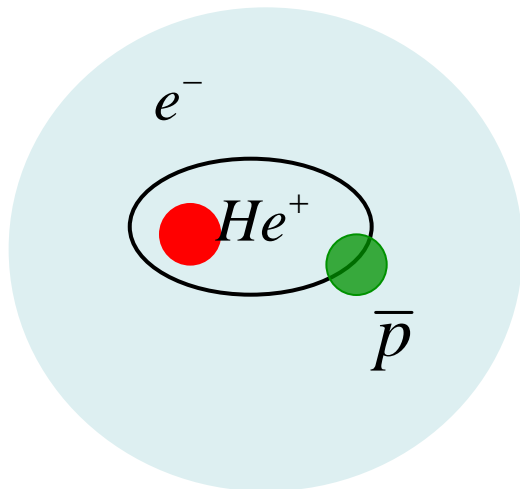


ВОЛНЫ СВЕТА И ВЕЩЕСТВА

Е.В. Грызлова

НИИЯФ МГУ
Осенний семестр 2013 г.

1. «Разминка».
2. Плоская волна и понятие волнового пакета – волны вещества.
3. Системы со сферической симметрией.
4. Начала теории рассеяния.
5. Резонансной рассеяния и вопрос о двойных полюсах матрицы рассеяния.
6. Двухуровневая система, связь лазерным полем.
7. Изучение антипротония.
8. Нобелевская премия по физике 2012 года. Изучение одиночной квантовой системы.



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

Masaki Hori^{1,2}, Anna Sótér¹, Daniel Barna^{2,3}, Andreas Dax², Ryugo Hayano², Susanne Friedreich⁴, Bertalan Juhász⁴, Thomas Pask⁴, Eberhard Widmann⁴, Dezső Horváth^{3,5}, Luca Venturelli⁶ & Nicola Zurlo⁶

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

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

Метастабильные состояния мезоатомов

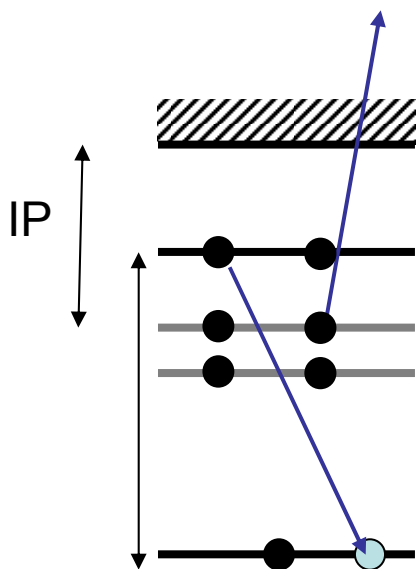


Оже-распад и радиационный распад

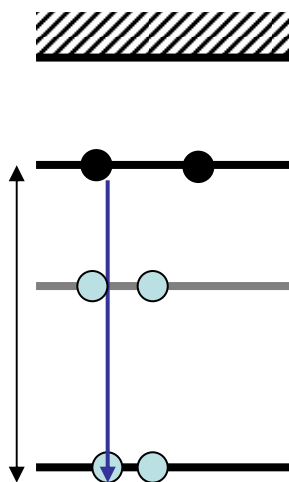
Обычный

и

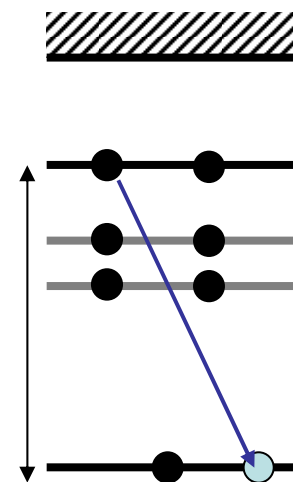
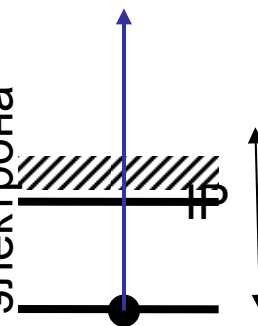
антипротония



