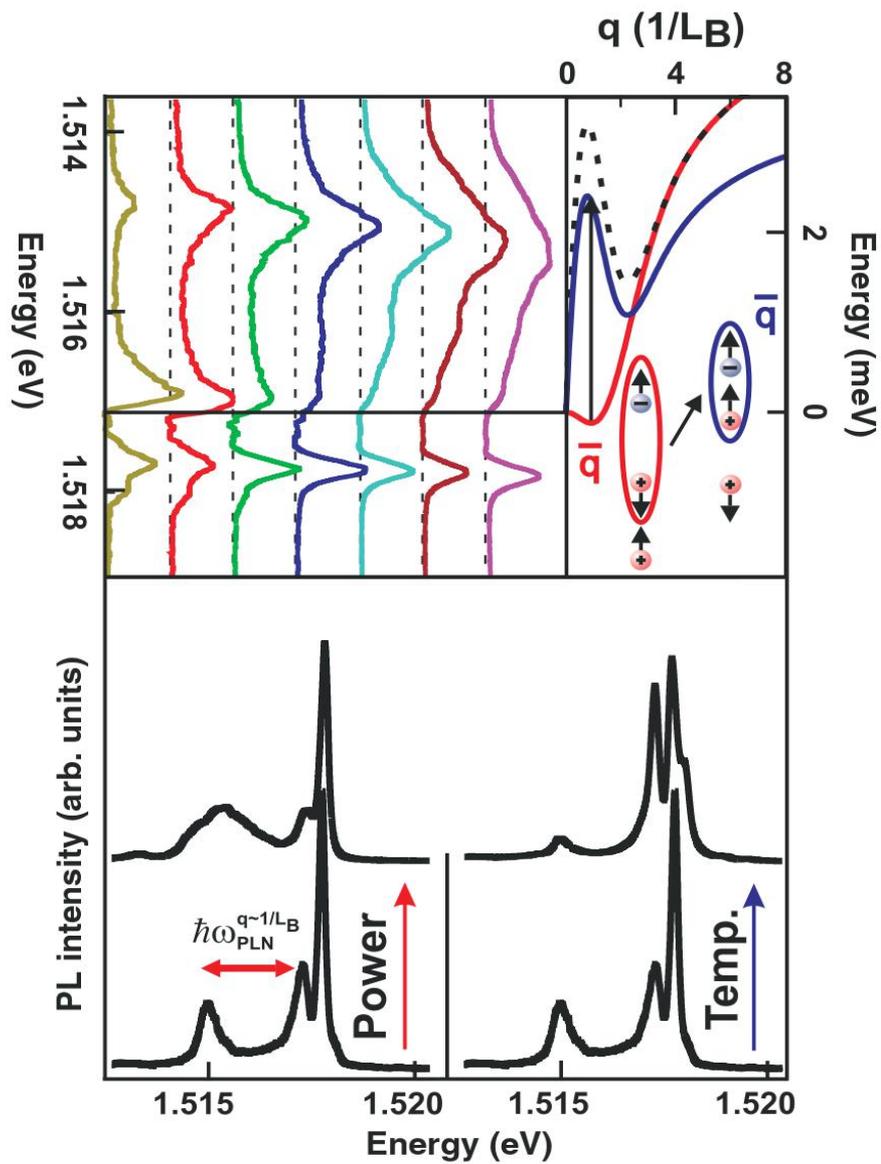
# Возможные оптические переходы



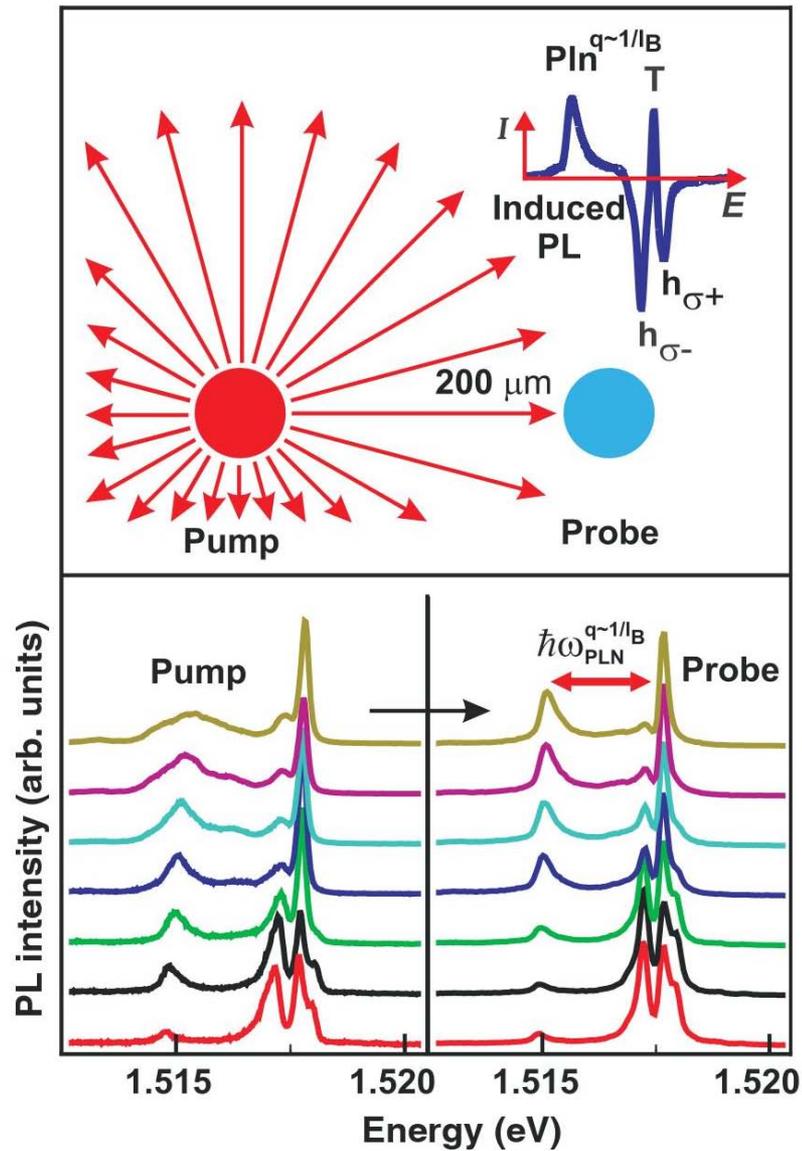
