

Холодная плазма в твердом ксеноне

Е.Б. Гордон

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

Б.М. Смирнов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов

*Институт энергетических проблем химической физики РАН,
Черноголовка*

Москва 2008

Равновесная плазма (≈ 10 эВ/атом)

$$\Delta G = -T \Delta S + \Delta E + P \Delta V$$

Газ

Высокая равновесная степень ионизации вещества обычно осуществляется увеличением температуры T

Твердое тело

Высокая равновесная степень ионизации вещества обычно осуществляется сильным увеличением давления P .

Неравновесная плазма

Принятым способом реализации является наложение на вещество электрического поля с тем, чтобы свободные носители заряда приобретали в этом поле энергию, достаточную для рождения ими новых носителей.

Газ

Газовый разряд

позволяет изучить возбуждения индивидуальных частиц, как при низких, так и при высоких T .

Твердое тело

Твердотельный разряд ???

возбуждения

конденсированного

состояния при низких и высоких P ????

Самое простое твердое тело –
конденсированные инертные газы

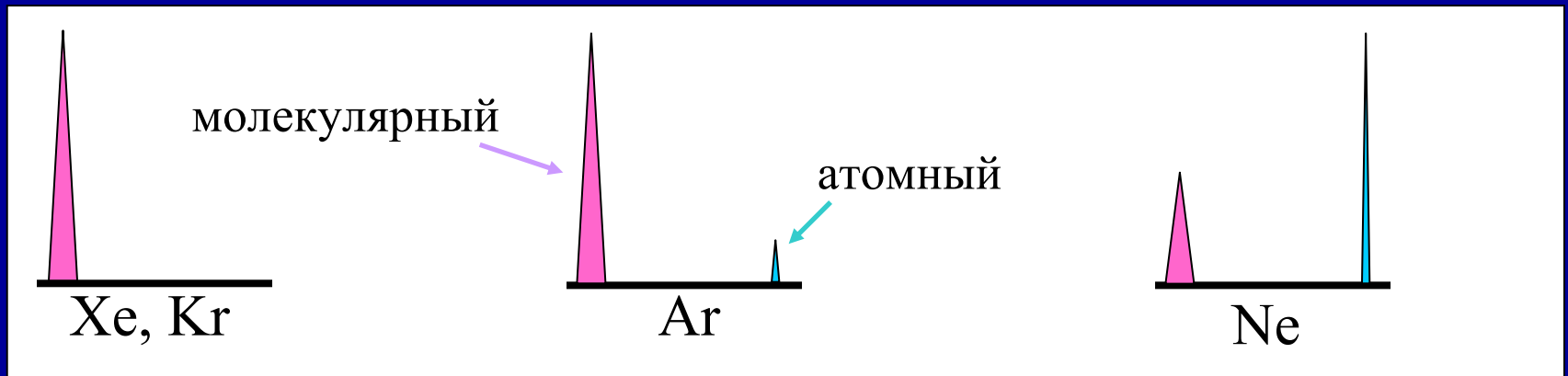
- - **отсутствие химических связей**
- - **кристаллический порядок – просто плотная упаковка**

Возбуждение твердого инертного газа



Прямое возбуждение A_2^* невозможно из-за большой разницы его равновесного расстояния и расстояний в кристалле.

Он образуется из атомного возбуждения в химической реакции



В ксеноне излучения одноцентрового экситона не наблюдается

Несмотря на коллективный характер возбуждений в кристалле все характеристики экситонов – положение линий, времена жизни - близки к значениям для их газофазных аналогов:

Причины

- Молекулярный экситон – эксимерная молекула → широкая полоса
- Одноцентровый экситон – возбужденный атом → расталкивание в решетке ???

Движение избыточного электрона по конденсированному инертному газу

Дрейф, как и в газе,

- $m \approx m_e$

- Подвижность \rightarrow

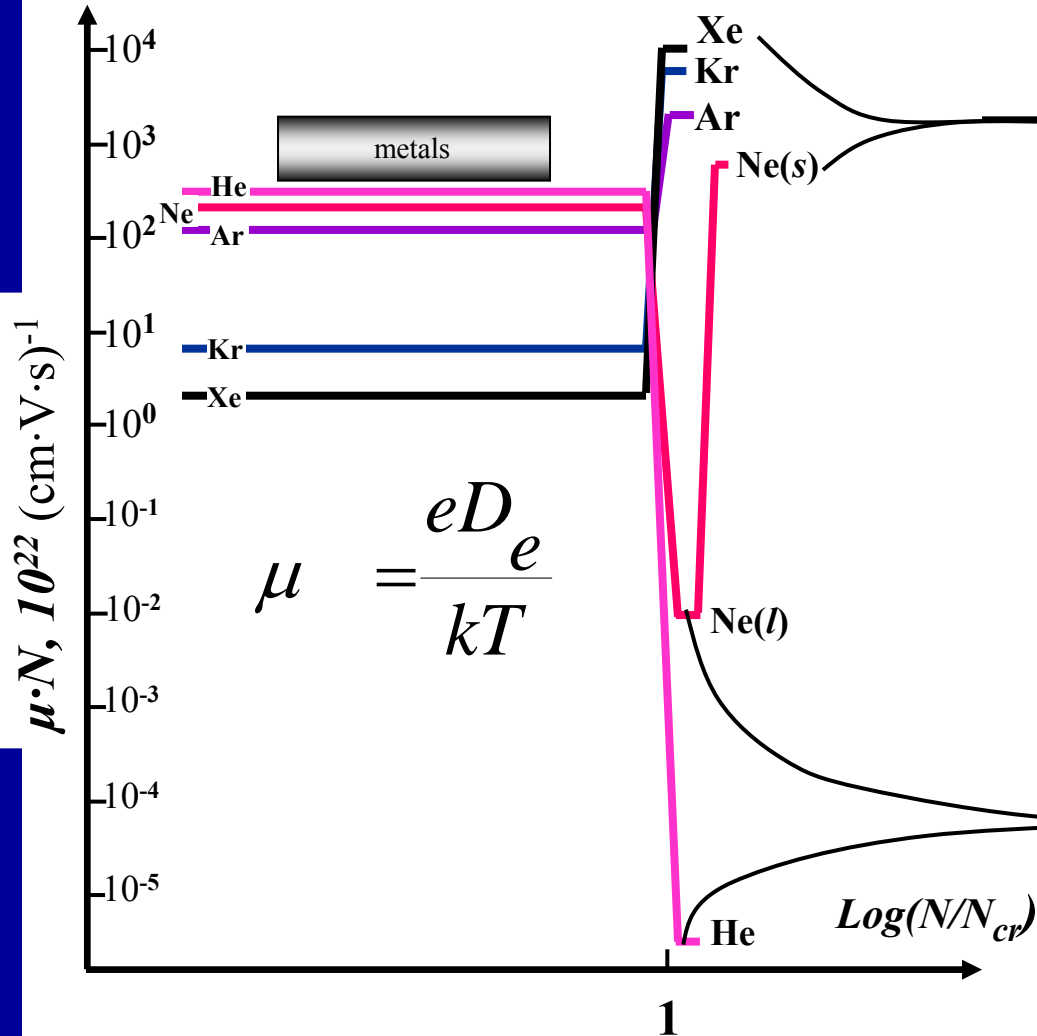
Длина свободного пробега \rightarrow

Коэффициент диффузии электрона \rightarrow

Сечение упругого рассеяния электрона

Должно быть таким как и в газе

Excess electron mobility in gaseous, liquid and solid rare gases (experiment)

