

# ***ЯДЕРНЫЕ СТЕПЕНИЯ СВОБОДЫ В АТОМНОЙ ФИЗИКЕ***

Е.В. Грызлова

НИИЯФ МГУ  
Весенний семестр 2020 г.

- «Разминка»
- Спектры систем со сферической симметрией
- **Сжатые атомы и резонансы формы**
- **Двухуровневая система с сильно связанными состояниями**
- **Атомная спектроскопия антипротония**
- **Поляризация излучения и дихроизм**
- **Плоская волна и волновой пакет – волна вещества.**
- **Нобелевская премия по физике 2012 года.**  
**Изучение одиночной квантовой системы**
- **Ионные ловушки**
- **Когерентные и сжатые состояния волновых пакетов**
- **Начала теории рассеяния**
- **Особенности резонансного рассеяния и неэкспоненциальный распад**

## o **Атомная спектроскопия антипротония**

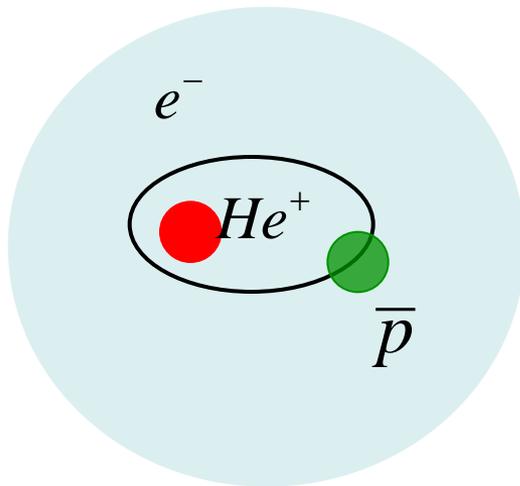
- а) Ридберговские состояния мезоатомов
- б) Двухфотонная спектроскопия
- в) лазерное охлаждение

# Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

LETTER

Nature, 2011

doi:10.1038/nature10260



## 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

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

# Метастабильные состояния мезоатомов

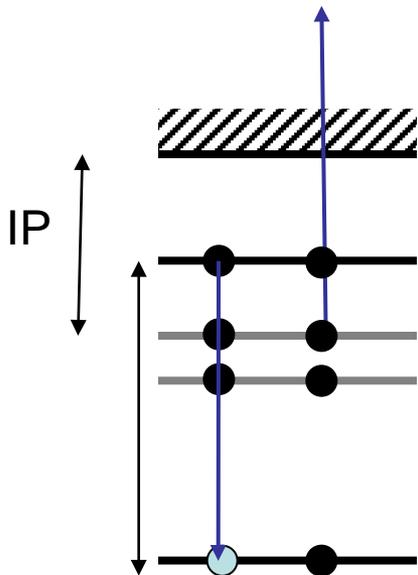


## Оже-распад и радиационный распад

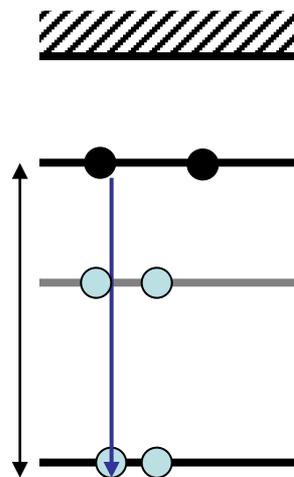
Обычный

и

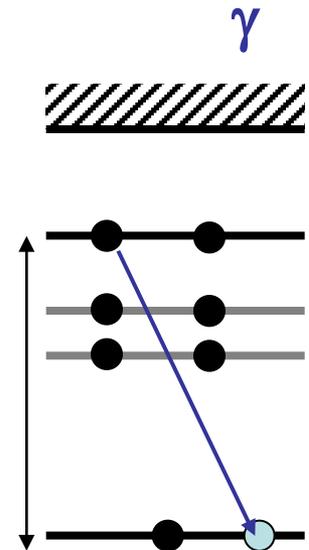
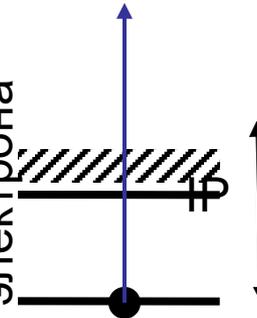
антипротония