# Трионы (T) и Плазмароны (PIn)



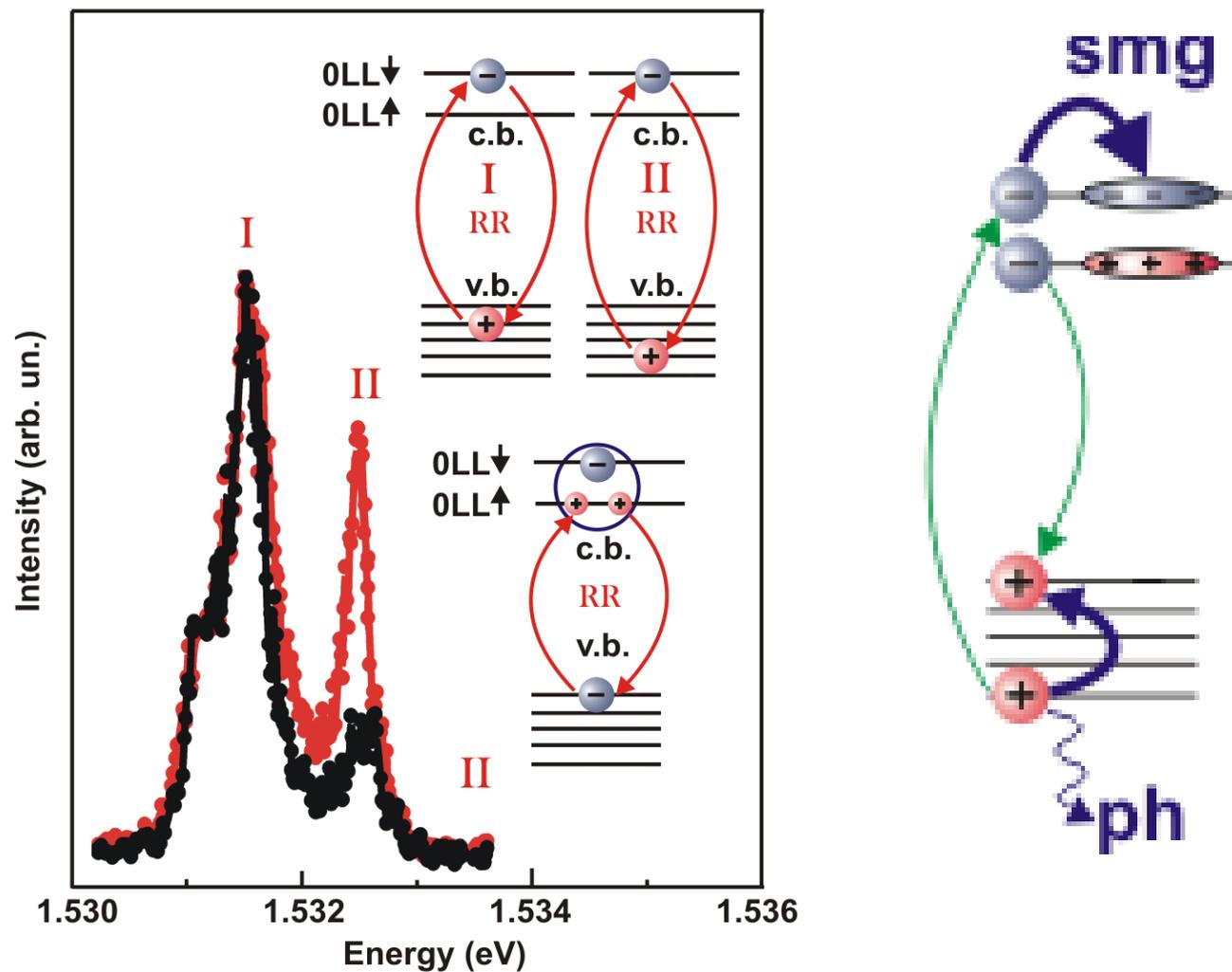
# Трионы (Т) и Плазмароны (PIn)