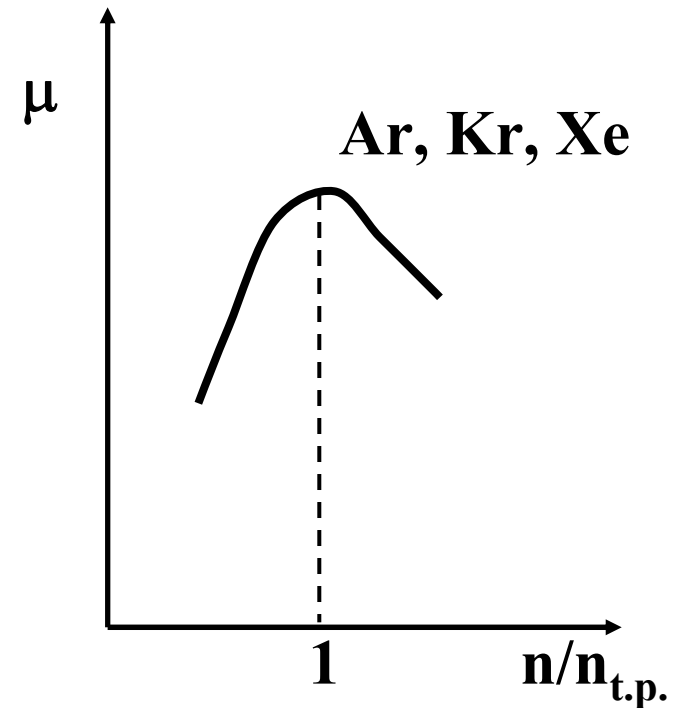
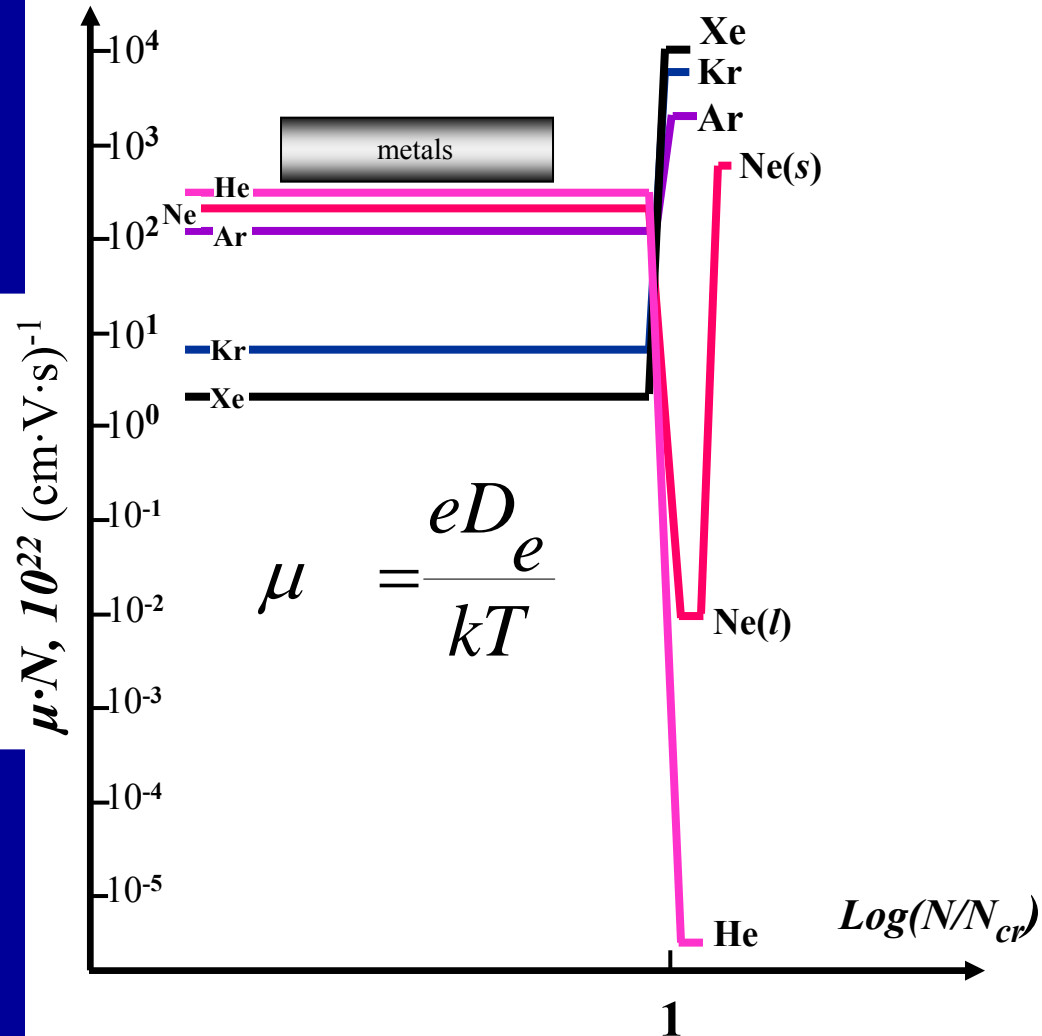


Electron analog of Huygens principle for light:

Coherent scattering of a wave on numerous scatters should restore the wave front

Bubble formation

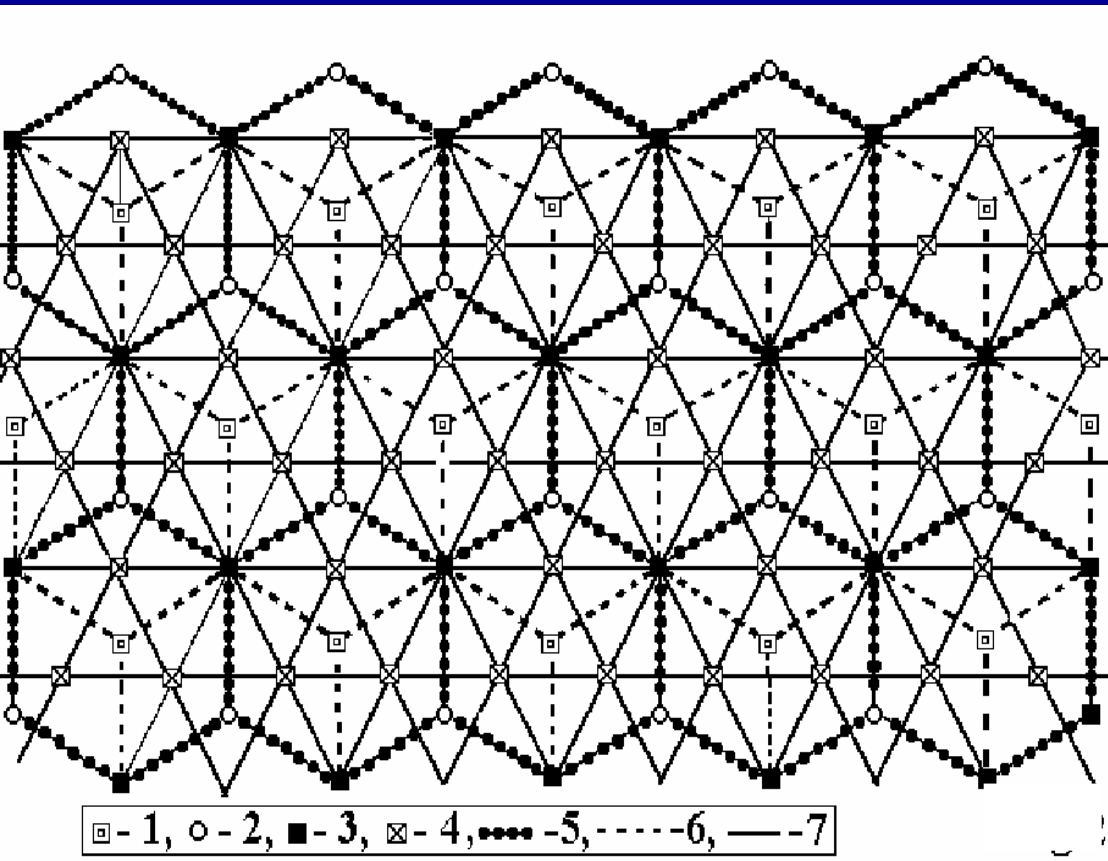
Excess electron mobility in gaseous, liquid and solid rare gases (experiment)



Случайность или закономерность?

Delone network for slow excess electron motion in condensed rare gas

E.B. Gordon, B.M. Smirnov. JETF, v. 101, p. 186-195, 2005.



- 1 - positions of atoms of the first layer,
- 2 - positions of atoms of the second layer,
- 3 - vertices of pentagons being intersections of the Voronoi surface with the layers,
- 4 - positions of the Voronoi surface for an excess electron moving between the layers,
- 5, 6 - pentagons - intersections of the Voronoi surface with the corresponding layers,
- 7 - directions of electron current located in the middle plane

Solid lines are the axes of tubes where electrons move with small friction

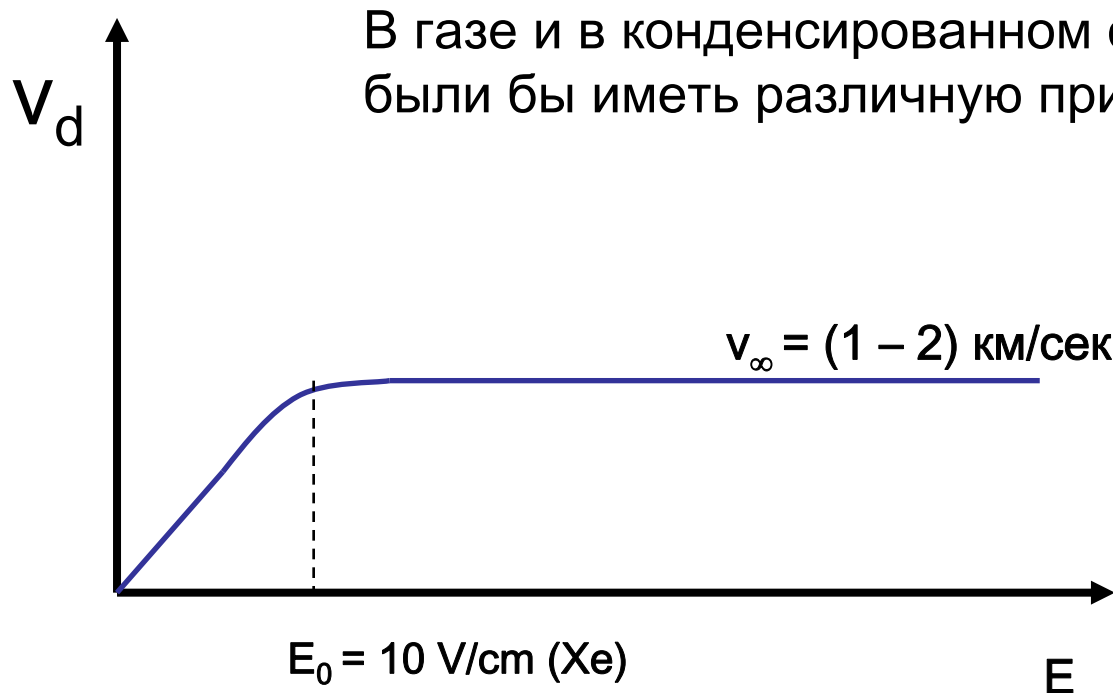
Интерференция рассеянных электронов – изменение индикатрисы рассеяния

Идея –
организовать электрический разряд в
твердом ксеноне

1. *E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky. Quantum Electronics 21, 227 (1994)*
2. *E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky, Chem. Phys. Lett. 217, 605 (1994).*

Вопрос №1

Сохранится ли высокая подвижность для горячих (несколько эВ) электронов – возможность разгона ?



