

Эффекты внешних магнитных полей в простых атомных системах

Д.Бакалов, В.И.Коробов

В настоящее время идут прецизионные эксперименты по измерению:

- Спектра нижних ро-вибрационных состояний HD^+ (S.Schiller, Duesseldorf);
- Сверхтонкого спектра метастабильных состояний антипротонного гелия-4 (коллаборация ASACUSA, CERN)

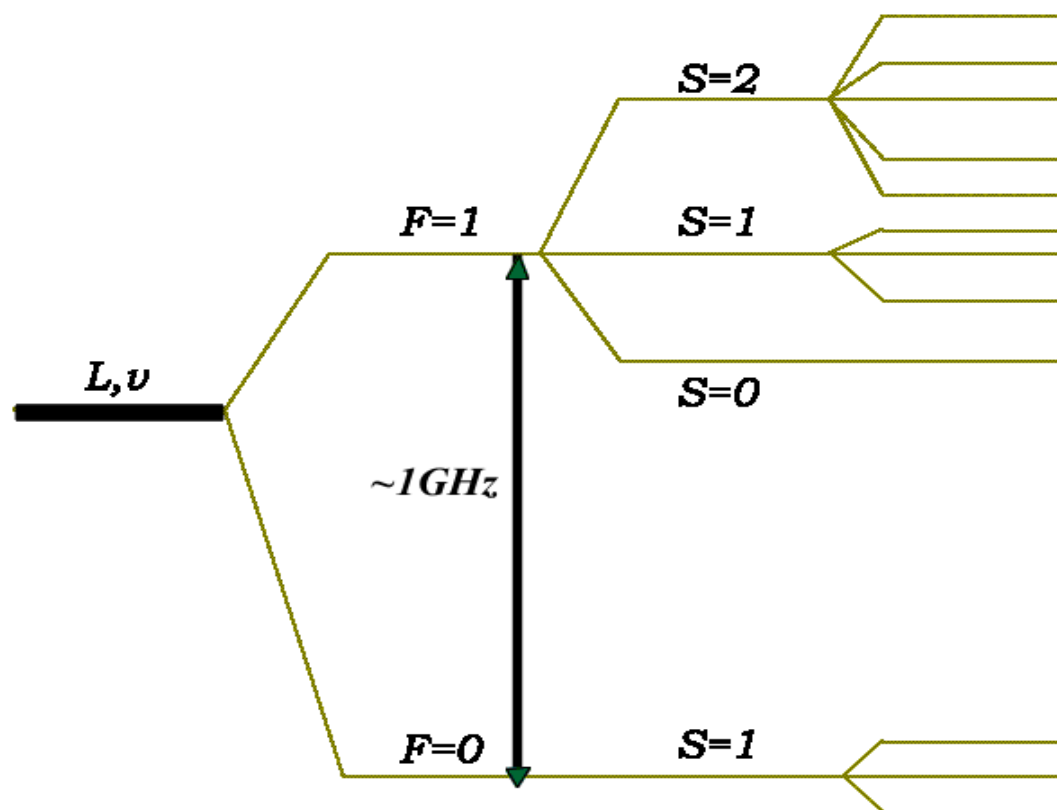
Цели экспериментов включают:

- Уточнение значений фундаментальных постоянных m_e/m_p , m_e/m_{p^-} и m_e/m_d ;
- Уточнение значения дипольного магнитного момента антипротона μ_{p^-} ;
- Исследование постоянства α

