

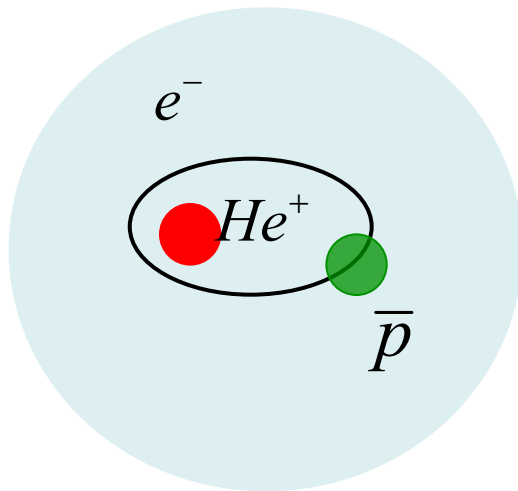
## Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

LETTER

Nature, 2011

doi:10.1038/nature10260

$\bar{p}\text{He}^+$



### Two-photon laser spectroscopy of antiprotonic helium and the antiproton-to-electron mass ratio

Masaki Hori<sup>1,2</sup>, Anna Sótér<sup>1</sup>, Daniel Barna<sup>2,3</sup>, Andreas Dax<sup>2</sup>, Ryugo Hayano<sup>2</sup>, Susanne Friedreich<sup>4</sup>, Bertalan Juhász<sup>4</sup>, Thomas Pask<sup>4</sup>, Eberhard Widmann<sup>4</sup>, Dezső Horváth<sup>3,5</sup>, Luca Venturelli<sup>6</sup> & Nicola Zurlo<sup>6</sup>

Электрон находится в его основном состоянии  
Протон находится в Ридберговском состоянии,  $n=l+1$

$$\langle r \rangle \sim \frac{n^2}{m}, \quad \langle r \rangle_{\bar{p}} \approx \frac{1}{2} \langle r \rangle_e$$

Обычно антипротонные атомы разрушаются за пикосекунды, через каскад электромагнитных переходов

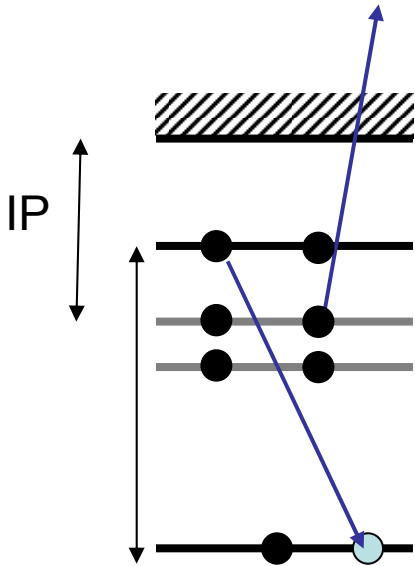
Как распадаются мезоатомы?

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Метастабильные состояния мезоатомов

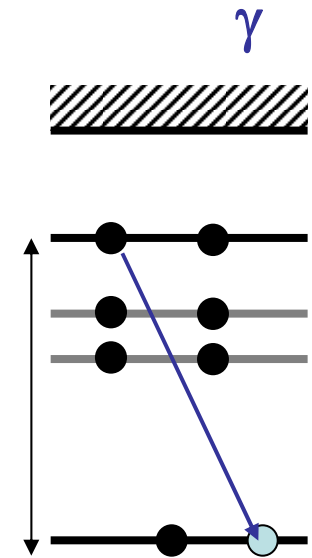
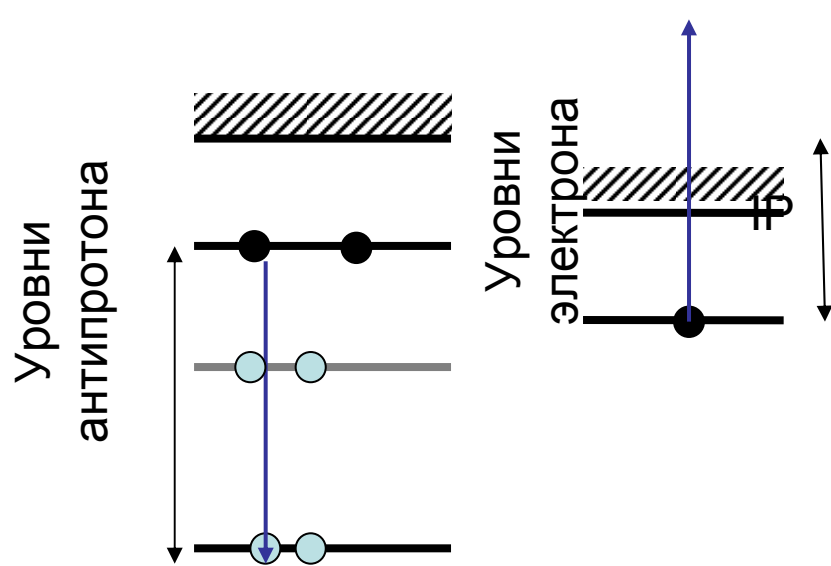
### Оже-распад и радиационный распад