В газе и в конденсированном состоянии должны были бы иметь различную природу

$$V/v_d \approx (M/m)^{1/2} \\ \approx 1000 (\text{Xe})$$

Вопрос №1

Сохранится ли высокая подвижность для горячих (несколько эВ) электронов – возможность разгона ?

- **Да (экситонная ВУФ электролюминесценция)**
S. Schussler, J. Burghoorn, P. Wyder, et al., Appl.Phys. Lett. 2000, 77, 2786 (жидкость)

A. Usenko, G. Frossati and E. B. Gordon, Phys.Rev.Lett., 2003, 90, 153201 (твердое тело)

Вопрос №2

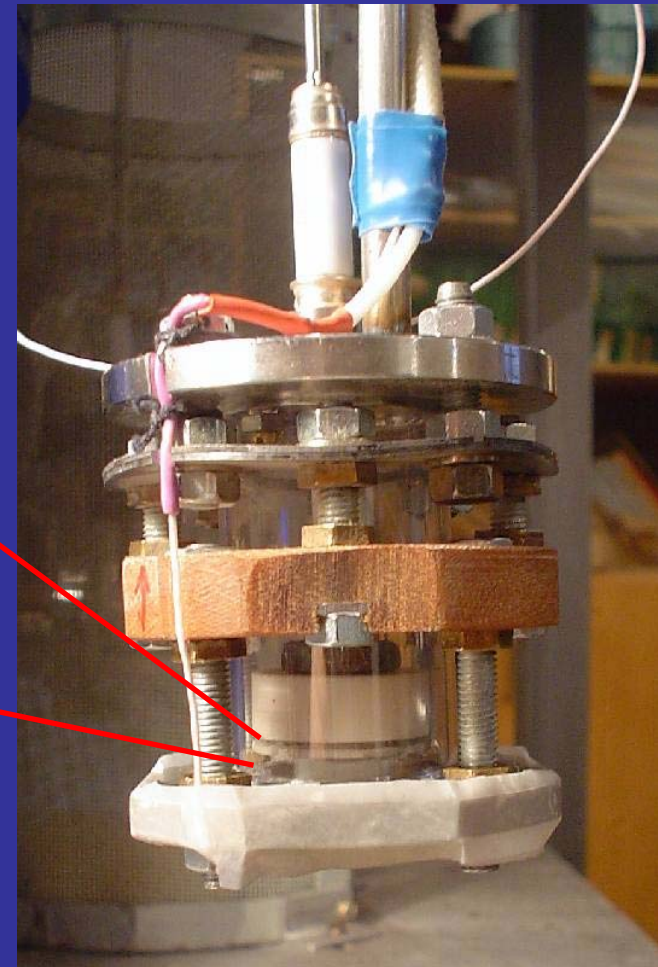
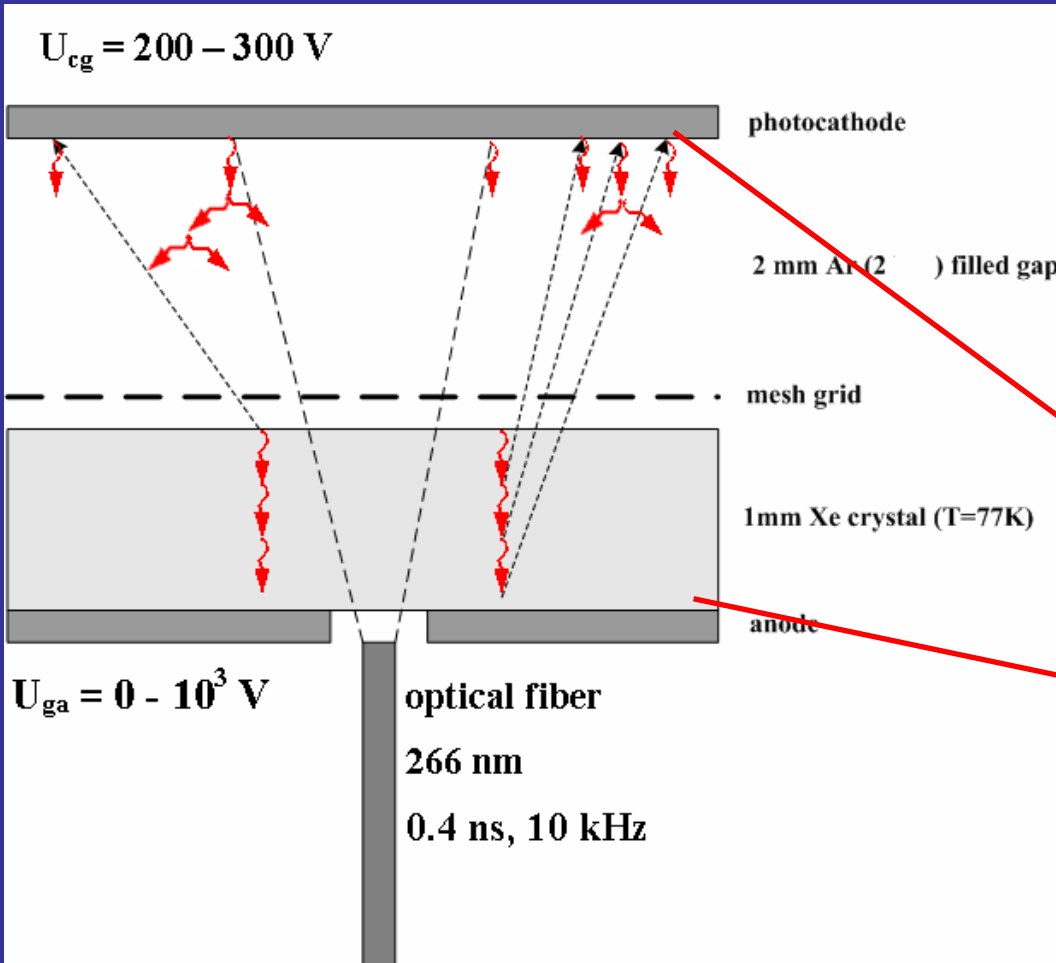
**Возможна ли ионизация матрицы
быстрыми электронами?**

- Нет

**Для организации разряда надо
использовать внешний катод,
чувствительный к люминесценции
ЭКСИТОНОВ.**

Idea of the experiment

and its realization



1. Positive feedback – VUV photons from Xe crystal
2. Electron avalanche – in low density gas

Gas multiplier gain coefficient $\sim 10^3$

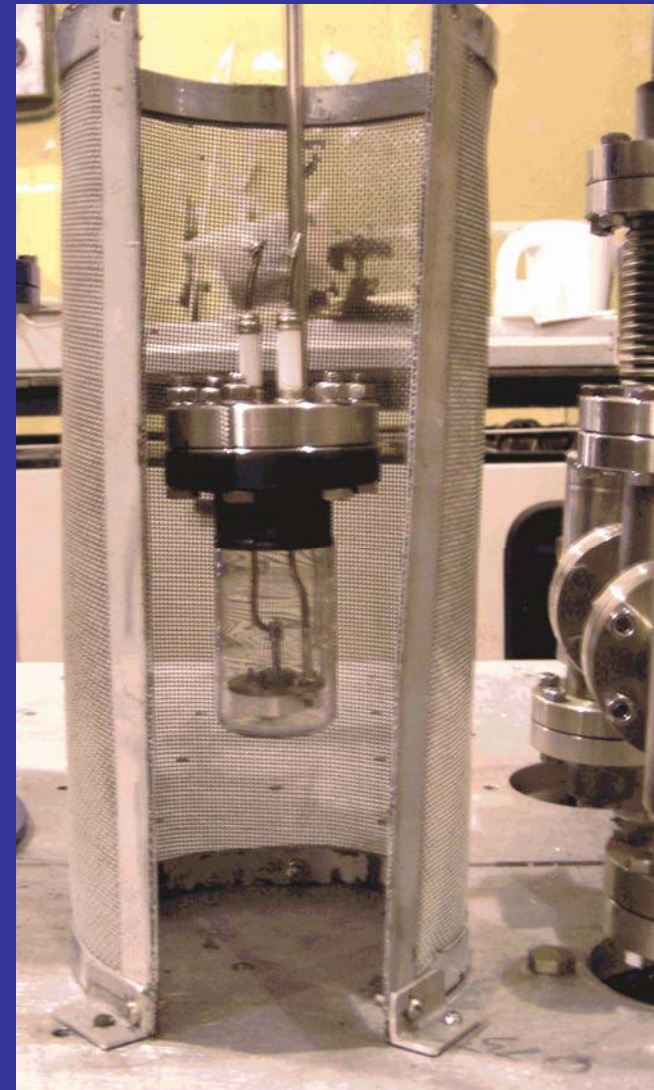
Efficiency of photoelectron emission from Zn $\sim 10^{-3}$