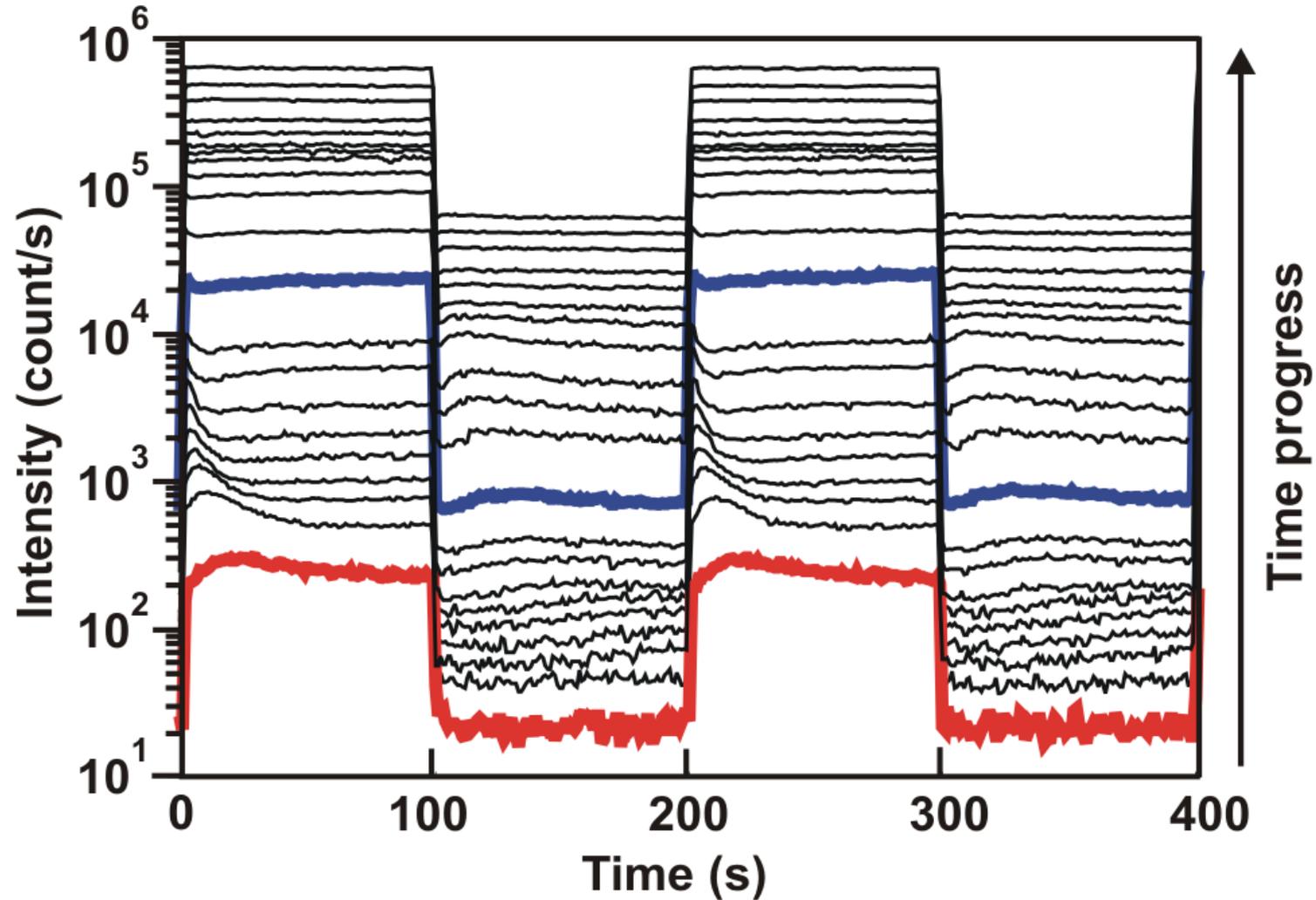
# Перенос магнитоэкситонов с определенным импульсом



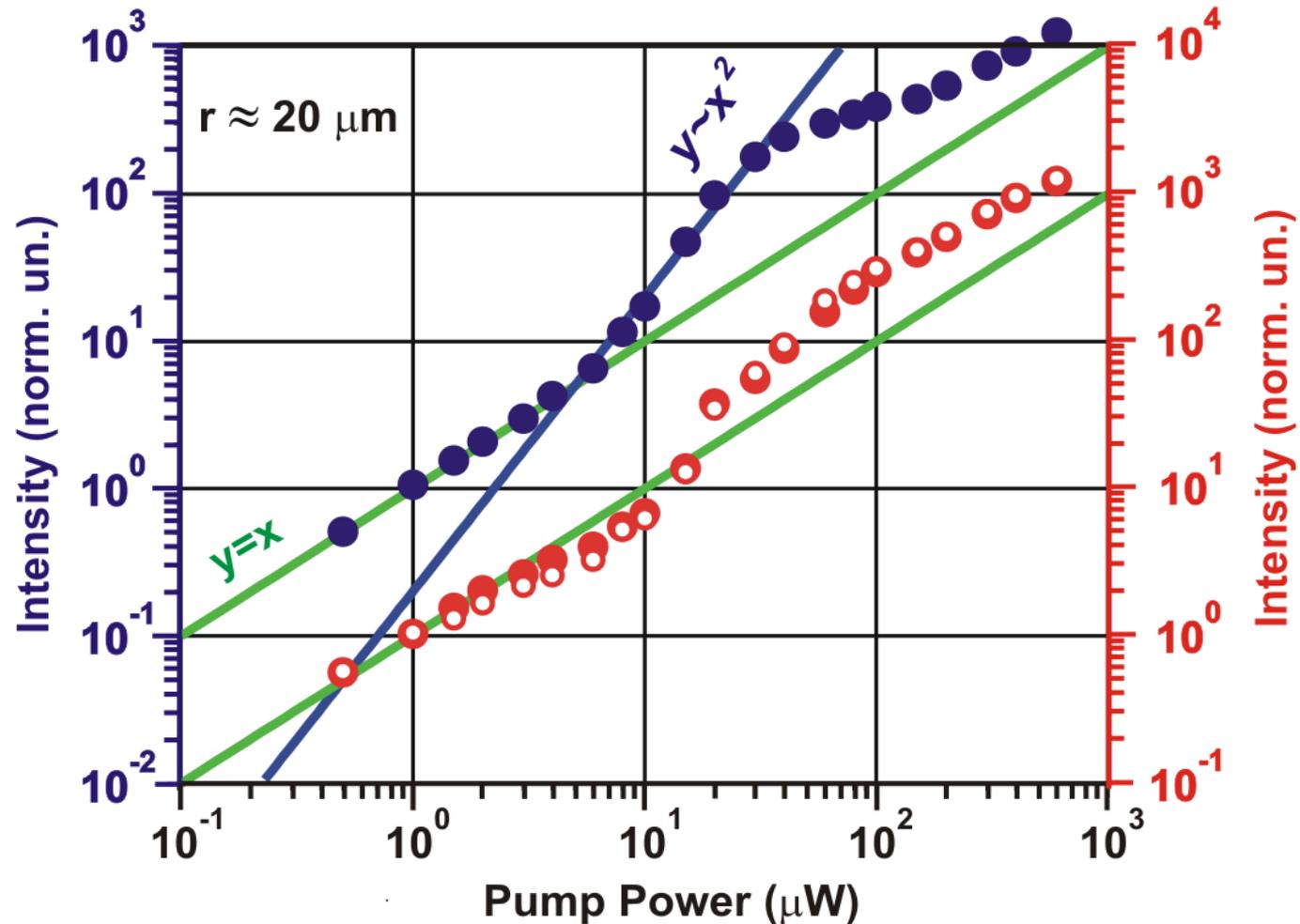