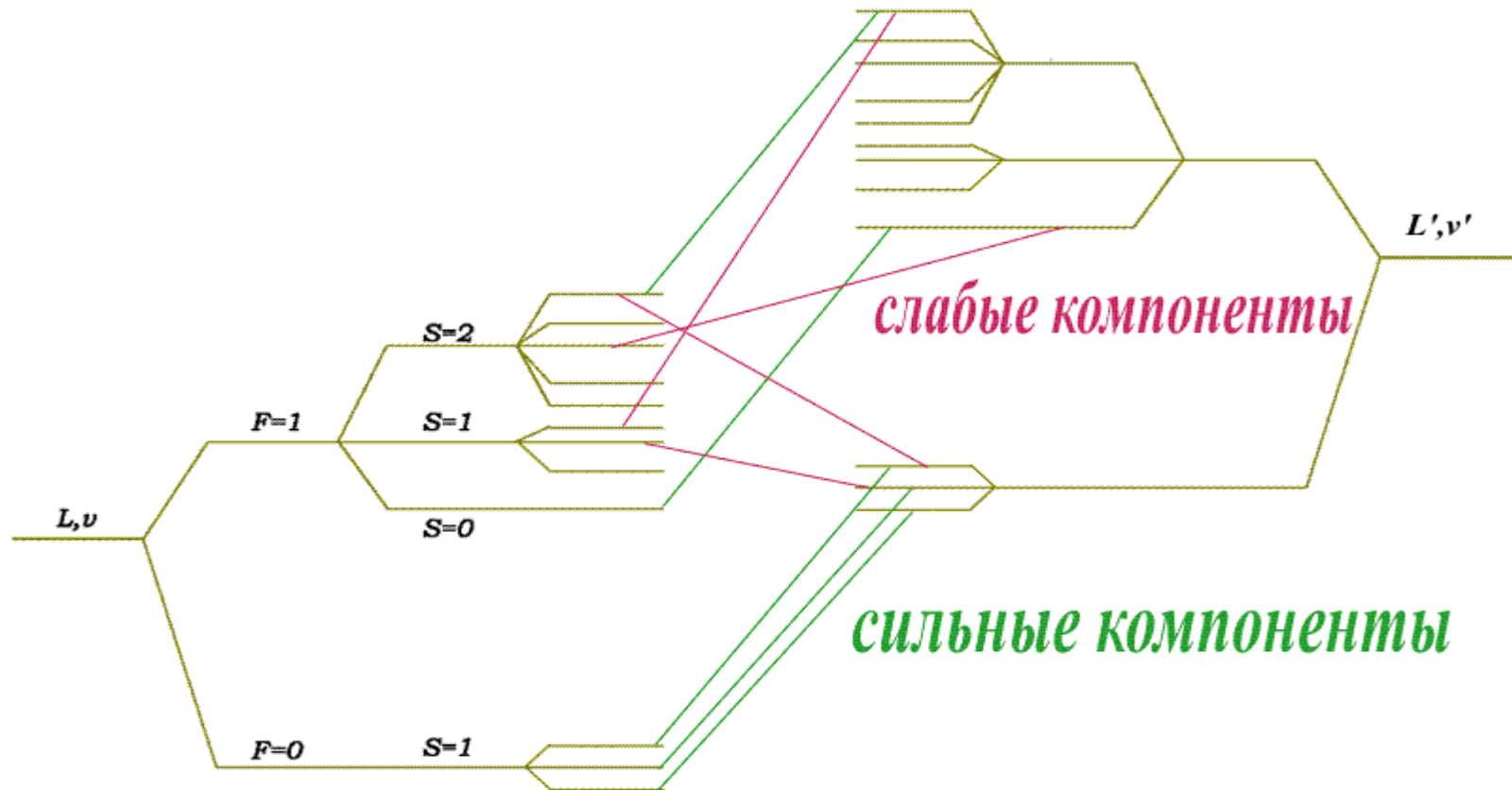
Экспериментальная точность:

- Однофотонные переходы в HD^+ :
точность 2 ppb, разрешение 300 kHz;
- Двухфотонные переходы в HD^+ :
точность 0.3 ppb, разрешение 10 kHz;
- Сверхтонкое расщепление в атоме
антипротонного гелия-4:
точность 5 ppt, разрешение ~ 300 MHz;