VUV emission yield per electron drifted through Xe crystal – 10 – 1000

Experimental setup

(high vacuum components, turbopump)

Embedded system of xenon
deep (10^{-10}) purification
(electrospark technique)



Optical cryostat (77 – 150K) with sapphire
windows



Как устранить погасание заряда из-за накопления пространственного заряда на примесях ($X/N < 3 \cdot 10^{-10}$)

Сечение распада примесного отрицательного иона при столкновении с горячим электроном



гораздо выше чем для его образования,



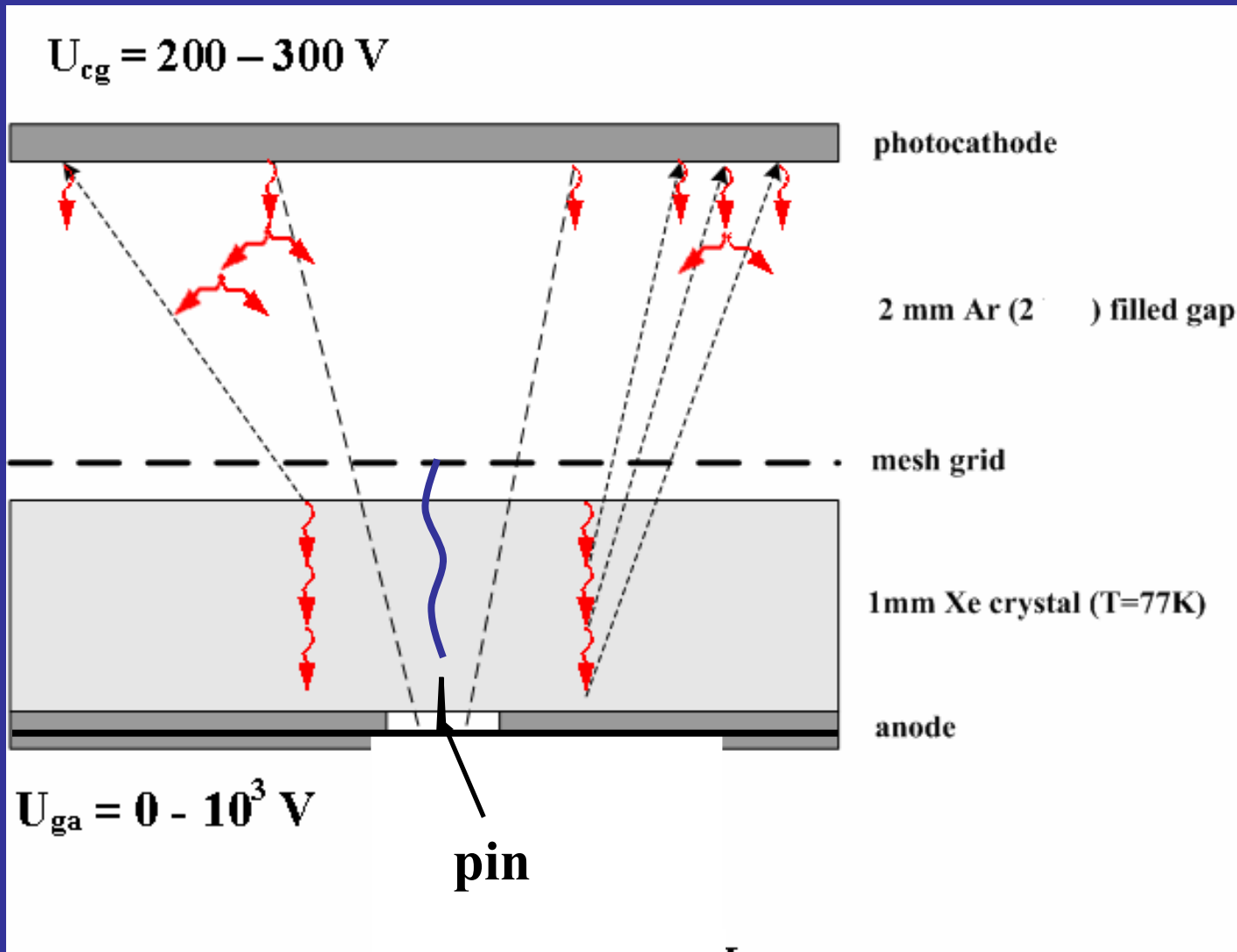
Поэтому при достаточно высоком токе электронов ионов может стать мало – надо только суметь возбудить сильный ток в каком-то месте – дальше расползется

Вопрос №3

**Как избежать погасания разряда при
заполнении примесных ловушек
электронами?**

- **Решение**

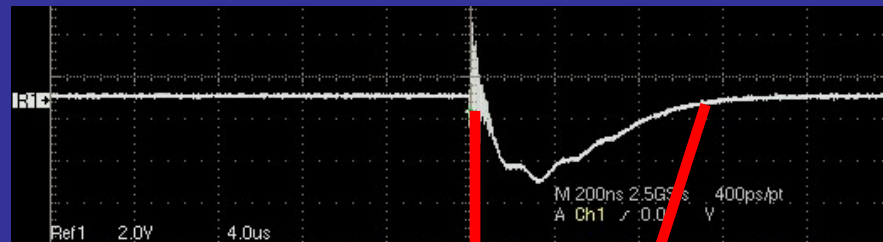
**Возбуждать разряд мощной искрой с
вольфрамовой проволочки,
расположенной по оси**



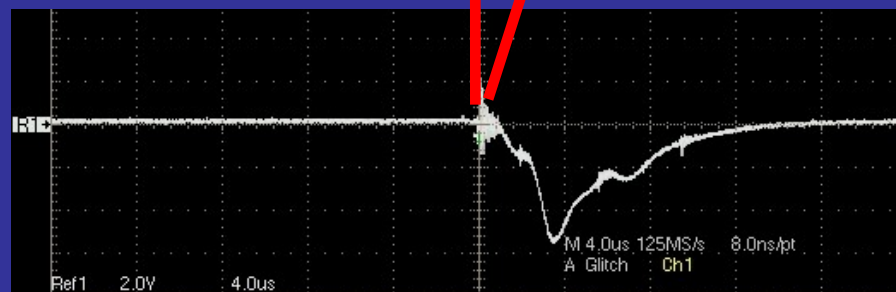
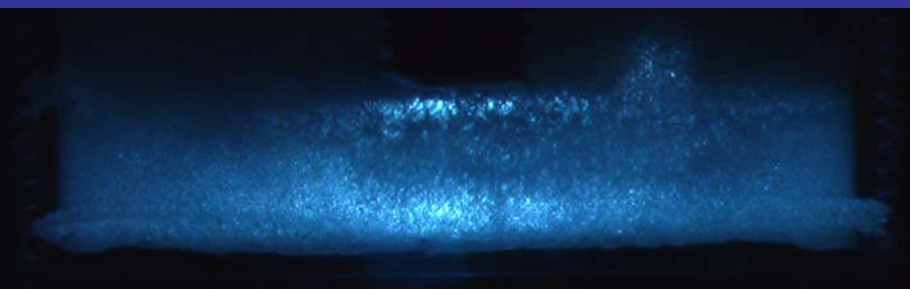
**Просто поместили вольфрамовую
проволочку по центру анода**

Временные характеристики

“Spark” is rather short

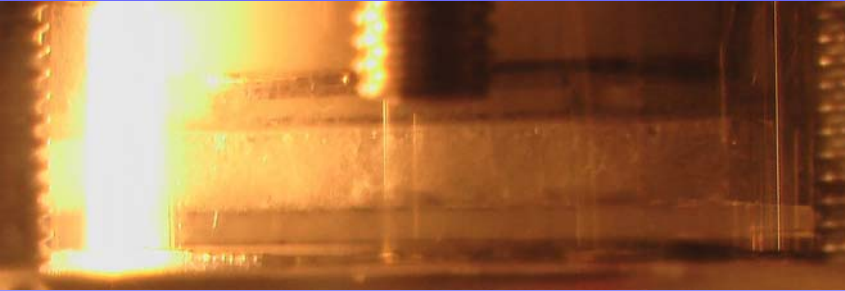


Every from several (four) successive sparks is followed by the regeneration discharge peaks with “time-of-drift” duration



CW discharge in Xe crystal (spark ignition)