Обычный



и

антипротония



# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Метастабильные состояния мезоатомов

### PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 23

14 JULY 1969

NUMBER 2

METASTABLE STATES OF  $\alpha\pi^-e^-$ ,  $\alpha K^-e^-$ , AND  $\alpha\bar{p}e^-$  ATOMS

J. E. Russell

Department of Physics, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio 45221

(Received 15 May 1969; revised manuscript received 16 June 1969)

It is suggested that antiprotons could be used to test Condo's conjecture that the large mean cascade time for  $K^-$  mesons in atomic orbits in liquid helium is due to metastable states.

Оже-распад  
и радиационный распад



Table I. Some properties of circular orbits of  $\alpha\pi^-e^-$ ,  $\alpha K^-e^-$ , and  $\alpha\bar{p}e^-$  atoms. The unit of energy is the rydberg.

atom	$n$	$E_b$ (Ry)	$ \Delta n _{\min}$	$E_A$ (Ry)	$P_A$ ( $\text{sec}^{-1}$ )	$P_R$ ( $\text{sec}^{-1}$ )
$\alpha\pi^-e^-$	16	-5.56	3	0.67	$4 \times 10^9$	$2.8 \times 10^7$
	15	-6.01	2	0.22	$2 \times 10^{12}$	$4.8 \times 10^7$
$\alpha K^-e^-$	29	-5.50	5	0.43	$6 \times 10^2$	$4.4 \times 10^6$
	28	-5.73	4	0.20	$4 \times 10^5$	$6.0 \times 10^6$
$\alpha\bar{p}e^-$	27	-6.00	4	0.45	$1 \times 10^6$	$8.1 \times 10^6$
	38	-5.50	6	0.23		$2.0 \times 10^6$
$\bar{p}He^+$	37	-5.67	5	0.06		$2.5 \times 10^6$
	36	-5.86	5	0.25		$3.1 \times 10^6$
	35	-6.09	4	0.02	$\lesssim 10^4$	$3.9 \times 10^6$

Для  $\bar{p}He^+$  распаду препятствует большая энергия связи электрона  $\sim 25$  эВ и большое значение мультипольности соответствующего (большое  $\Delta l$ ), и **атом существует микросекунды**

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Метастабильные состояния



PHYSICAL REVIEW A 77, 042506 (2008)

### Calculation of transitions between metastable states of antiprotonic helium including relativistic and radiative corrections of order $R_\infty\alpha^4$

Vladimir I. Korobov\*

*Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia*

(Received 23 February 2008; published 15 April 2008)

Precise numerical calculation of transition intervals between metastable states in the antiprotonic helium atom is performed. Theoretical consideration includes a complete account of the relativistic and radiative corrections of order  $R_\infty\alpha^4$  in the nonrecoil limit. The final uncertainty is estimated to be about 1–2 MHz.