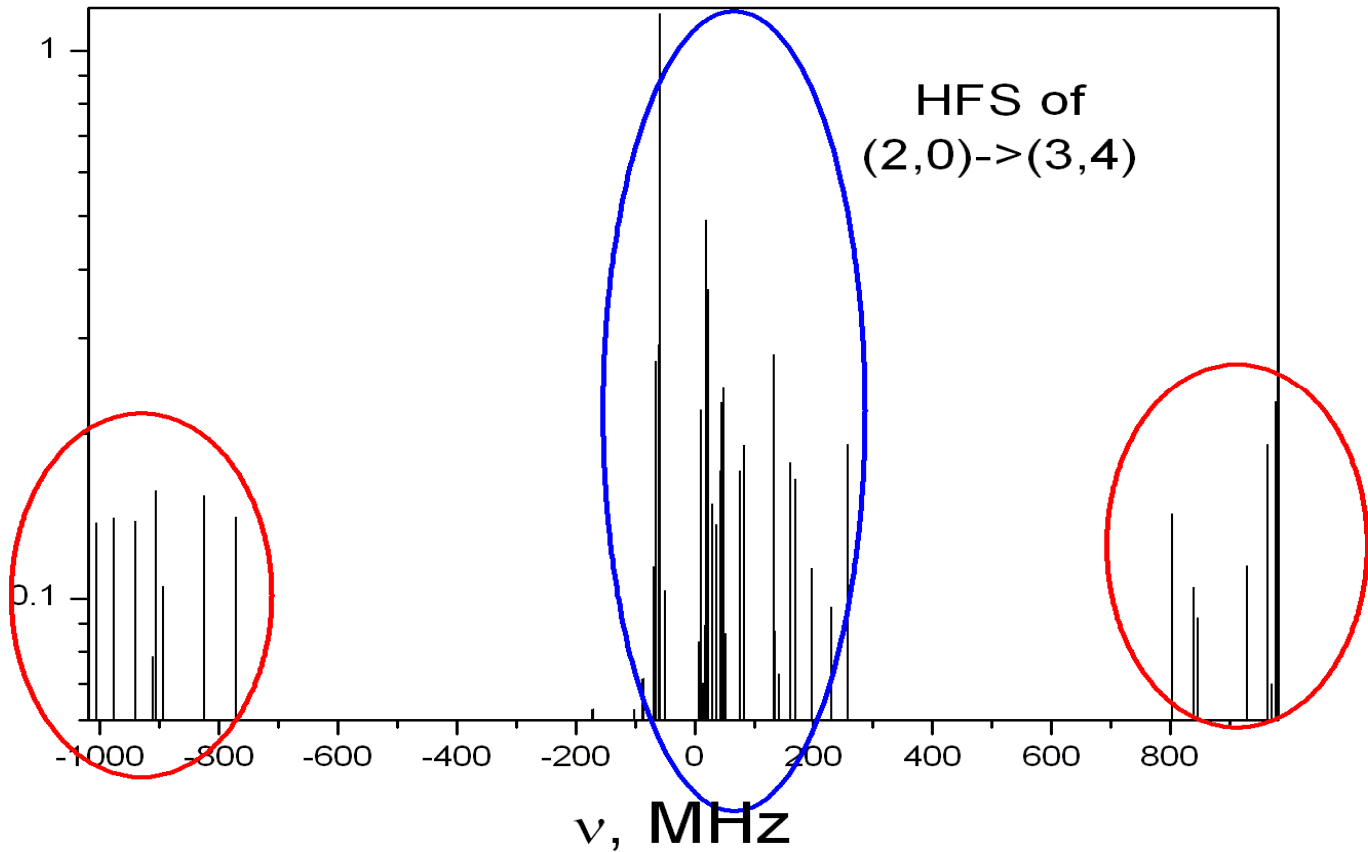
Сверхтонкая структура уровней HD^+



HFS линий перехода $(2,0) \rightarrow (3,4)$



HFS линий перехода $(2,0) \rightarrow (3,4)$



Теоретическая точность

- Уровни энергии HD^+ с точностью 10^{-9} ,
HFS в антипротонном гелии-4:
Релятивистские и КЭД поправки $O(\alpha^6)$?
- Двухфотонные переходы в HD^+ :
Релятивистские и КЭД поправки $O(\alpha^7)$?

Теоретическая точность

- Уровни энергии HD^+ с точностью 10^{-9} ,
HFS в антипротонном гелии-4:
Релятивистские и КЭД поправки $O(\alpha^6)$?
- Двухфотонные переходы в HD^+ :
Релятивистские и КЭД поправки $O(\alpha^7)$?
- Пока нерешенные задачи, однако...