The different regimes of electron current



$$U_{ga} = 2.4 \text{ kV}; \quad U_{cg} = 0$$



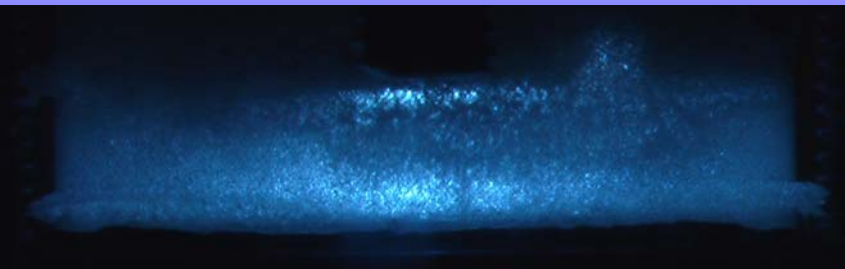
← Sample without discharge



$$U_{ga} = 2.4 \text{ kV}; \quad U_{cg} = 100 \text{ V}$$



← Short spark



$$U_{ga} = 2.4 \text{ kV}; \quad U_{cg} = 100 - 200 \text{ V}$$



← Long discharge

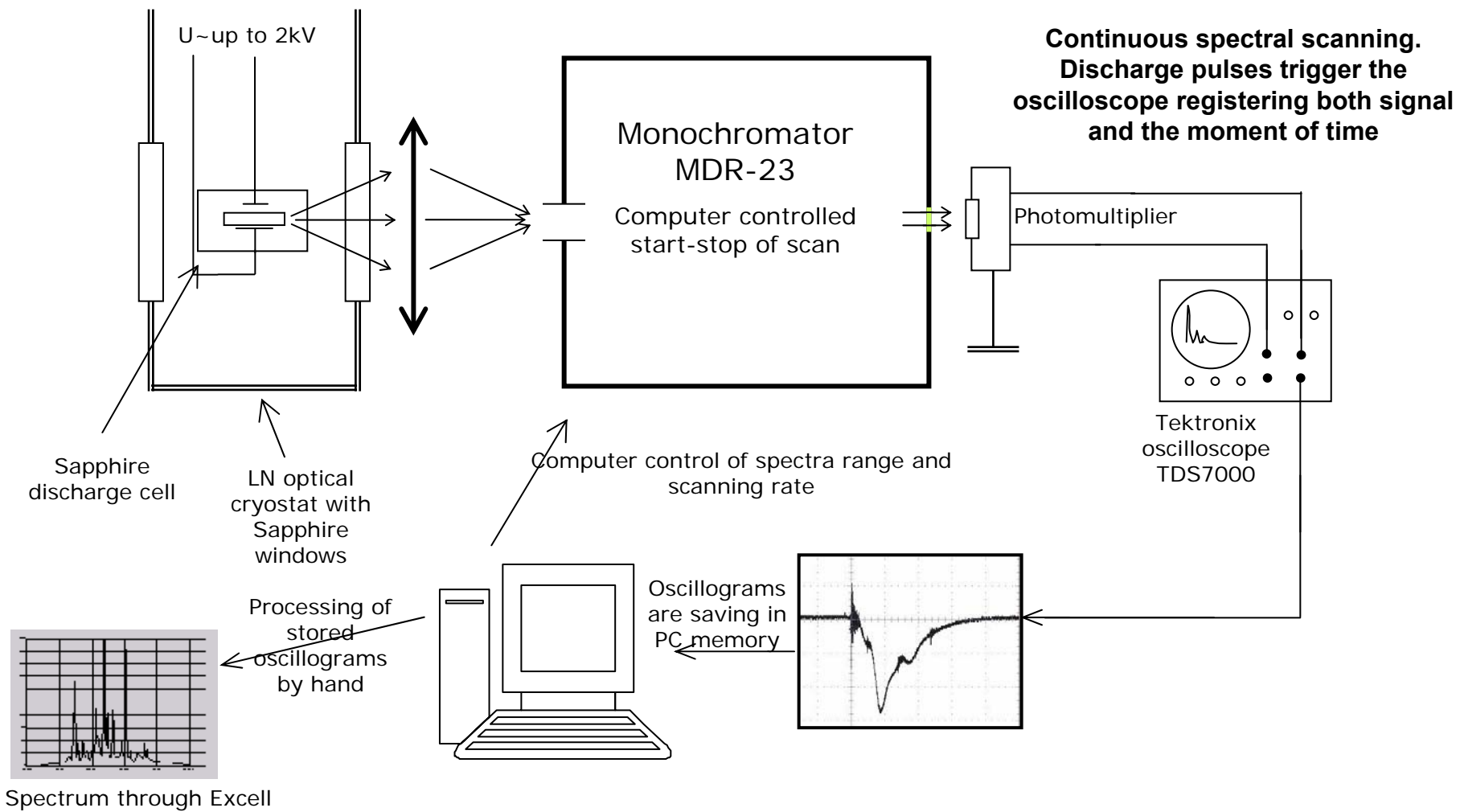


$$U_{ga} = 2.4 \text{ kV}; \quad U_{cg} > 200 \text{ V}$$

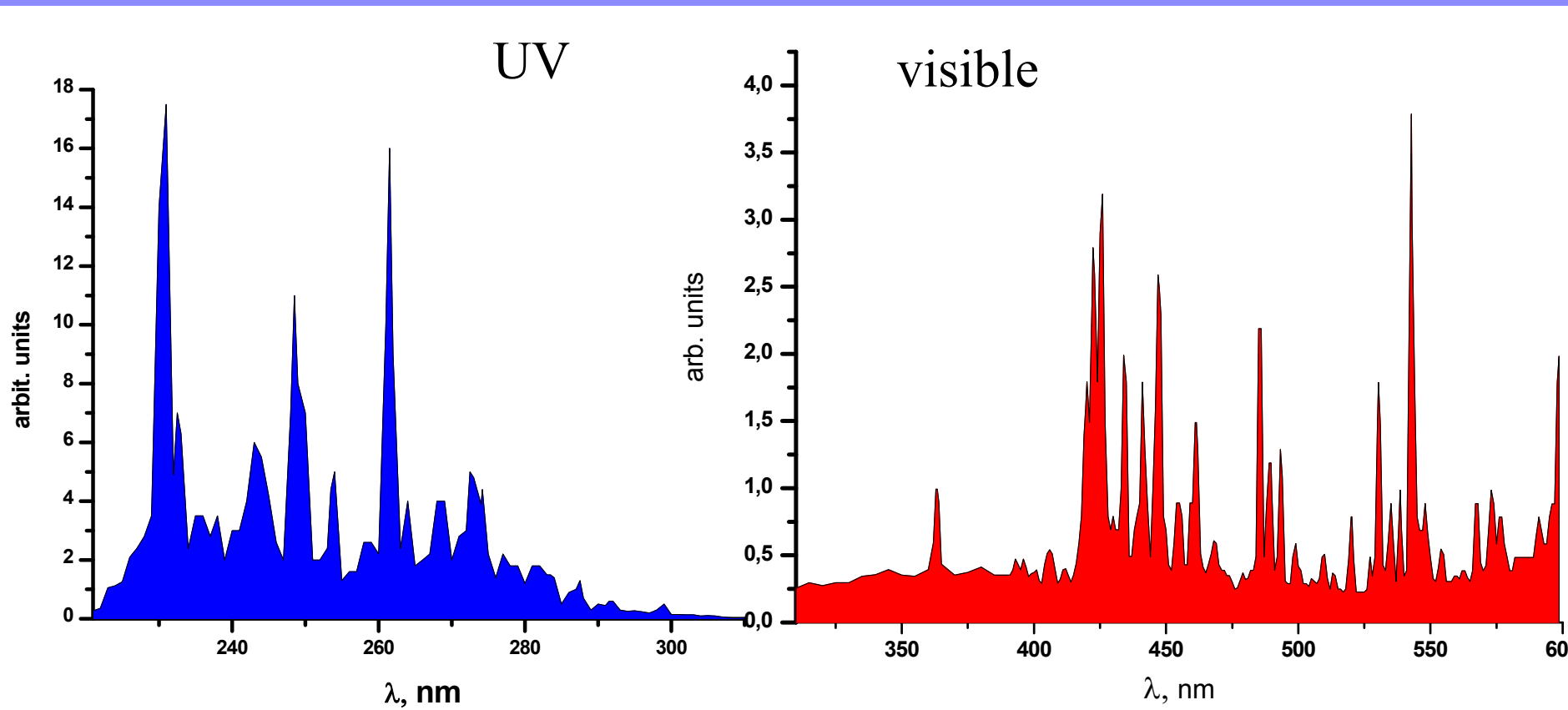


← Glow !!!