Уровни
антипротона



Уровни
электрона



γ

Метастабильные состояния мезоатомов



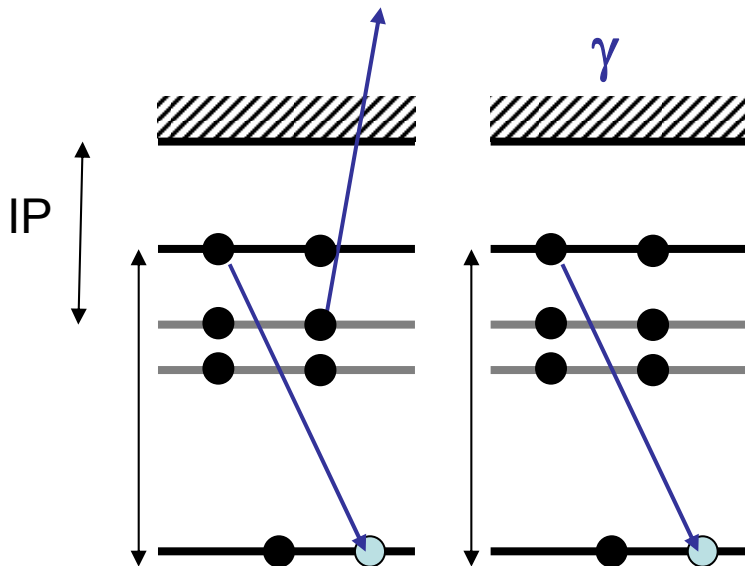
PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 23

14 JULY 1969

NUMBER 2

Оже-распад и радиационный распад



METASTABLE STATES OF $\alpha\pi^-e^-$, αK^-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.

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

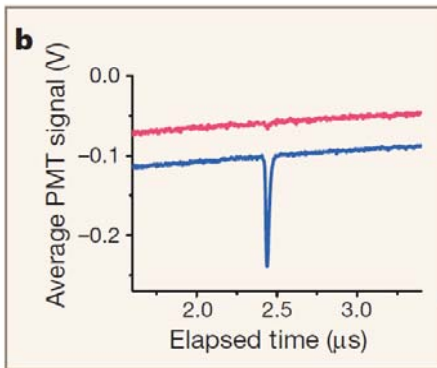
atom	n	E_b (Ry)	$ \Delta n _{\min}$	E_A (Ry)	P_A (sec ⁻¹)	P_R (sec ⁻¹)
$\alpha\pi^-e^-$	16	-5.56	3	0.67	4×10^9	2.8×10^7
	15	-6.01	2	0.22	2×10^{12}	4.8×10^7
αK^-e^-	29	-5.50	5	0.43	6×10^2	4.4×10^6
	28	-5.73	4	0.20	4×10^5	6.0×10^6
	27	-6.00	4	0.45	1×10^6	8.1×10^6
$\alpha\bar{p}e^-$	38	-5.50	6	0.23		2.0×10^6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

Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

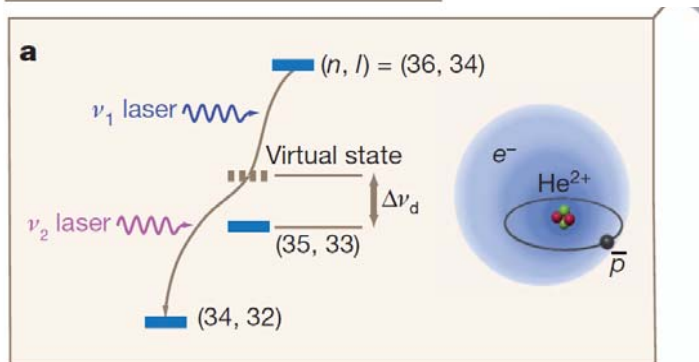


Для $\bar{p}\text{He}^+$ распаду препятствует большая энергия связи электрона ~ 25 эВ и большое значение мультипольности соответствующего (большое Δl), и атом существует микросекунды

Существуют переходы типа $(n, l) \rightarrow (n-2, l-2)$ с частотой в диапазоне глубокого ультрафиолета: 139.8; 193.0; 197.0 nm.