Теоретическая точность

Для вычисления **сильных** компонент
HFS с точностью **.5 ppb** достаточно
использовать Гамильтониан Брейта H^{Br} с
учетом ведущих вершинных поправок
(*Phys.Rev.Lett.*97, 2006)

HD⁺ во внешнем магнитном поле

- Нас интересуют слабые поля $B < 10\text{G}$.
- Для таких полей исполнено $\Delta E^Z < \Delta E^{\text{hfs}}$
- Взаимодействие с магнитным полем:

$$H^Z = -\sum \frac{e}{2M_i c} (Z_i (\mathbf{R}_i \times \mathbf{P}_i) \cdot \mathbf{B} + 2\mu_i \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{B})$$

КЭД поправки – превышение точности

HD^+ во внешнем магнитном поле

Зеемановское расщепление уровней HD^+

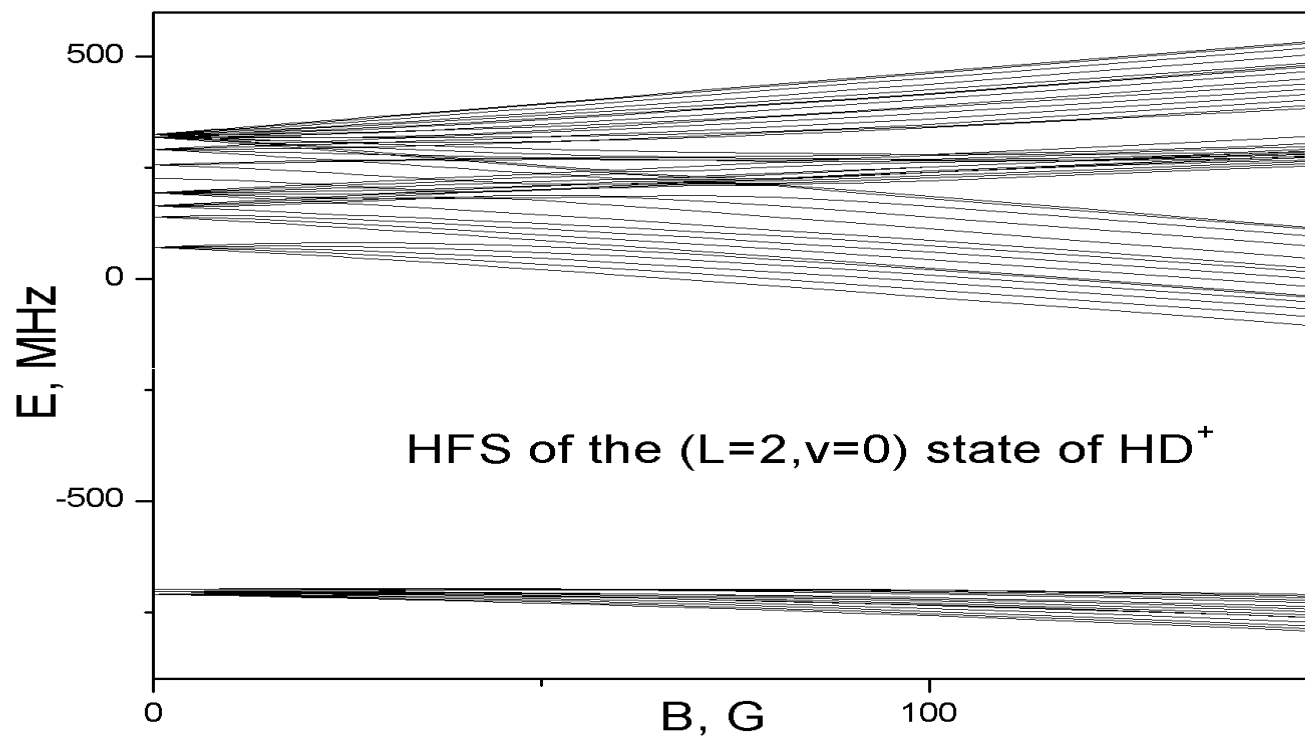
Диагонализуются гамильтониан

$$H = H^{\text{Br}} + H^{\text{Z}}$$

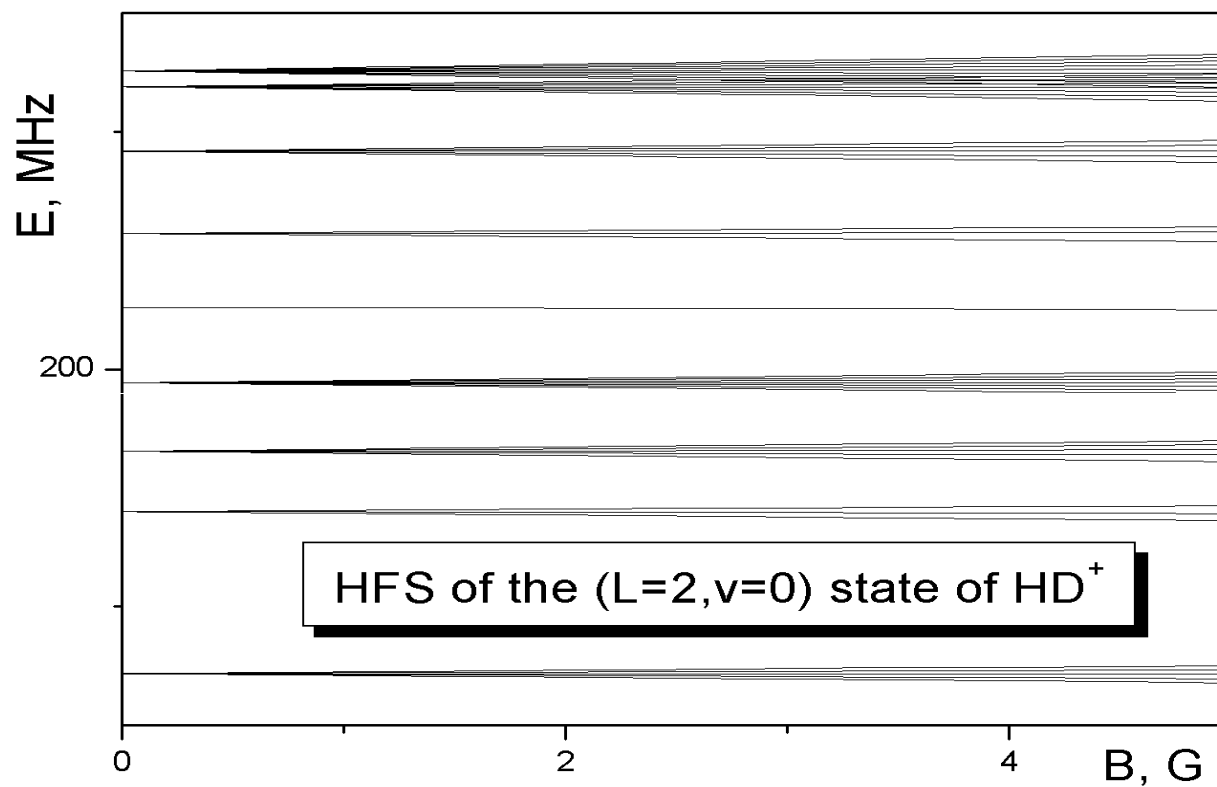
Число уровней сильно возрастает.

Перестройка спектра при $B > 10^2 \text{ G}$.