Acquisition data system



Спектры электролюминесценции ТВОРДОГО КСЕНОНА



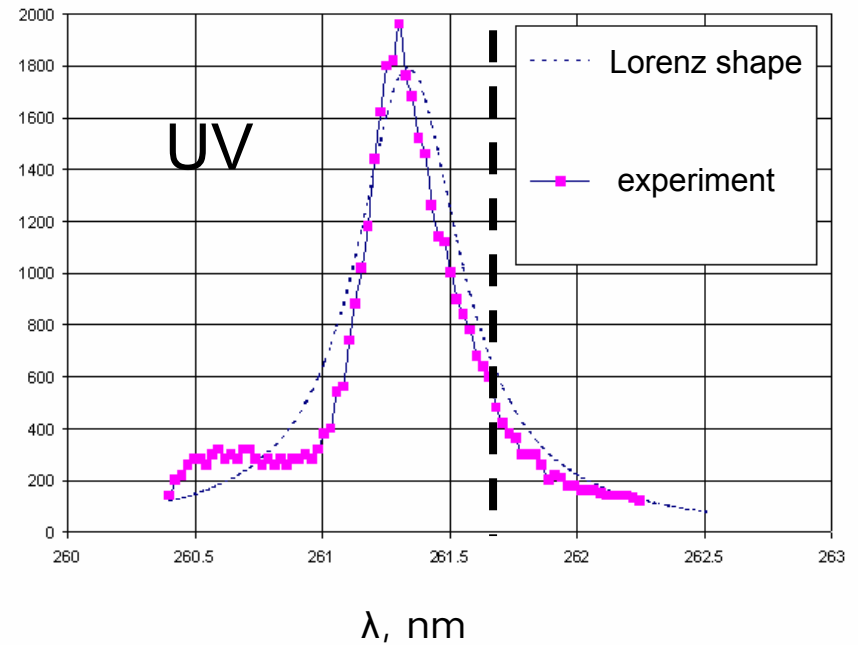
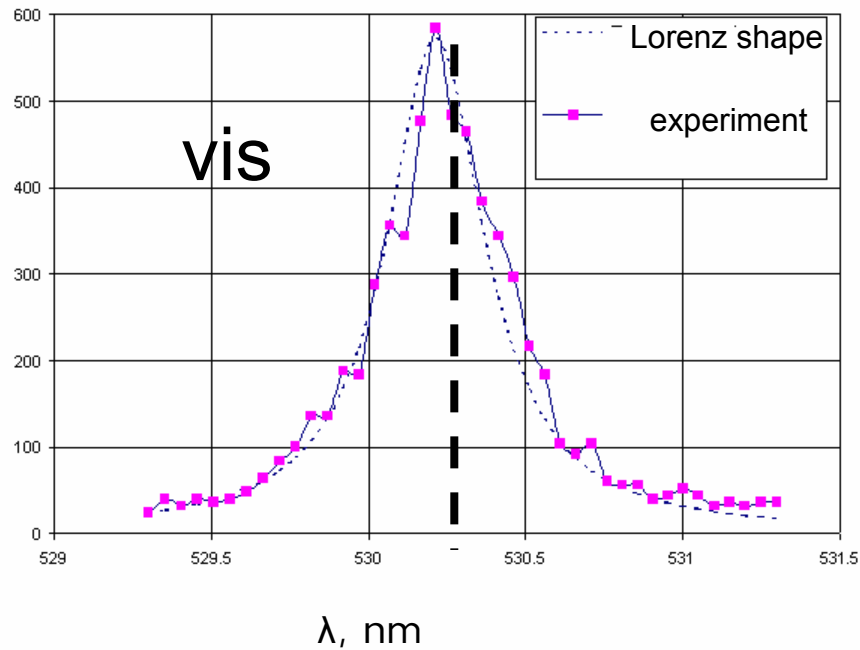
Emission lines positions

Line positions, nm our data	Intensity	Line positions, nm gas discharge [15]	Intensity	Line shift	Line positions, nm our data	Intensity	Line positions, nm gas discharge [15]	Intensity	Line shift
		197,26	C		361,39	B			
203,712	C				395,074	C			
209,180	C				403,927	C			
210,750	C				405,883	C			
212,226	C				416,154	C			
225,294	C				418,29	B	418,01	A	0.28
229,350	A	229,60	C	-0.25			420,85	B	
231,364	B				421,562	B	421,56	B	0.00
234,084	A						423,83	B	
234,342	B	234,45	C	-0.11	424,724	A	424,54	B	0.18
242,263	C	242,51	C	-0.25	433,424	B	433,05	A	0.37
247,446	A	247,59	C	-0.14	439,711	B			
249,080	A				446,5	A	446,22	A	0.28
250,927	B				—		450,10	B	
252,373	B				—		452,47	B	
253,163	B						458,55	B	
253,564	B				—		458,27	B	
260,353	A	260,69	C	-0.34	460,273	A	460,30	B	-0.03
271,631	C				—		462,42	A	
273,250	C	273,41	C	-0.21	—		467,12	A	
286,200	C	286,47	B	-0.32	484,447	A	484,43	A	0.017
290,583	C				487,7	C			
297,893	C	297,93	B	-0.08	488,328	B	488,35	B	-0.02
		312,19	B		492,137	A	492,15	B	-0.01
					—		492,32	B	
					519,1	C			
					526,245	C			
					529,265	A	529,22	A	0.05
					534,025	B	533,94	A	0.09
							536,81	C	
					537,367	C			
					542,039	B	541,92	A	0.12
					—		582,39	B	

Atomic lines are bold

A - strong, B – intermediate, C - weak

Spectral lines shapes in UV and visible

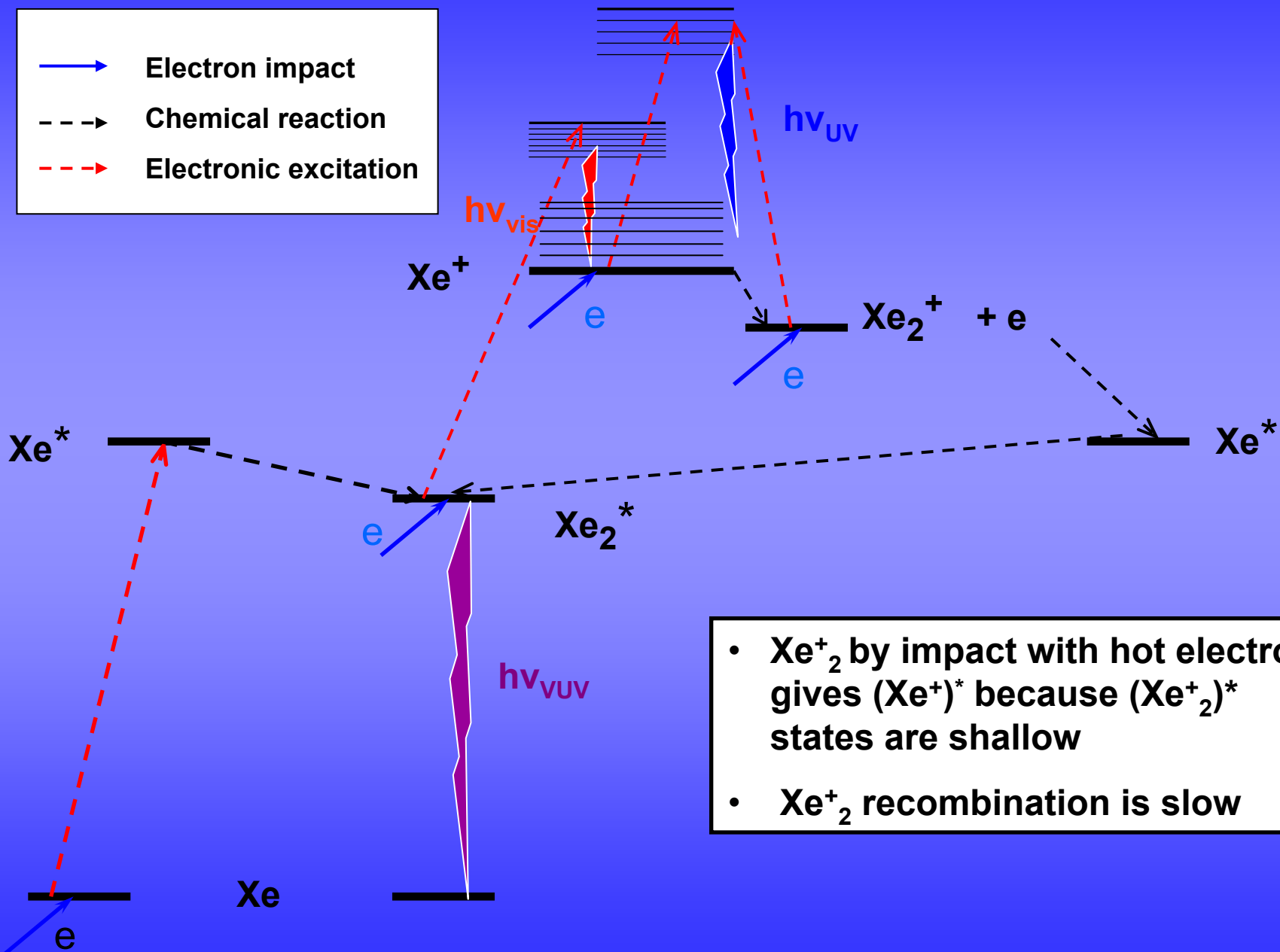


The line distortion grows with its deviation from gas position

Основные результаты

- Полностью отсутствуют линии атома Хе (He^* превращается в He_2^*)
- Линии иона He^+ слабо сдвинуты (несмотря на повышенную плотность окружения)
- Полностью отсутствуют линии молекулярного иона He_2^+ (несмотря на быстрое превращение He^+ в He_2^+)

Electron induced excitation and ionization in solid Xe



- **Xe₂⁺** by impact with hot electron gives **(Xe⁺)^{*}** because **(Xe₂⁺)^{*}** states are shallow
- **Xe₂⁺** recombination is slow

Влияние давления

- - падение подвижности электронов
- - изменение строения молекулярных экситонов и ионов



- - металлизация давлением (экспериментально доказана только для Хе)