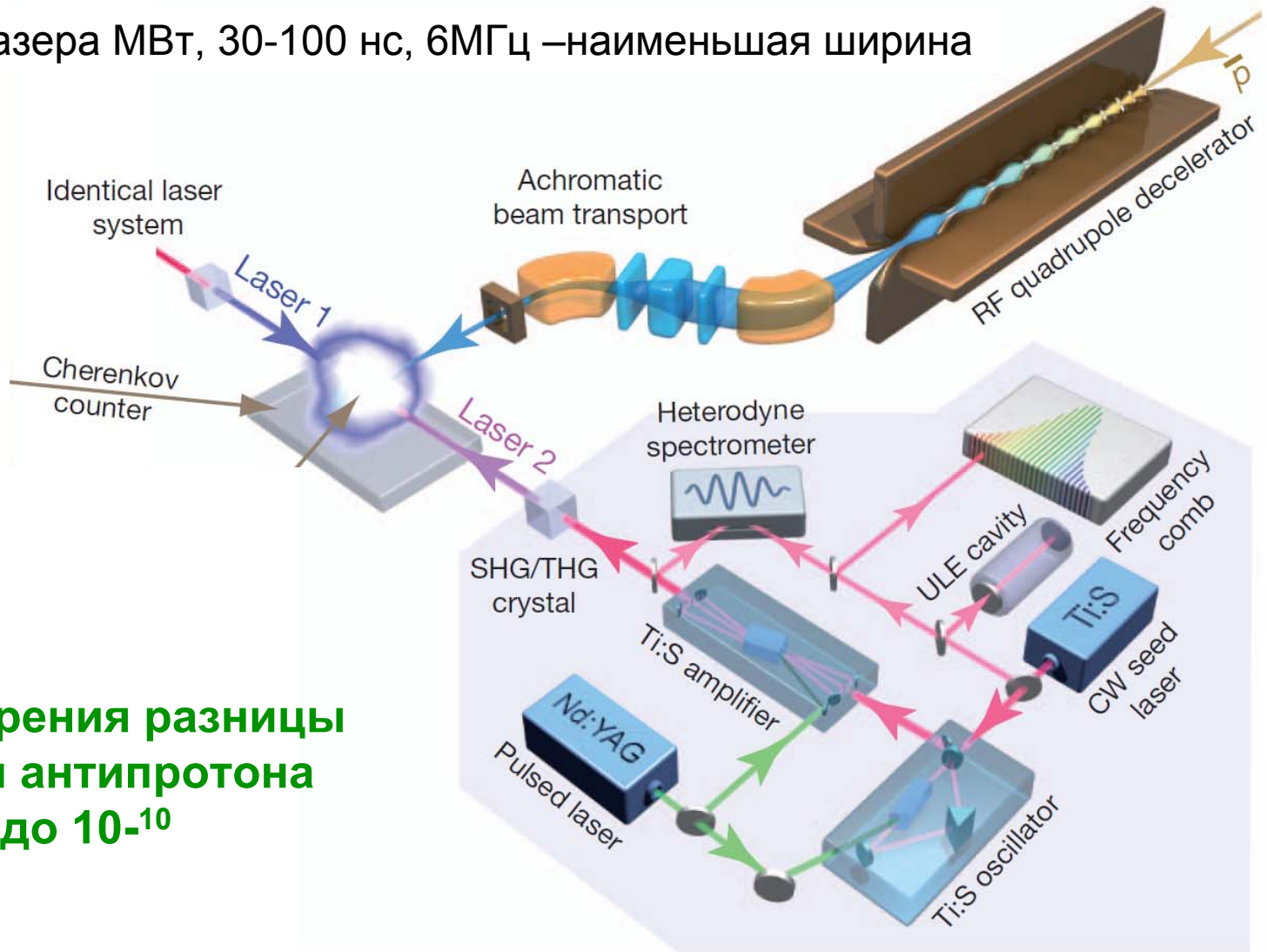
TABLE II. Nonrelativistic energies  $E_{nr}$ , half-widths  $\Gamma/2$ , and the expectation values of the most important operators for individual states of  $^4\text{He}^+\bar{p}$ . All quantities are in atomic units.

State	$E_{nr}$	$\Gamma/2$	$\mathbf{p}_e^4$	$\delta(\mathbf{r}_{\text{He}})$	$\delta(\mathbf{r}_{\bar{p}})$	$Q(\mathbf{r}_{\text{He}})$	$Q(\mathbf{r}_{\bar{p}})$	$E_{rc}^{(4)}\alpha^{-4}$
(31,30)	-3.6797747876576(1)	$4.7602 \times 10^{-9}$	26.070956	0.9262219	0.1214405	-1.1942	0.1581	-1.2481
(32,31)	-3.50763503897101(1)	$5.4 \times 10^{-13}$	28.308649	0.9938238	0.1130804	-1.2919	0.1616	-1.4078
(33,32)	-3.35375787083340(1)	$1.07 \times 10^{-12}$	30.718285	1.0664983	0.1044583	-1.3964	0.1634	-1.5810
(34,32)	-3.2276763796294(3)	$2.7237 \times 10^{-9}$	34.530638	1.1808676	0.0925595	-1.5613	0.1597	-1.8530
(35,32)	-3.116679795873(3)	$6.9733 \times 10^{-8}$	38.370099	1.2958629	0.0812115	-1.7271	0.1538	-2.1171
(34,33)	-3.21624423907002(1)	$1.4 \times 10^{-13}$	33.304865	1.1443963	0.0956136	-1.5086	0.1641	-1.7670
(35,33)	-3.1053826755489(3)	$2.8 \times 10^{-12}$	37.278812	1.2635240	0.0838705	-1.6804	0.1583	-2.0442
(36,33)	-3.0079790936832(4)	$2.9188 \times 10^{-9}$	41.233471	1.3819872	0.0729174	-1.8512	0.1505	-2.3062
(35,34)	-3.09346690791590(1)		36.069959	1.2275613	0.0865934	-1.6284	0.1632	-1.9644
(36,34)	-2.9963354479662700(5)	$2.3 \times 10^{-13}$	40.168797	1.3503397	0.0751362	-1.8055	0.1554	-2.2415
(37,34)	-2.9111809394697(4)	$2.6 \times 10^{-12}$	44.174196	1.4702684	0.0646698	-1.9785	0.1458	-2.4961
(38,34)	-2.836524601208(1)	$1.604 \times 10^{-9}$	48.000329	1.5848219	0.0553288	-2.1439	0.1351	-2.7231
(39,34)	-2.771011573577(1)	$9.920 \times 10^{-9}$	51.574850	1.6918636	0.0471712	-2.2983	0.1238	-2.9203
(37,35)	-2.89928218336728(1)		43.186470	1.4409042	0.0664487	-1.9361	0.1510	-2.4424
(38,35)	-2.8251468095450(1)		47.185100	1.5605889	0.0566232	-2.1088	0.1398	-2.6839
(39,35)	-2.7602333455733(1)	$1.0 \times 10^{-12}$	50.925526	1.6725711	0.0480612	-2.2704	0.1279	-2.8932
(40,35)	-2.7032832165135(3)	$1.9 \times 10^{-12}$	54.349384	1.7751265	0.0407571	-2.4184	0.1159	-3.0701