HD^+ во внешнем магнитном поле



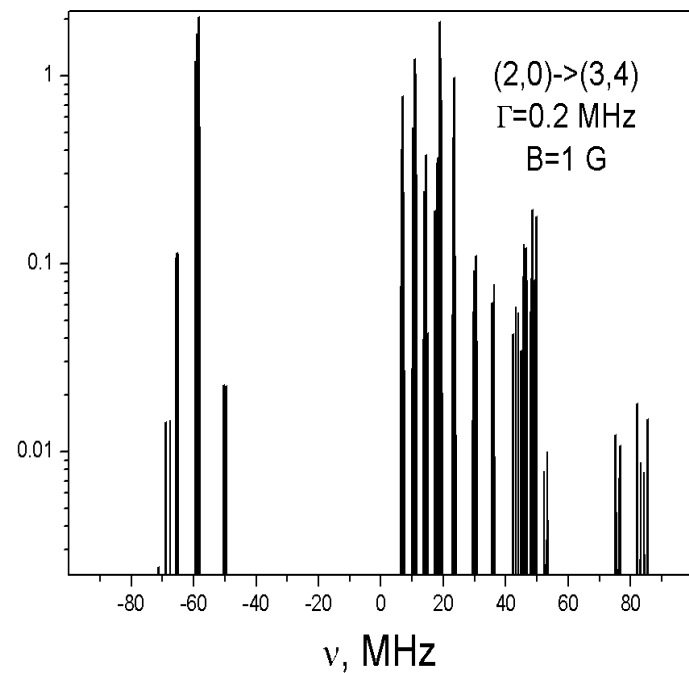
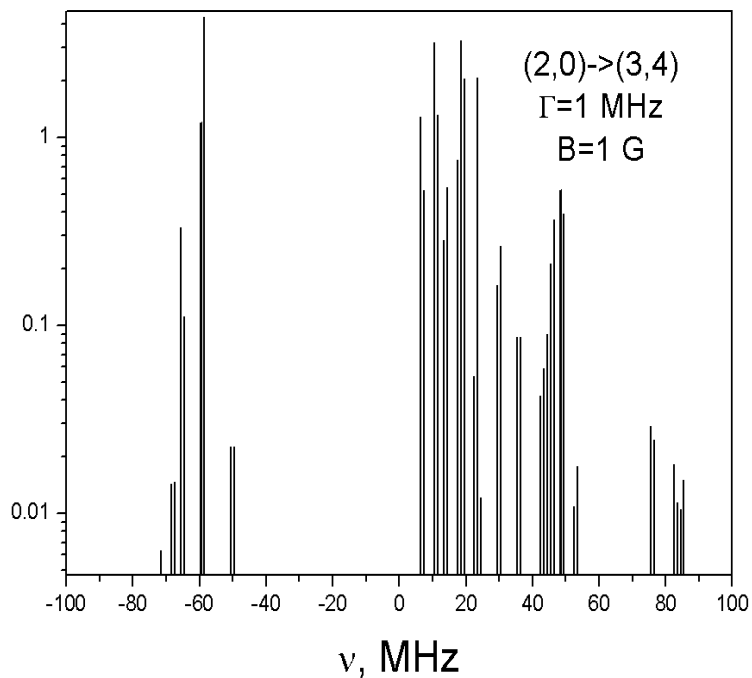
HD^+ во внешнем магнитном поле



HFS спектра HD^+ во внешнем поле

- Разрешимость отдельных компонент
- Уширение HFS линий при малых $B \ll 1 \text{ G}$
- Сдвиг “центра тяжести” при $B \sim 1 \text{ G}$

HFS спектра HD^+ во внешнем поле



HFS спектра HD^+ во внешнем поле

B=0	B=.5 G	B=1 G
6.902	6.905	6.911
10.572	10.569	10.529
11.001	11.000	11.010
14.257	14.260	14.266
17.978	17.636	17.318
18.159	18.204	18.090
23.482	23.476	23.464

Значение вычисленных поправок

- Сдвиг (при $B=1$ G): от 10 до >100 MHz
- Достигнутая ныне точность: 300 MHz
(*Phys.Rev.Lett.*98, 173002 (2007))

однако

“... there are no obvious limitations for improvement of the experimental accuracy by 1 order of magnitude...”

Структура двухфотонного спектра

$B=0$	$B_T=.5G$	$B_L=.5G$	$B_T=1G$	$B_L=1G$
-8.883	-8.848	-8.883	-8.796	-8.882
-2.314	-2.366	-2.314	-2.409	-2.315
21.305	21.475	20.305	21.609	21.308
23.404	23.362	23.401	23.328	23.396
27.736	27.682	27.734	27.597	27.731