Металлы

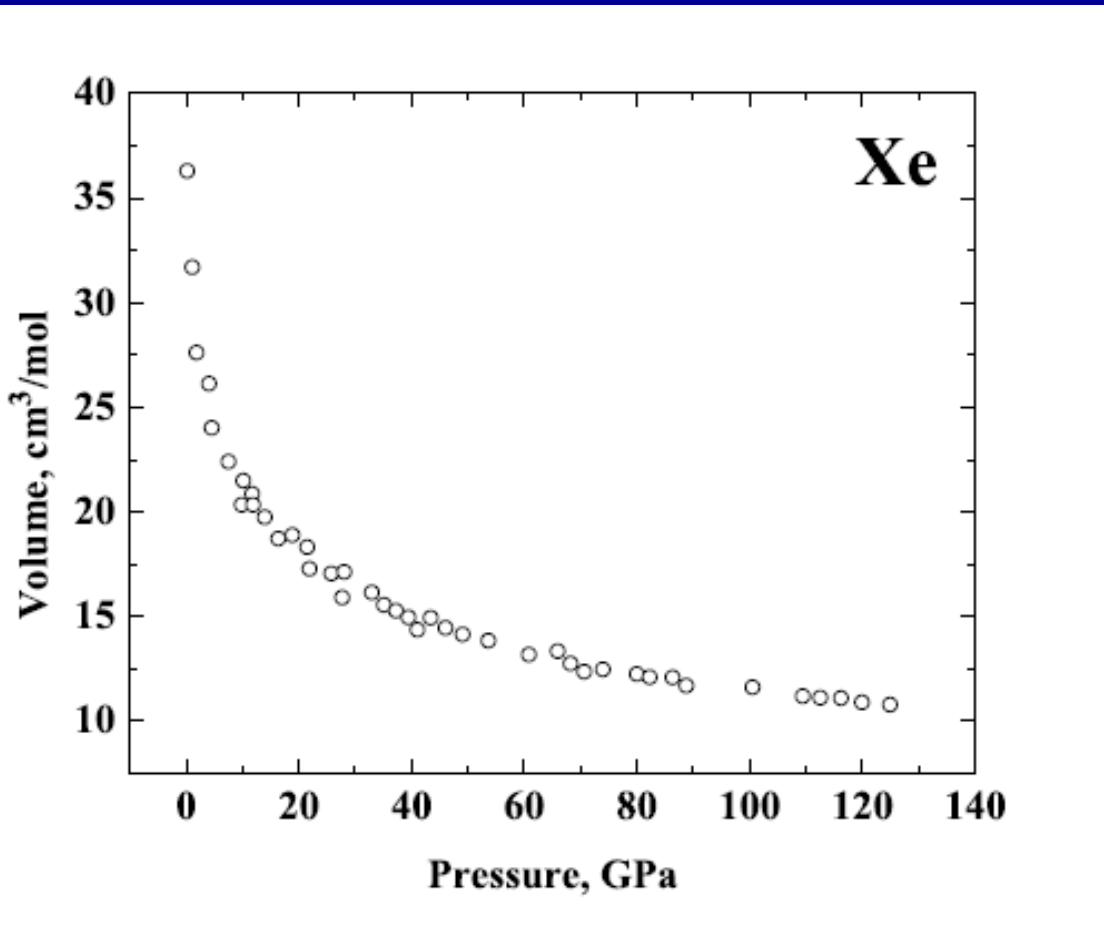
- Физики – ширина запрещенной зоны равна нулю
- Химики – химическая связь (ионный остов, стабилизированный свободными электронами)
- Остальные – специфический конструкционный материал
- Доказано только первое, но подразумевают все три
- Доказано только для Хе, но подразумевают металлический водород

Металлический водород

- Магнитный момент Юпитера и Сатурна
- Ракетное топливо будущего

Наше приближение

E.B. Gordon and B.M. Smirnov, J.Exp.Theor.Phys., 107, 274 (2008).



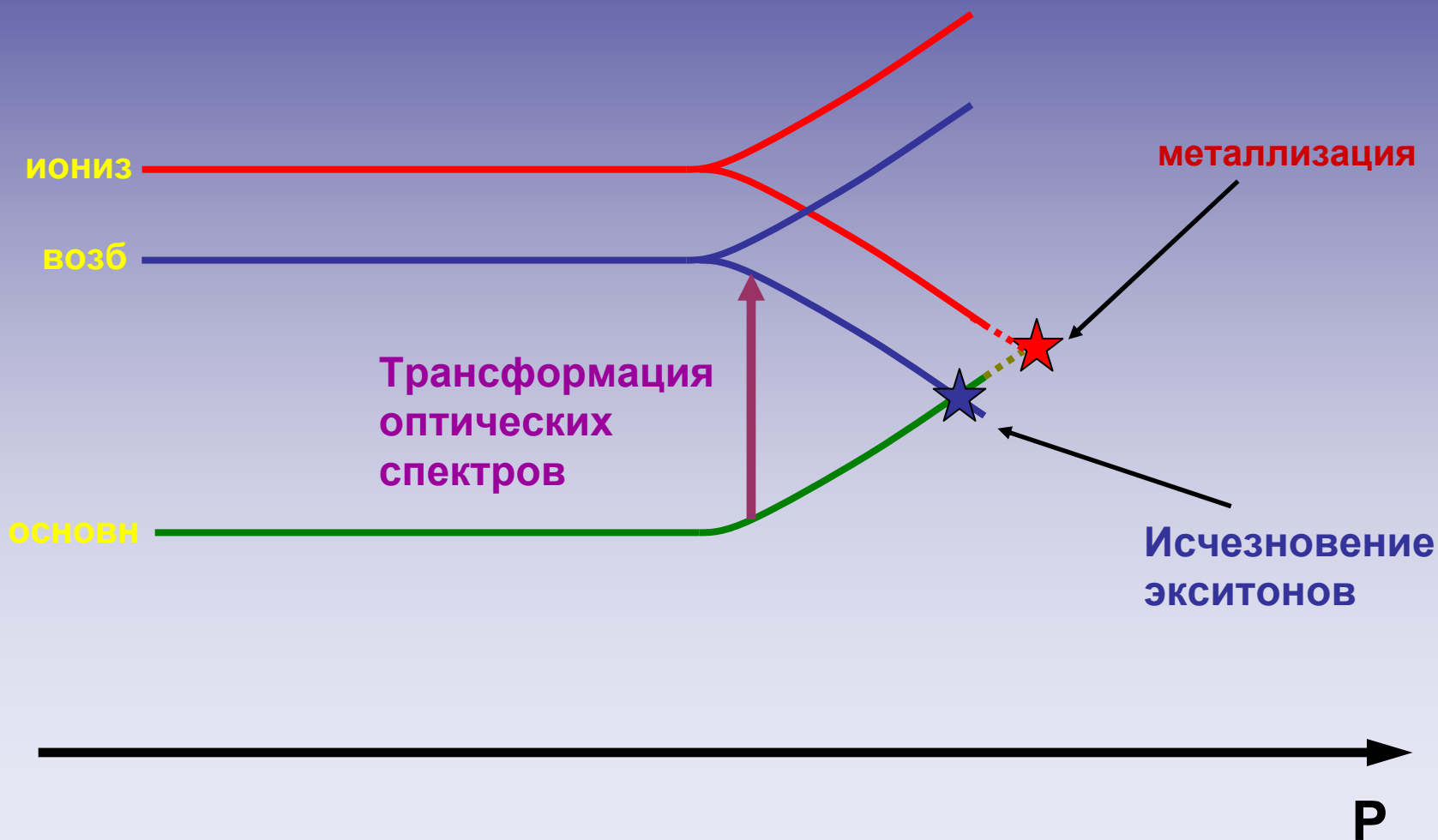
H.Cynn et.al. Phys.Rev.Lett. 86, 4552(2001)

Влияние давления состоит исключительно в изменении межатомных расстояний.

Из экспериментального уравнения состояния в приближении плотной упаковки (12 ближайших соседей) известно расстояние.

Для этого расстояния считается взаимодействие с использованием характеристик, полученных для газа.

Влияние давления на уровни ионизации, возбуждения (расщепление уровней) и на основное состояние (повышение энергии)