Двухфотонный переход, близкий к резонансному



Метастабильные состояния мезоатомов



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.

Оже-распад

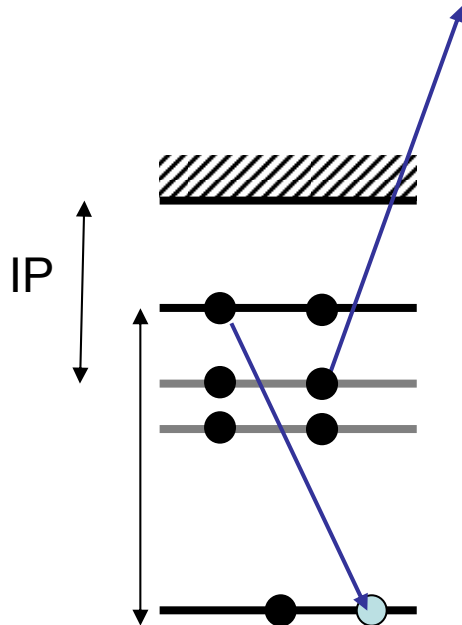


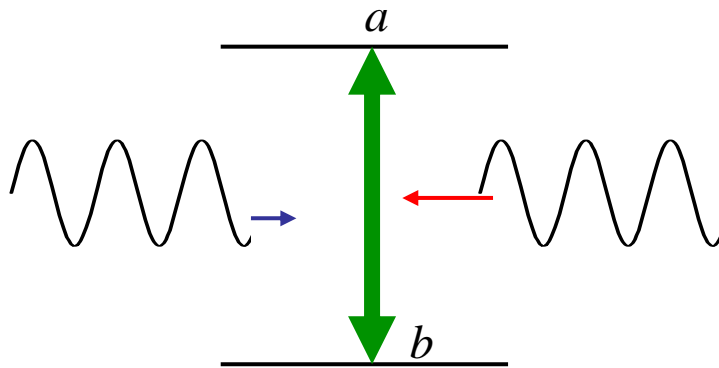
TABLE II. Nonrelativistic energies E_{nr} , half-widths $\Gamma/2$, and the expectation values of the most important operators for individual states of ${}^4\text{He}^+\bar{p}$. All quantities are in atomic units.

State	E_{nr}	$\Gamma/2$	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)	4.7602×10^{-9}	26.070956	0.9262219	0.1214405	-1.1942	0.1581	-1.2481
(32,31)	-3.50763503897101(1)	5.4×10^{-13}	28.308649	0.9938238	0.1130804	-1.2919	0.1616	-1.4078
(33,32)	-3.35375787083340(1)	1.07×10^{-12}	30.718285	1.0664983	0.1044583	-1.3964	0.1634	-1.5810
(34,32)	-3.2276763796294(3)	2.7237×10^{-9}	34.530638	1.1808676	0.0925595	-1.5613	0.1597	-1.8530
(35,32)	-3.116679795873(3)	6.9733×10^{-8}	38.370099	1.2958629	0.0812115	-1.7271	0.1538	-2.1171
(34,33)	-3.21624423907002(1)	1.4×10^{-13}	33.304865	1.1443963	0.0956136	-1.5086	0.1641	-1.7670
(35,33)	-3.1053826755489(3)	2.8×10^{-12}	37.278812	1.2635240	0.0838705	-1.6804	0.1583	-2.0442
(36,33)	-3.0079790936832(4)	2.9188×10^{-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)	2.3×10^{-13}	40.168797	1.3503397	0.0751362	-1.8055	0.1554	-2.2415
(37,34)	-2.9111809394697(4)	2.6×10^{-12}	44.174196	1.4702684	0.0646698	-1.9785	0.1458	-2.4961
(38,34)	-2.836524601208(1)	1.604×10^{-9}	48.000329	1.5848219	0.0553288	-2.1439	0.1351	-2.7231
(39,34)	-2.771011573577(1)	9.920×10^{-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)	1.0×10^{-12}	50.925526	1.6725711	0.0480612	-2.2704	0.1279	-2.8932
(40,35)	-2.7032832165135(3)	1.9×10^{-12}	54.349384	1.7751265	0.0407571	-2.4184	0.1159	-3.0701

Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

$$\bar{p}\text{He}^+ \quad \sim v \sqrt{8k_B T \log(2)/Mc^2}; \quad - \text{Доплеровская ширина}$$

Лазерное охлаждение



Сила, действующая на атом при поглощении фотона

$$\vec{F} = r\vec{k} = \Gamma_a \rho_{aa} \vec{k}$$

$$\dot{\rho}_{ab} = -\left(\frac{\Gamma}{2} + i\Delta\right)\tilde{\rho}_{ab} + i\Omega_R \rho_{aa} - i\frac{\Omega_R}{2};$$

$$\dot{\rho}_{aa} = -\Gamma \rho_{aa} + i\frac{\Omega_R}{2}(\rho_{ab} - \rho_{ba});$$

$$\dot{\rho}_{ba} = -\left(\frac{\Gamma}{2} - i\Delta\right)\tilde{\rho}_{ba} - i\Omega_R \rho_{aa} + i\frac{\Omega_R}{2}.$$

$$\vec{F} = \Gamma_a \vec{k} \frac{\Omega_R^2}{4\Delta^2 + \Gamma^2 + 2\Omega_R^2} \quad \longrightarrow \quad \sim \frac{\Gamma_a \vec{k} \Omega_R^2}{4(\Delta \mp kv)^2 + \Gamma^2 + 2\Omega_R^2}$$

$$\vec{F} = F_a \mp m\beta v = \frac{\Gamma_a \vec{k} \Omega_R^2}{4\Delta^2 + \Gamma^2} \pm \frac{8\Gamma_a \vec{k}^2 \Omega_R^2 \Delta}{(4\Delta^2 + \Gamma^2)^2} v$$

Сила трения

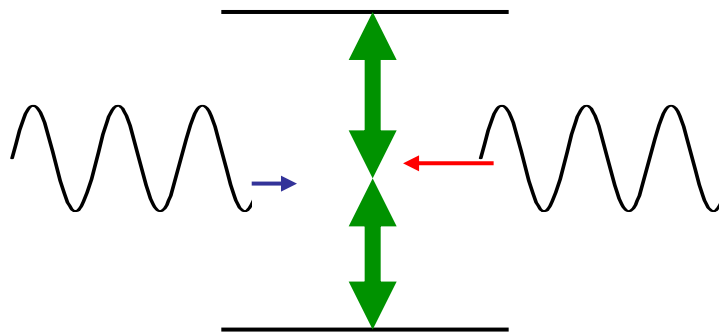
$$\vec{F} = F_a - m\beta v - (F_a + m\beta v) = -2m\beta v$$

Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

$$\bar{p}\text{He}^+ \quad \sim \nu \sqrt{8\tilde{k}_B T \log(2)/Mc^2}; \quad - \text{Допплеровская ширина}$$

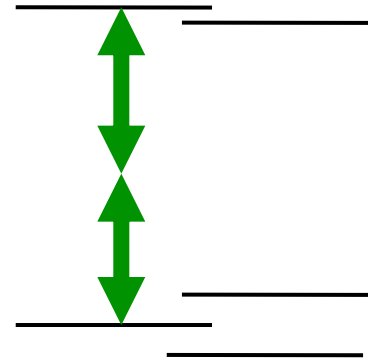
Лазерное охлаждение

Лазерное охлаждение уменьшает ширину этих линий, и их энергия может быть измерена с относительной точностью 2.5-5 на 10^9 .