# Фотоиндуцированное Резонансное Отражение



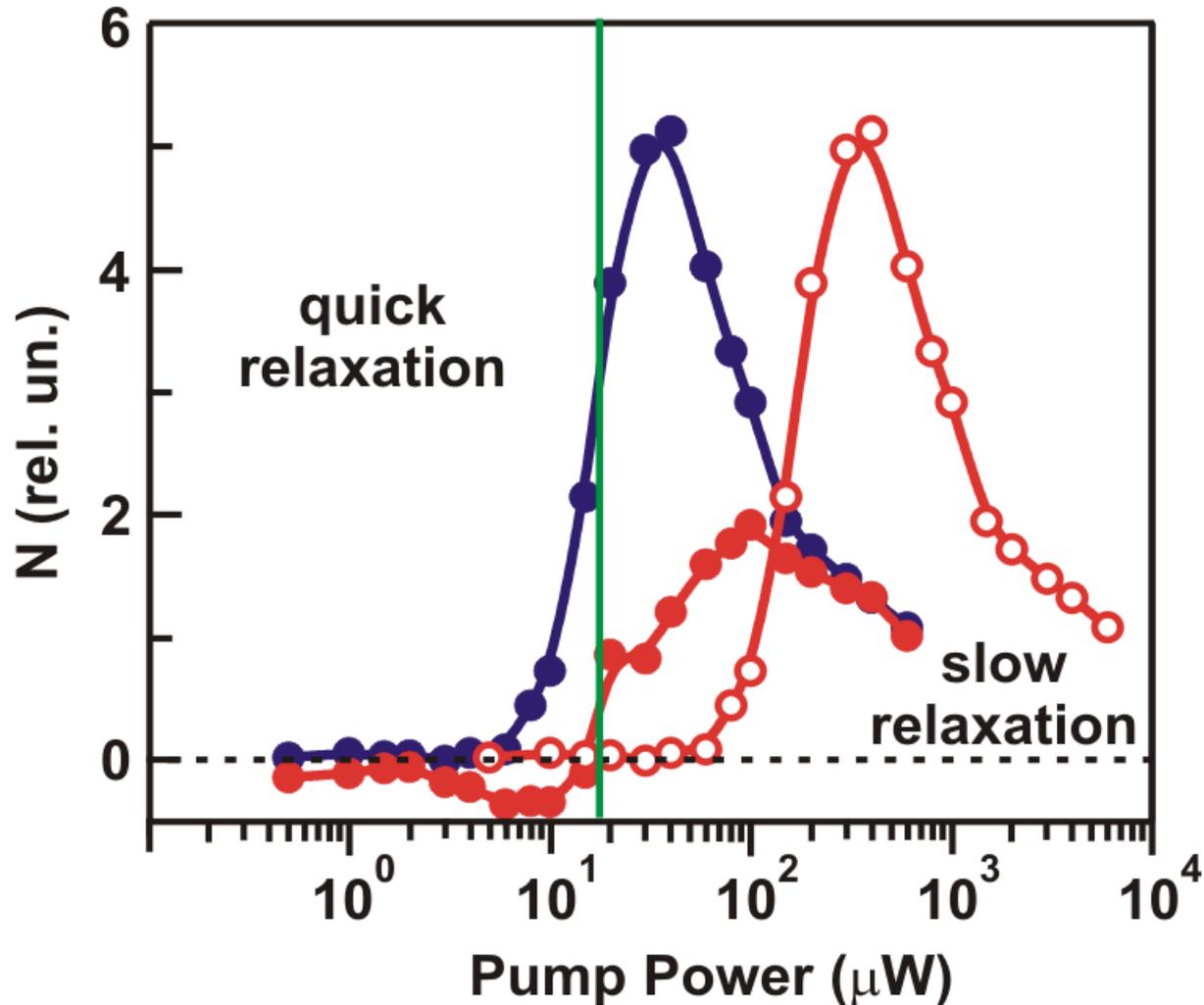
# Зависимость от мощности