Уровни  
антипротона



Уровни  
электрона



# Метастабильные состояния мезоатомов



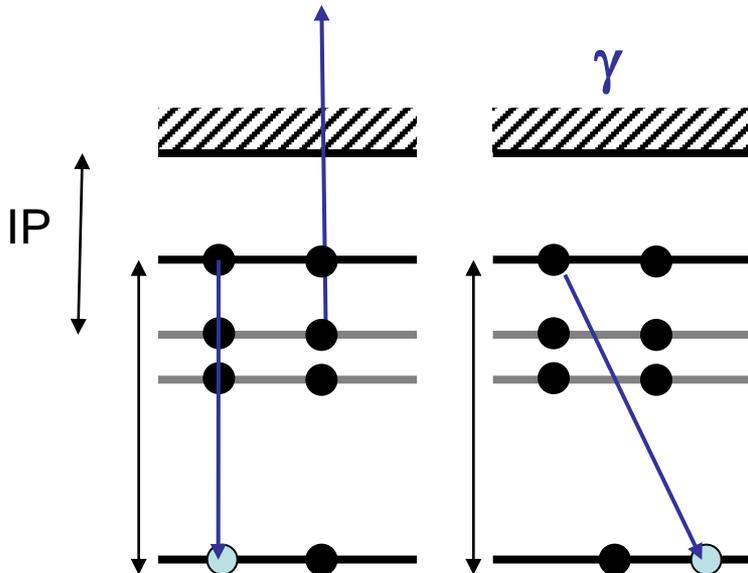
## PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 23

14 JULY 1969

NUMBER 2

### Оже-распад и радиационный распад



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.

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.

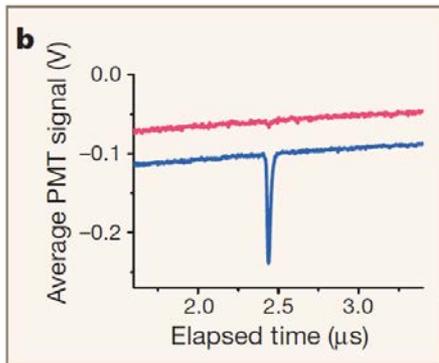
atom	$n$	$E_b$ (Ry)	$ \Delta n _{\min}$	$E_A$ (Ry)	$P_A$ ( $\text{sec}^{-1}$ )	$P_R$ ( $\text{sec}^{-1}$ )
$\alpha\pi^-e^-$	16	-5.56	3	0.67	$4 \times 10^9$	$2.8 \times 10^7$
	15	-6.01	2	0.22	$2 \times 10^{12}$	$4.8 \times 10^7$
$\alpha K^-e^-$	29	-5.50	5	0.43	$6 \times 10^2$	$4.4 \times 10^6$
	28	-5.73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

# Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

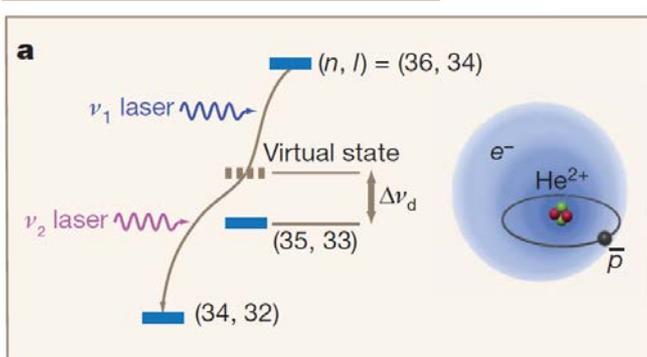


Для  $\bar{p}\text{He}^+$  распаду препятствует большая энергия связи электрона  $\sim 25$  эВ и большое значение мультипольности соответствующего (большое  $\Delta l$ ), и атом существует микросекунды