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония $\bar{p}\text{He}^+$

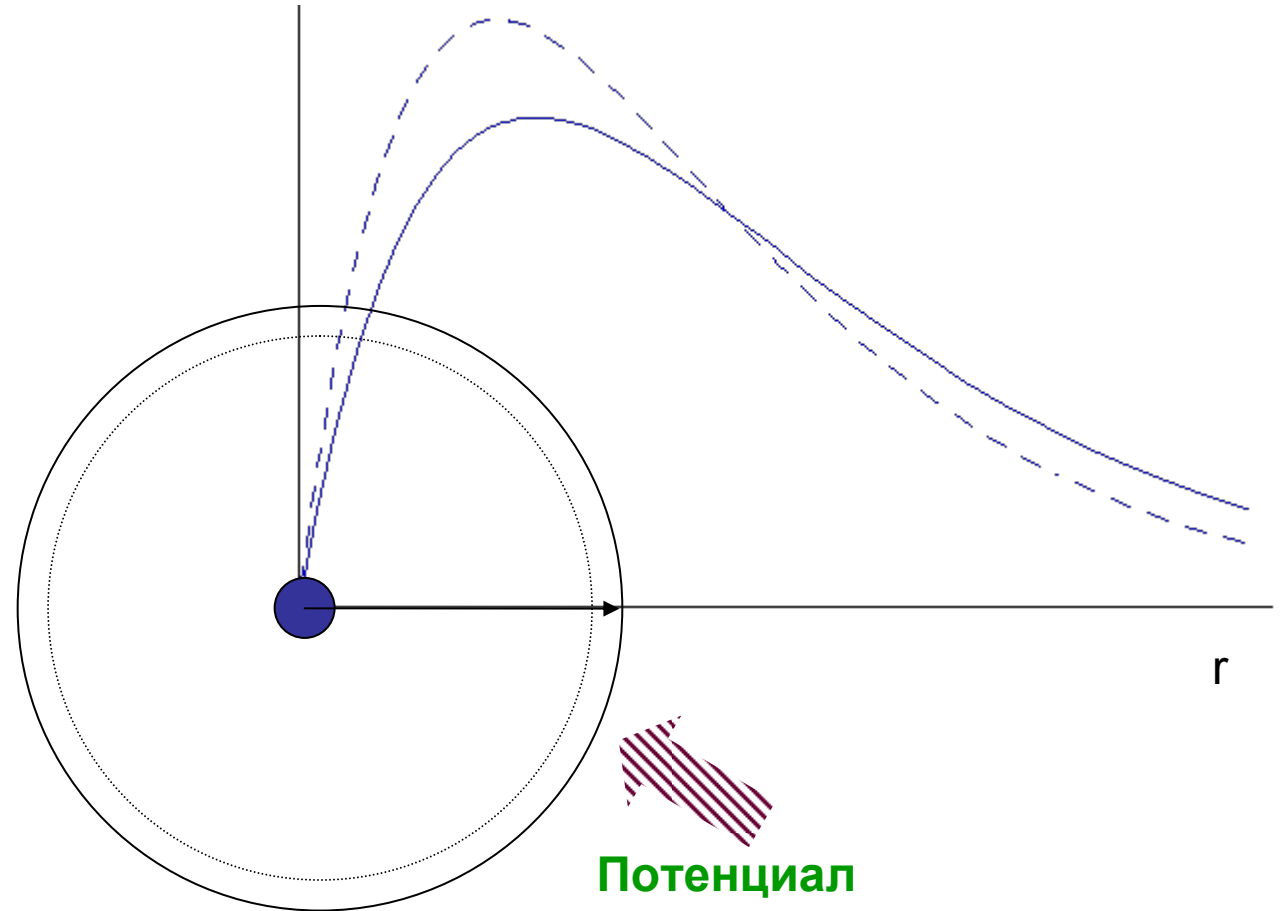
Два Ti:sapphire лазера МВт, 30-100 нс, 6МГц –наименьшая ширина



Точность измерения разницы масс протона и антипротона выросла с  $10^{-5}$  до  $10^{-10}$