и времена релаксации



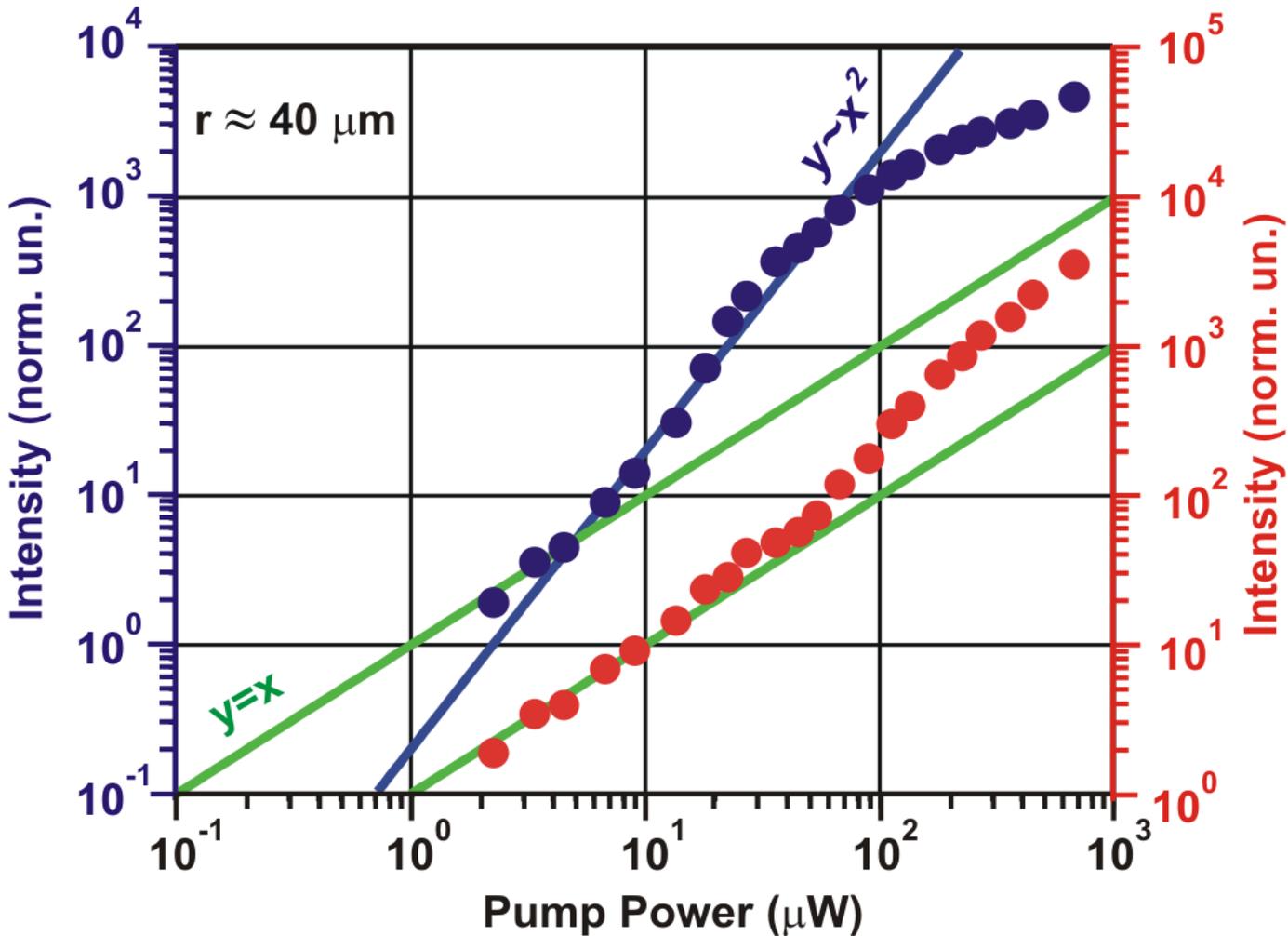
# Зависимость от мощности и времена релаксации