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

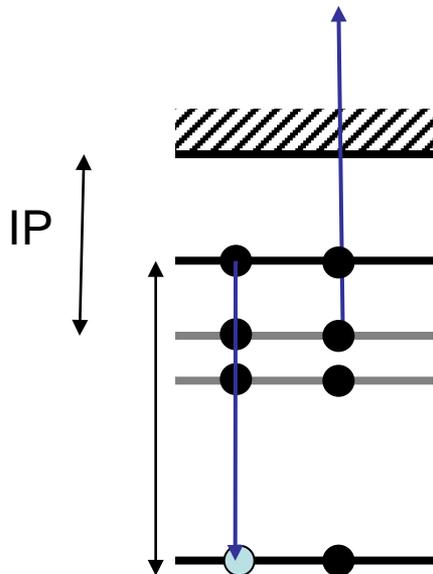


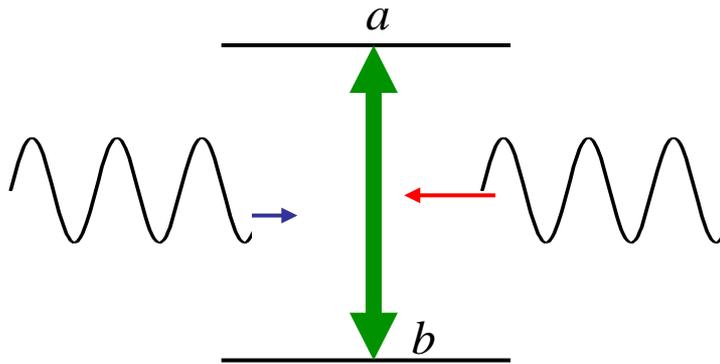
TABLE II. Nonrelativistic energies  $E_{nr}$ , half-widths  $\Gamma/2$ , and the expectation values of the most important operators for individual states of  ${}^4\text{He}^+\bar{p}$ . All quantities are in atomic units.

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)	$4.7602 \times 10^{-9}$	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

# 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

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

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

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

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

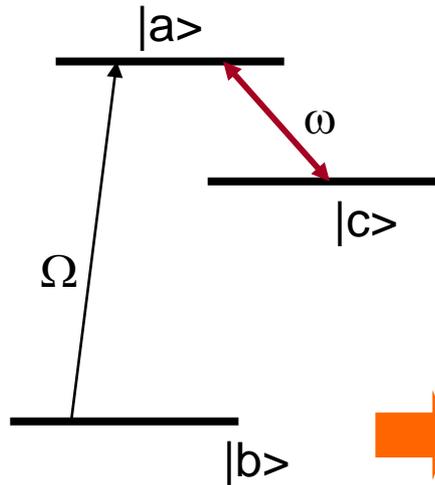
$$\vec{F} = \Gamma_a \vec{k} \frac{\Omega_R^2}{4\Delta^2 + \Gamma^2 + 2\Omega_R^2} \quad \longrightarrow \quad \sim \frac{\Gamma_a \vec{k} \Omega_R^2}{4(\Delta \mp kv)^2 + \Gamma^2 + 2\Omega_R^2}$$

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

Сила трения

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

# Индукцированная прозрачность в $\lambda$ -системе



Решение уравнения, осциллирующее на частоте падающего поля

$$\chi(\Omega) = \frac{iN|d_{ab}|^2(\gamma_c + i\Delta)}{2(\Delta^2 - \gamma_a\gamma_c + \Omega_\mu^2/4 - i\Delta(\gamma_a + \gamma_c))}$$



$$\rightarrow -\frac{N|d_{ab}|^2(\Delta - i\gamma_c)}{2\sqrt{\Omega_\mu^2 - (\gamma_a - \gamma_c)^2}} \left( \frac{1}{\Delta - \Delta_r^{(1)}} - \frac{1}{\Delta - \Delta_r^{(2)}} \right)$$

$$\Delta_r = \frac{i(\gamma_a + \gamma_c) \pm \sqrt{\Omega_\mu^2 - (\gamma_a - \gamma_c)^2}}{2} \rightarrow \frac{i(\gamma_a + \gamma_c) \pm \Omega_\mu}{2}$$

Действительная и мнимая части нелинейной восприимчивости:

$$\chi(\Omega) = -\frac{N|d_{ab}|^2 \Delta(\Delta^2 - \Omega_\mu^2/4 + \gamma_c^2)}{2\left(\left(\Delta^2 - \gamma_a\gamma_c + \Omega_\mu^2/4\right)^2 + \Delta^2(\gamma_a + \gamma_c)^2\right)} +$$

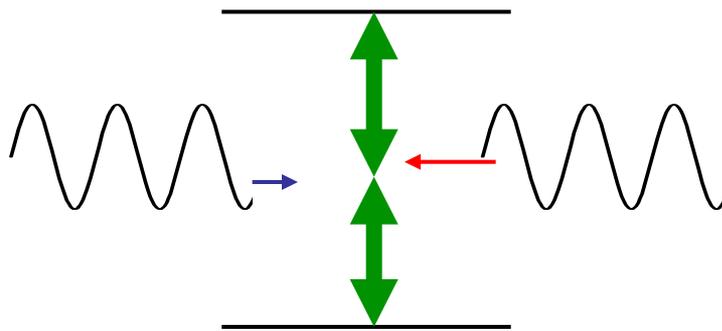
$$i \frac{N|d_{ab}|^2(\gamma_c(-\gamma_a\gamma_c - \Omega_\mu^2/4) - \gamma_a\Delta^2)}{2\left(\left(\Delta^2 - \gamma_a\gamma_c + \Omega_\mu^2/4\right)^2 + \Delta^2(\gamma_a + \gamma_c)^2\right)}$$