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Сжатие атомов и молекул

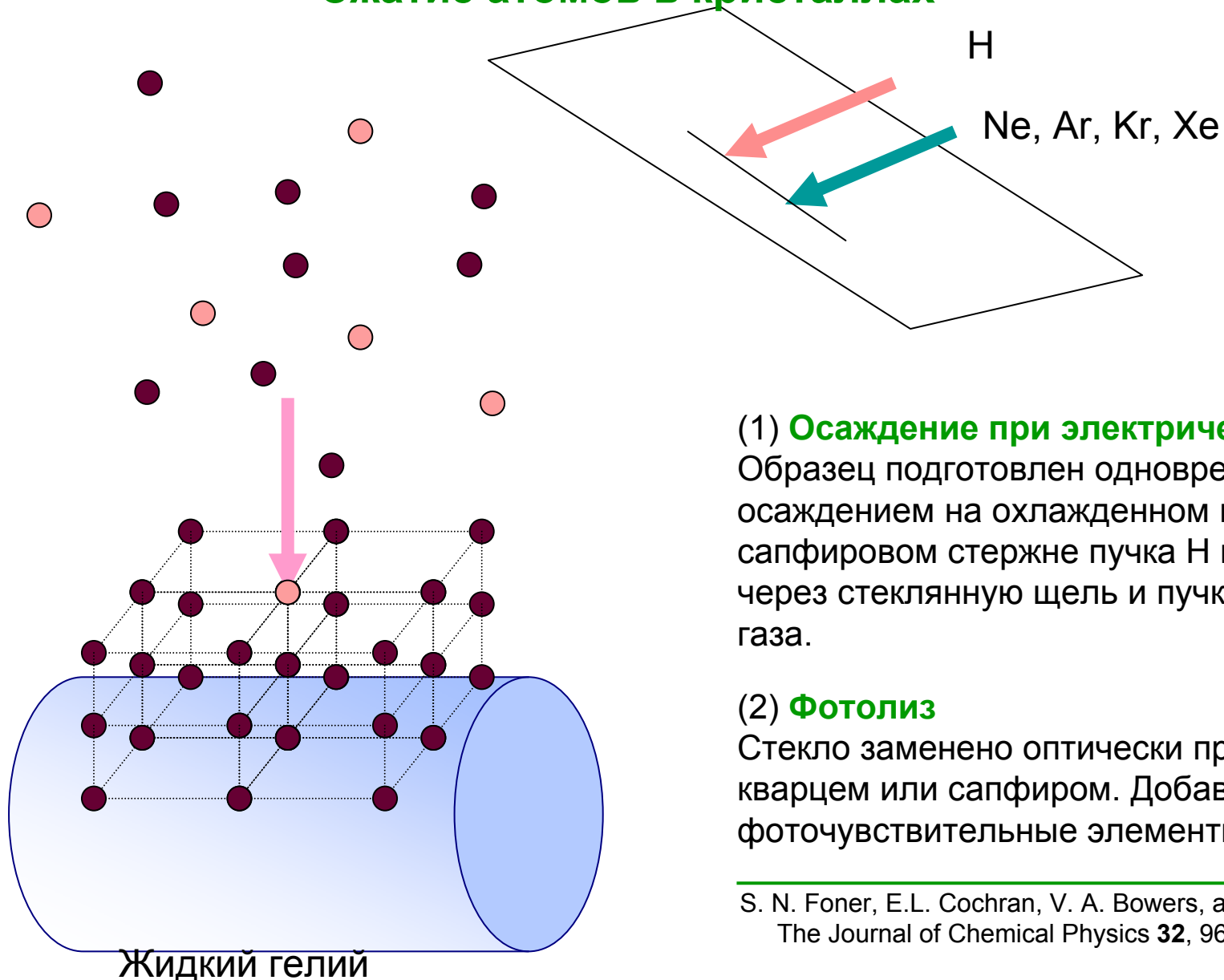


- Атом в кристалле
- Атом в фуллерене
- Атомы при высоком давлении

Как можно изменить атомную орбиталь?

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Сжатие атомов в кристаллах



### (1) **Осаждение при электрическом разряде**

Образец подготовлен одновременным осаждением на охлажденном гелием сапфировом стержне пучка Н прошедшего через стеклянную щель и пучка инертного газа.