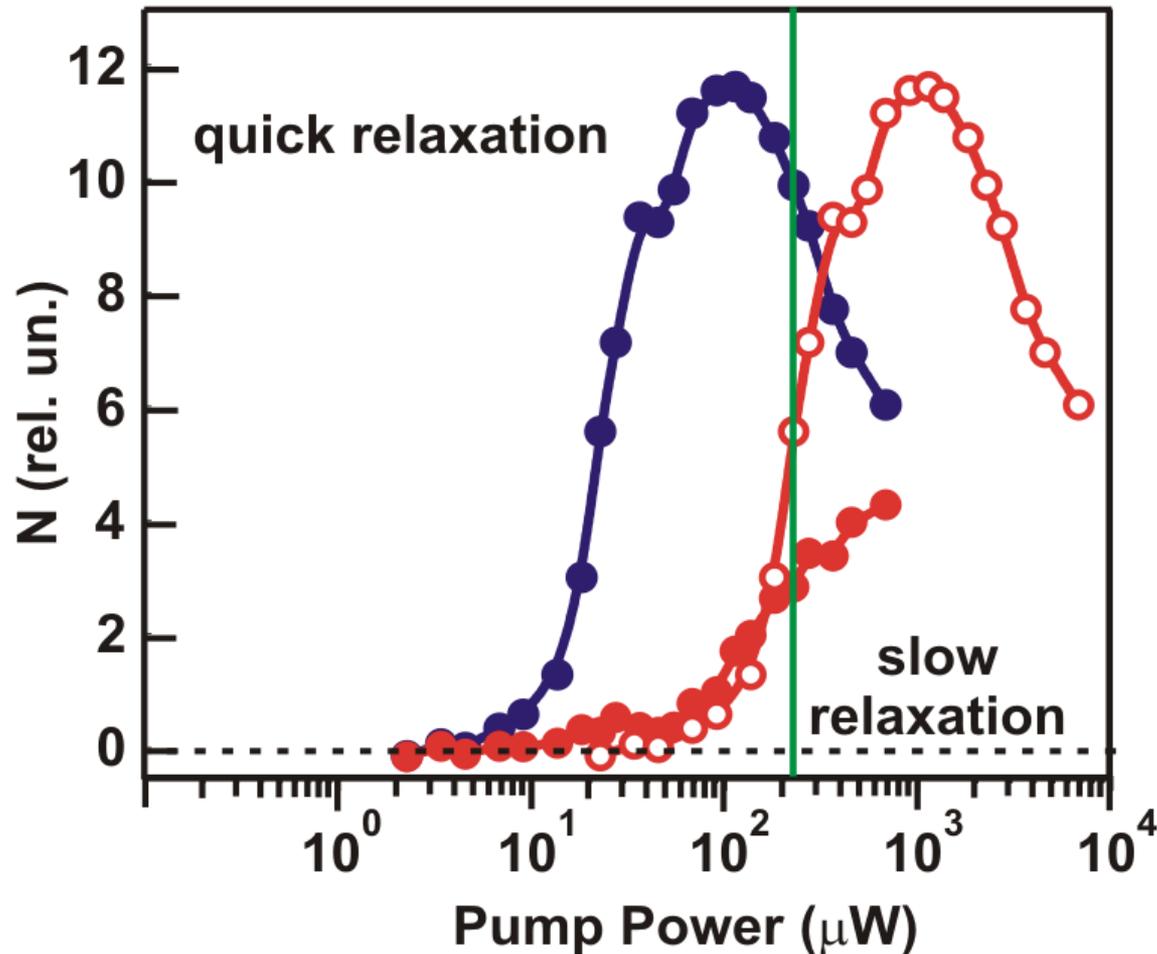
# Зависимость от мощности количество возбуждений



# Зависимость от мощности и времена релаксации



# Зависимость от мощности количество возбуждений



# Зависимость от мощности количество возбуждений