# Двухфотонная лазерная спектроскопия антипротония

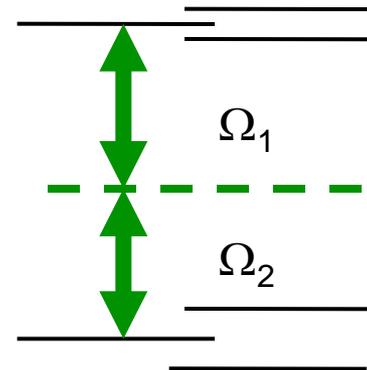
$$\bar{p}\text{He}^+ \quad \sim \nu \sqrt{8\tilde{k}_B T \log(2)/Mc^2}; \quad - \text{Допплеровская ширина}$$

## 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

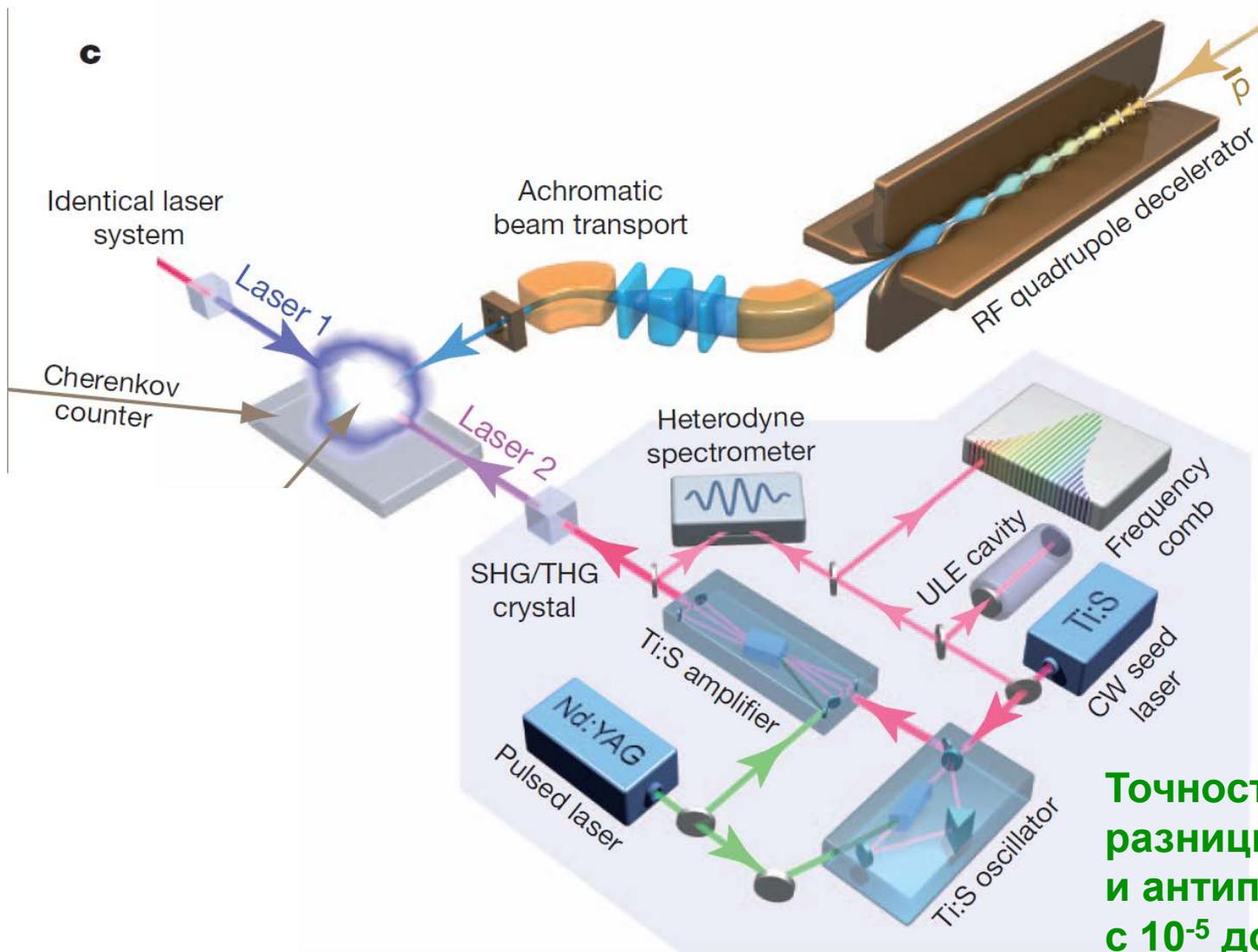


Интенсивности,  
такие что  $\Omega_1 = \Omega_2$

В пределе Допплеровская ширина (первого порядка) 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  $10^{-10}$