### (2) **Фотолиз**

Стекло заменено оптически прозрачным кварцем или сапфиром. Добавлены фоточувствительные элементы

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Определение величины сжатия

### Сверхтонкое расщепление

$$\varphi = (a - a_0) / a_0$$

$$a = \frac{8\pi}{3} \mu_e \mu_n |\psi(0)|^2$$

$\mu_e, \mu_n$  - магнитные моменты электрона и ядра

atom	matrix	$\varphi$ (%)	ref	atom	matrix	$\varphi$ (%)	ref
H	H <sub>2</sub>	-0.23 <sup>a</sup>	2	D	Kr	+0.62 <sup>b</sup>	5
D	D <sub>2</sub>	-0.32 <sup>a</sup>	4	H	Ne	+4.0 <sup>c</sup>	6
H	Ne	-0.10 <sup>a</sup>	4	D	Ne	+5.0 <sup>c</sup>	6
D	Ne	-0.07 <sup>a</sup>	4	H	Ar	+10.8 <sup>c</sup>	6
H	Ar	-0.47 <sup>a</sup>	4	H	Kr	+5.4 <sup>c</sup>	6
D	Ar	-0.53 <sup>a</sup>	4	D	Kr	+8.2 <sup>c</sup>	6
H	Kr	-0.59 <sup>a</sup>	3	H	Xe	-0.97 <sup>a</sup>	5
H	Ne	+0.43 <sup>b</sup>	3	D	Xe	-1.04 <sup>b</sup>	5
H	Ar	+1.15 <sup>b</sup>	3	H	Xe	-1.5 <sup>c</sup>	6
H	Kr	+0.47 <sup>b</sup>	3	D	Xe	-1.8 <sup>c</sup>	6
H	Kr	+0.55 <sup>b</sup>	5				

(2) Jen, C. K.; Foner, S. N.; Cochran, E. L.; Bowers, V. A. *Phys. Rev.* **112**, 1169 (1958).

(3) Foner, S. N.; Cochran, E. L.; Bowers, V. A.; Jen, C. K. *J. Chem. Phys.* **32**, 963 (1960).

(4) Zhitnikov, R. A.; Dmitriev, Y. A. In *Optical Orientation of Atoms and Molecules*; Klementiev, G., Ed.; Physical Institute Press: Leningrad, Vol. **2**, p 109 (1990).

(5) Morton, J. R.; Preston, R. F.; Strach, S. J.; Adrian, F. J.; Jette, A.N. *J. Chem. Phys.* **70**, 2889 (1979,).

(6) Knight, L. B.; Rice, W. E.; Moore, L. *J. Chem. Phys.* **109**, 1409 (1998,).



# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Интерпретация величины сжатия

### Сверхтонкое расщепление

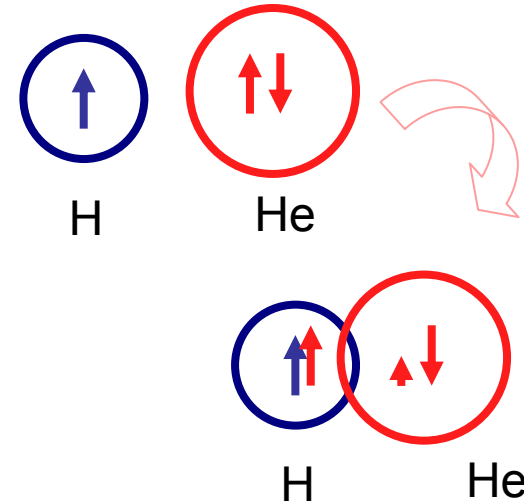
$$\varphi = (a - a_0) / a_0$$

$$a = \frac{8\pi}{3} \mu_e \mu_n |\psi(0)|^2$$

$\mu_e, \mu_n$  - магнитные моменты электрона и ядра

atom	matrix	$\varphi$ (%)	ref	atom	matrix	$\varphi$ (%)	ref
H	H <sub>2</sub>	-0.23 <sup>a</sup>	2	D	Kr	+0.62 <sup>b</sup>	5
D	D <sub>2</sub>	-0.32 <sup>a</sup>	4	H	Ne	+4.0 <sup>c</sup>	6
H	Ne	-0.10 <sup>a</sup>	4	D	Ne	+5.0 <sup>c</sup>	6
D	Ne	-0.07 <sup>a</sup>	4	H	Ar	+10.8 <sup>c</sup>	6
H	Ar	-0.47 <sup>a</sup>	4	H	Kr	+5.4 <sup>c</sup>	6
D	Ar	-0.53 <sup>a</sup>	4	D	Kr	+8.2 <sup>c</sup>	6
H	Kr	-0.59 <sup>a</sup>	3	H	Xe	-0.97 <sup>a</sup>	5
H	Ne	+0.43 <sup>b</sup>	3	D	Xe	-1.04 <sup>b</sup>	5
H	Ar	+1.15 <sup>b</sup>	3	H	Xe	-1.5 <sup>c</sup>	6
H	Kr	+0.47 <sup>b</sup>	3	D	Xe	-1.8 <sup>c</sup>	6
H	Kr	+0.55 <sup>b</sup>	5				