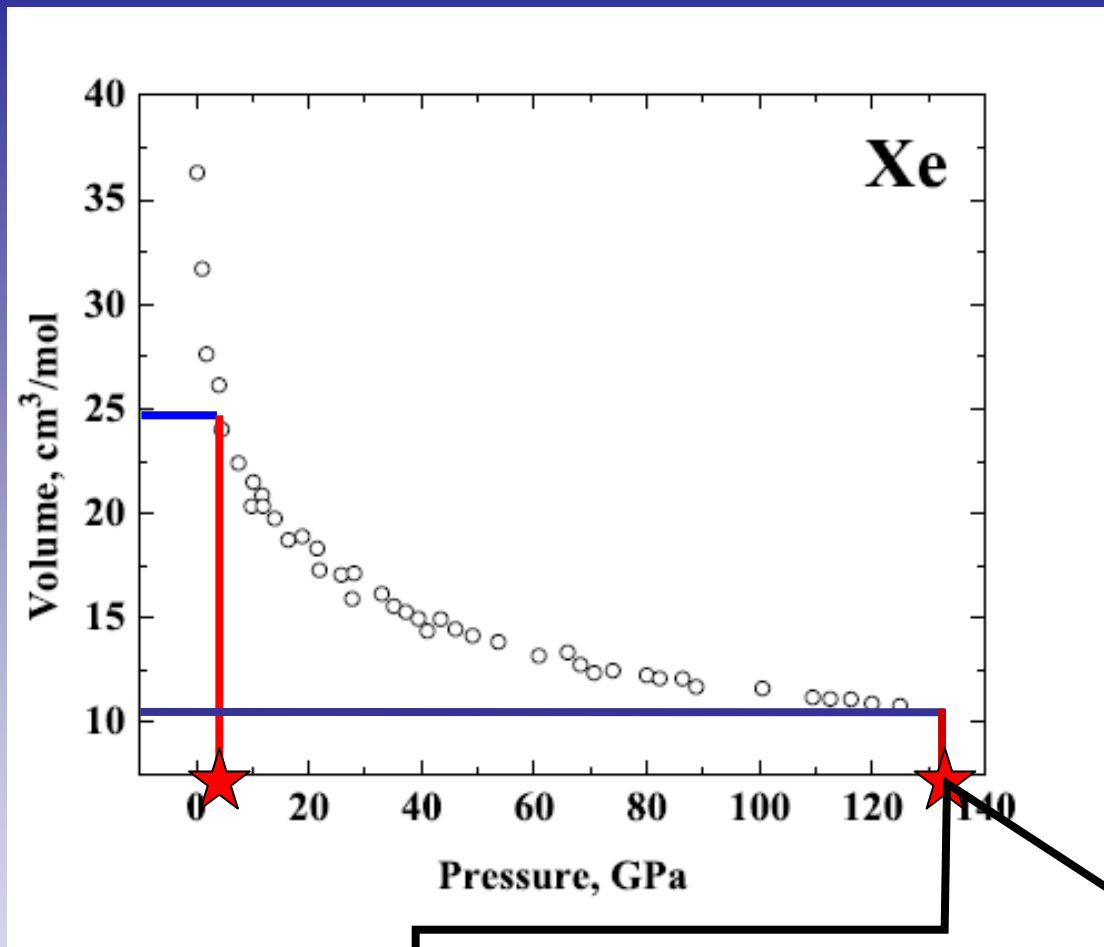
Давление металлизации ксенона

Расстояние между ближайшими соседями и молярные объемы в точке перехода Xe в металл

	R_*, a_0	$N_*, 10^{22} cm^{-3}$	$V_*, cm^3/mol$
Case 1	5.16	5.8	10
Case 2	5.15	5.8	10
Case 3	5.29	5.4	11

Уравнение состояния ксенона

H.Cynn e.a. *Phys.Rev.Lett.* 86, 4552(2001)



Давление перехода в металл

В точности совпадает с экспериментально полученным значением 130 ± 10 GPa

Металлизация –
необязательно сопровождается
фазовым переходом,

необязательно присутствует
метастабильность

1. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky, *Quantum Electronics* 21, 227 (1994)
2. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky, *Chem. Phys. Lett.* 217, 605 (1994).
3. E. B. Gordon, G. Frossati and A. Usenko, *J.Exp.Theor.Phys.*96, 846 (2003).
4. A. Usenko, G. Frossati and E. B. Gordon, *Phys.Rev.Lett.*, 90, 1532017 (2003).
5. E. B. Gordon and A. F. Shestakov, *Low Temp.Phys.*, 27, 883, (2001).
6. E. B. Gordon and B. M. Smirnov, *J.Exp.Theor.Phys.*98, 924 (2004).
7. E.B. Gordon and B.M. Smirnov, *J.Exp.Theor.Phys.*, 101, 186 (2005).
8. E.B. Gordon and B.M. Smirnov, *J.Exp.Theor.Phys.*, 107, 274 (2008).
9. E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov and B.M. Smirnov, *JLTP #11* (2008).
10. E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov and V.B. Fokin, *Optics and spectroscopy – submitted* (2008).



Спасибо за внимание

Главные выводы

- Эксперимент

Электронным ударом в кристалле тяжелого инертного газа нельзя возбудить атомы – возбуждаются только положительные ионы

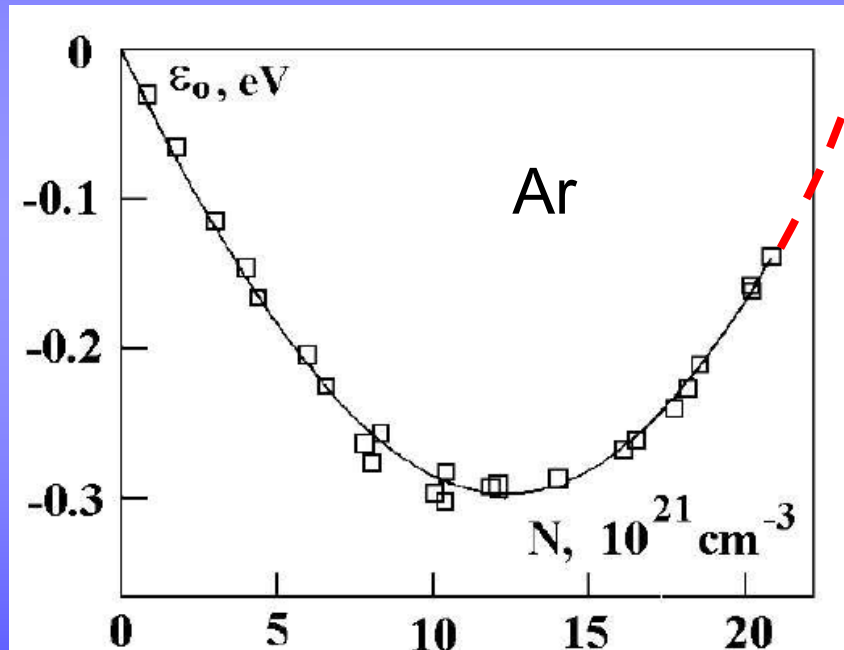
- Теория

Объяснение «ионизации давлением» сочетанием подъема энергии основного электронного состояния с расщеплением ионизационного состояния атома в матрице. Количественное предсказание давления металлизации тяжелого инертного газа.

Что будет при больших давлениях?

Теория

1. Падает подвижность, в принципе, вплоть до газовых значений (масштаб по давлению неизвестен)
2. Уменьшается энергия «сольватации» электрона

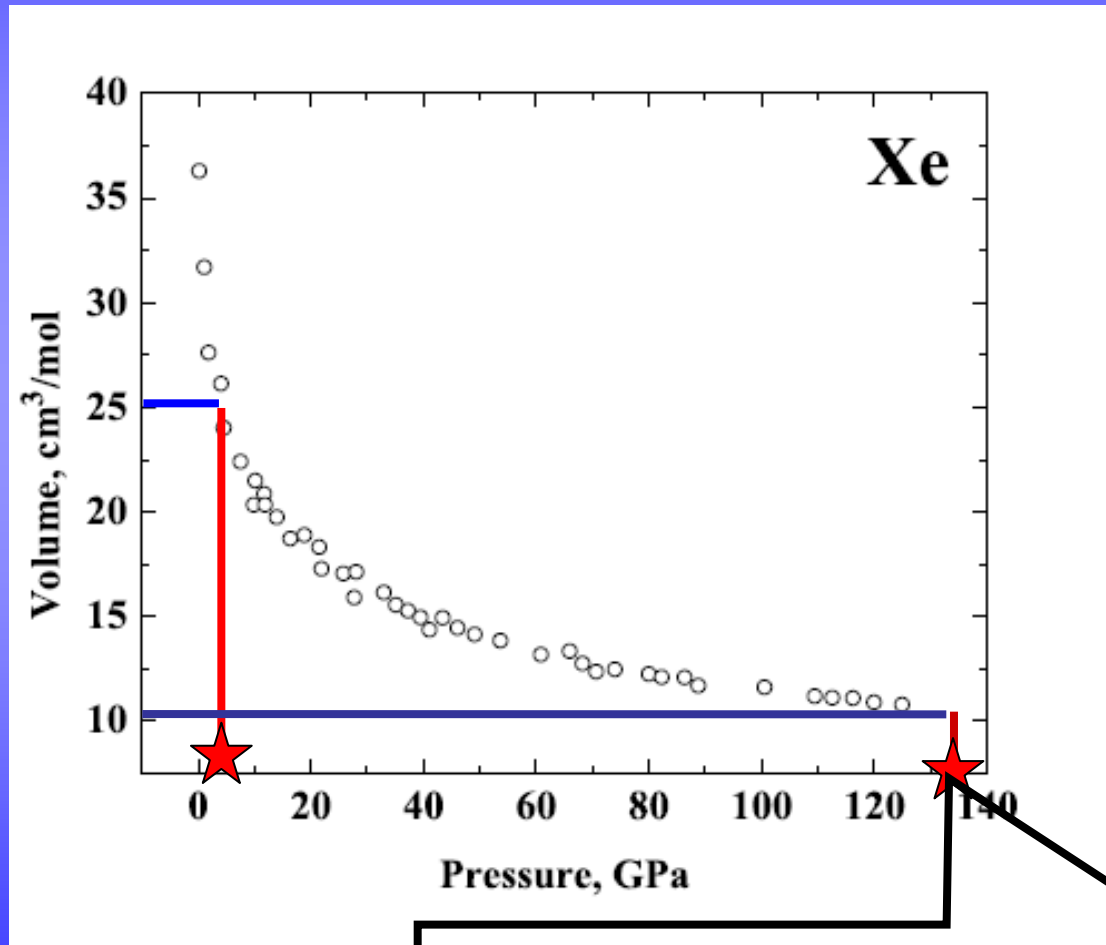


Для ксенона исчезает при 30 кбар

Электроны перестают проникать в твердый ксенон

Уравнение состояния ксенона

H.Cynn e.a. *Phys.Rev.Lett.* 86, 4552(2001)



Давление перехода в металл