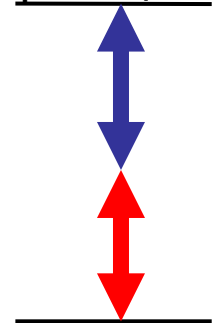


Понижение Раби осцилляций

Одинаково поляризованные поля



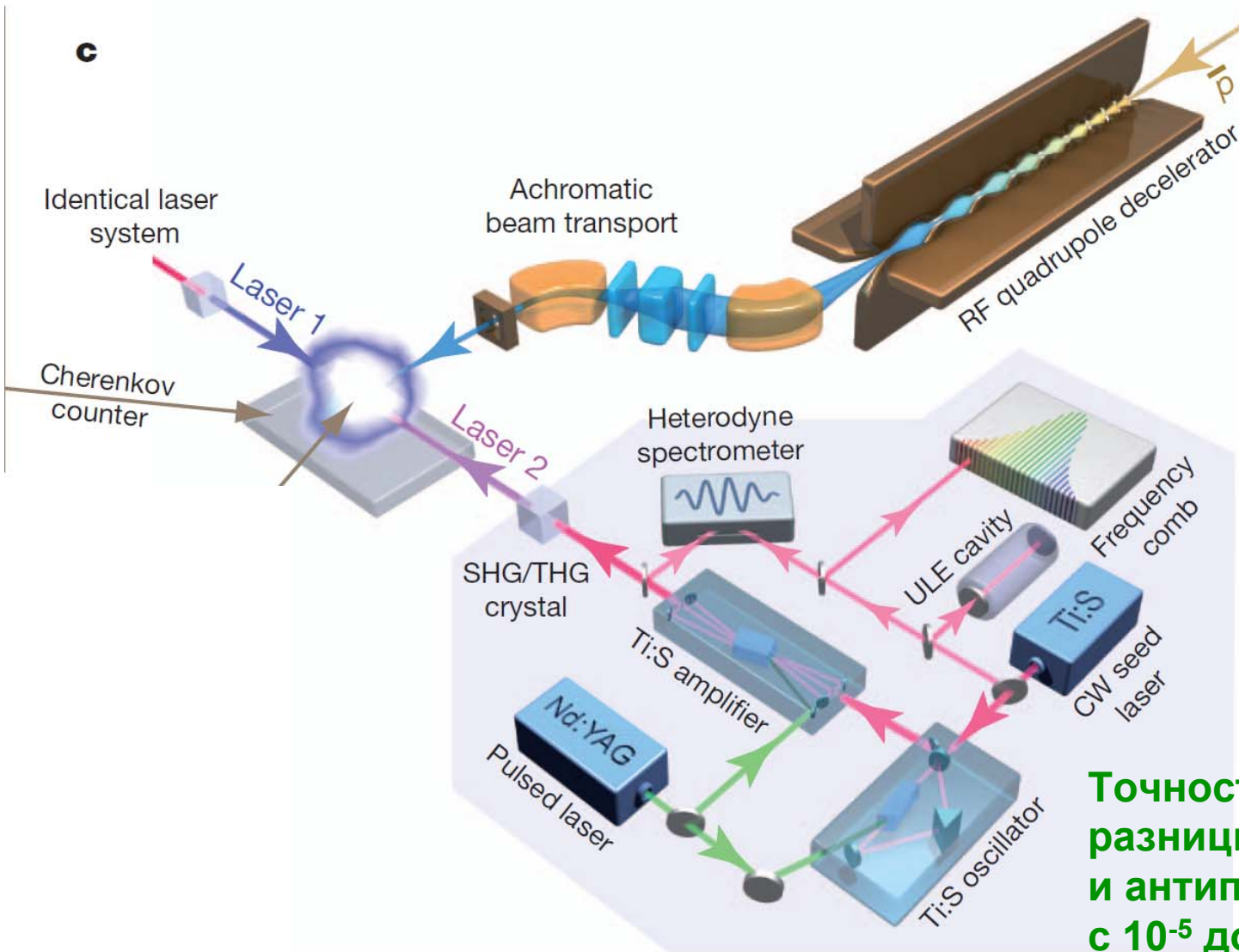
Две разные циркулярные поляризации



В пределе Допплеровская ширина уменьшается в $\sim (\nu_1 + \nu_2)/(\nu_1 - \nu_2)$ раз

Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

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}