- a) газовый разряд;
- b) фотолиз;
- c) осаждение на SiO<sub>2</sub>



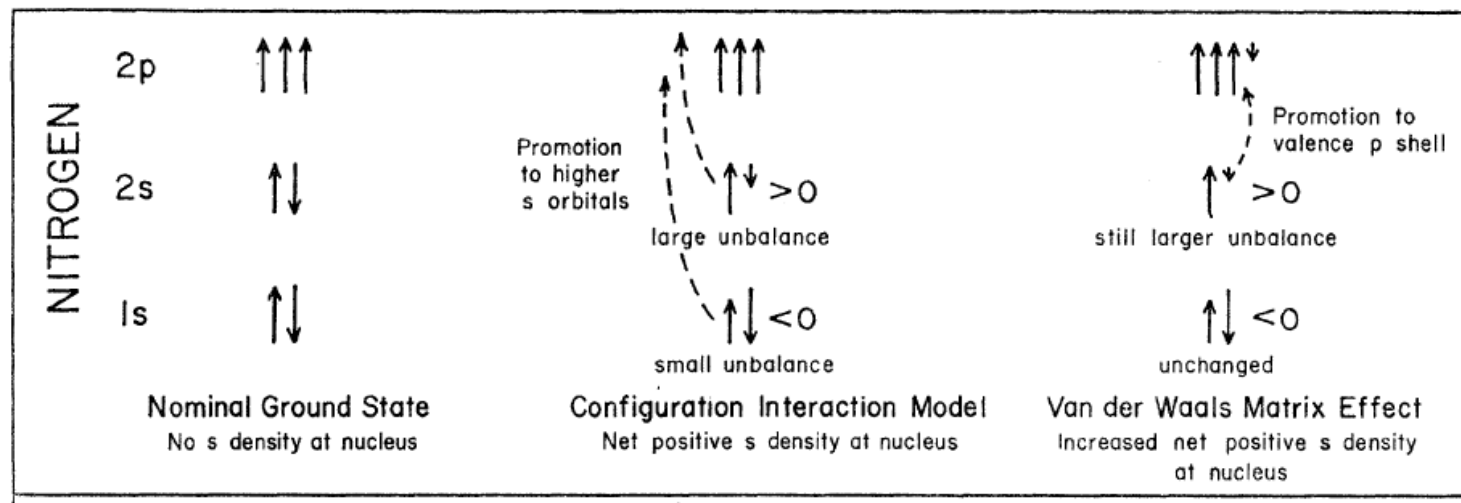
- Знак изменения характеризует подкачку или утечку электронной плотности на ядре
- Два эффекта противоположного знака наблюдаются одновременно
- Для слабо поляризуемых атомов наблюдаются эффекты обоих знаков, но для сильно поляризуемого Хе один

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Сжатие азота и фосфора

atom	matrix	$\varphi$ (%)	ref
P	Ar	+19	7
N	H <sub>2</sub>	+9.6	8
N	N <sub>2</sub>	+15.6	8
N	CH <sub>4</sub>	+29.5	8
N	Ne	+7.8	9
N	KN <sub>3</sub> , crystal	+48.6	10

- Большое изменение (10-50%), связанное с размером атома
- Изменение порядка заполнения оболочек



(7) Adrian, F. J.; Cochran, E. L.; Bowers, V. A. *AdV. Chem.* **36**, 50 (1962).

(8) Knight, L. B.; Steadman, J. J. *Chem. Phys.* **77**, 1150 (1982).

(9) Dmitriev, Y. A.; Zhitnikov, R. A. *J. Tech. Phys.* **57**, 1811 (1987).

(10) Wylie, D.; Shuskus, A.; Young, C.; Gilliam, O. *Phys. Rev.* **125**, 451 (1962).

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Сжатие азота и фосфора

atom	matrix	$\varphi$ (%)	ref
P	Ar	+19	7
N	H <sub>2</sub>	+9.6	8
N	N <sub>2</sub>	+15.6	8
N	CH <sub>4</sub>	+29.5	8
N	Ne	+7.8	9
N	KN <sub>3</sub> , crystal	+48.6	10

atom	$\varphi$ (%)	size of cage (Å)	ref
N@C <sub>70</sub>	+49.1	7.80 (6.99, equator)	28
N@C <sub>66</sub> (COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>12</sub>	+53.4	7.31	28
N@C <sub>61</sub> (COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub>	+54.1		28
N@C <sub>60</sub>	+54.1	6.96	27, 28
P@C <sub>60</sub>	+250	6.96	29b

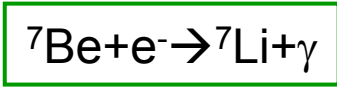
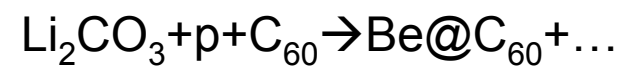
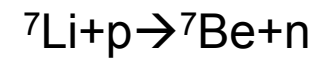
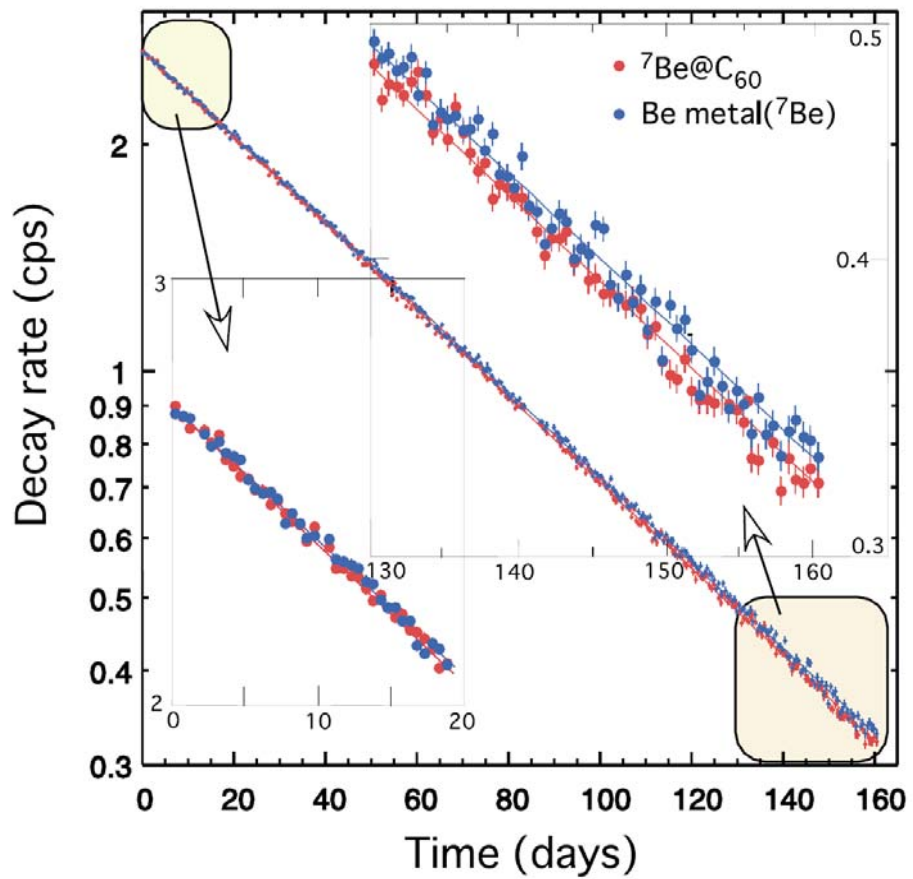
- Большое изменение (10-50%), связанное с размером атома
- Изменение заполнения оболочек

- Электронная конфигурация сохраняется
- Энергия связи не превышает 0.9 kcal/mol.
- Значительное изменение константы сверхтонкого расщепления 50%
- Сверхтонкое расщепление чувствительно к химическому соединению
- Структура подтверждается теоретическим анализом

- (27) Pietzak, B.; Waiblinger, M.; Murphy, T. A.; Weibinger, A.; Höhne, M.; Dietel, E.; Hirsch, A. *Chem. Phys. Lett.* **279**, 259 (1997).
- (28) Dietel, E.; Hirsch, A.; Pietzak, B.; Waiblinger, M.; Lips, K.; Weidinger, A.; Gruss, A.; Dinse, K.-P. *J. Am. Chem. Soc.* **121**, 2432 (1999).
- (29) (a) Weiden, N.; Goedde, B.; Käss, H.; Dinse, K.-H.; Rohrer, M. *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1544 (2000).  
(b) Knapp, C.; Weiden, N.; Käss, H.; Dinse, K.-P.; Pietzak, B.; Waiblinger, M.; Weidinger, A. *Mol. Phys.* **95**, 999 (1998).

# Ядерно-атомно-молекулярная физика

## Изменение скорости $\beta$ -распада



### Период $\beta$ -распада [\*]

Host materials	$T_{1/2}$ (days)	References
$C_{60}$	$52.68 \pm 0.05$	This work
Beryllium metal	$53.12 \pm 0.05$	This work
Lithium fluoride	$53.12 \pm 0.07$	[5]
Graphite	$53.107 \pm 0.022$	[8]
Boron nitride	$53.174 \pm 0.037$	[8]
Tantalum	$53.195 \pm 0.052$	[8]
Gold	$53.311 \pm 0.042$	[8]

### Электронная плотность [\*\*]

	Orbitals			Total
	1st	2nd	Others	
$\text{Be}@C_{60}$	34.22	1.24	0.02	35.48
Be atom	34.25	1.13	–	35.38
Be metal	34.11	0.32	0.33	34.78

[\*] T. Ohtsuki, H. Yuki, M. Muto, J. Kasagi and K. Ohno *Phys. Rev. Lett.* **93** 112501 (2004).

[8] E. B. Norman et al., *Phys. Lett. B* **519**, 15 (2001).

[\*\*] E.V. Tkalya, A.V. Bibikov, and I.V. Bodrenko *Phys. Rev. C* **81**, 024610 (2010).