Значение вычисленных поправок

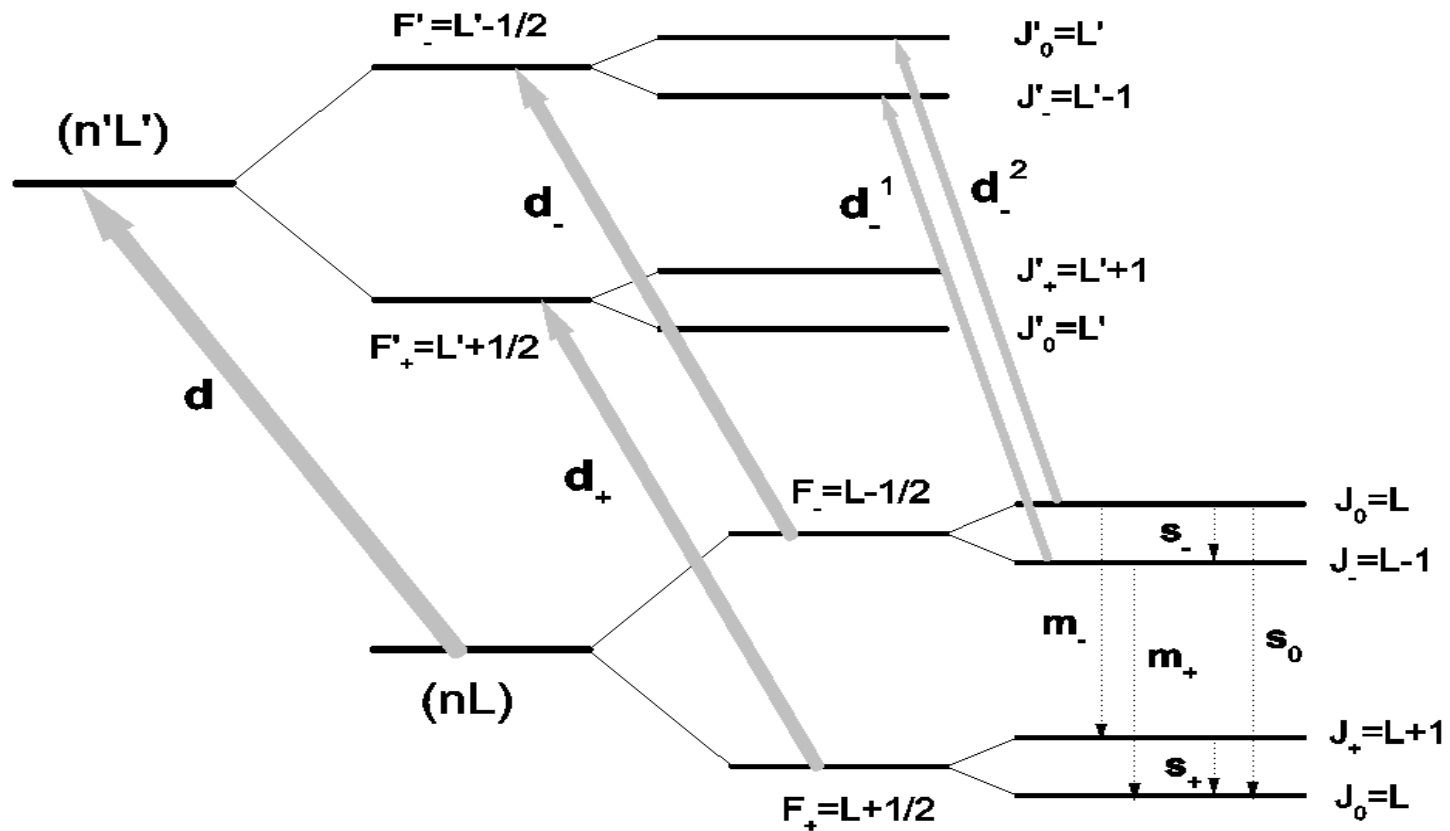
- Рассмотрен пример перехода $(10) \rightarrow (12)$
- Сдвиг в поперечном поле $B = .5G$ ($\sim 50 \dots 100$ MHz) - велик по сравнению с экспериментальной точностью
- Сдвиг в продольном поле пренебрежим

“Сдвиги” обусловлены тем, что:

- Зеемановское расщепление – несимметрично
- Скорости переходов между разными m_z -компонентами отличаются
- Не учтено, что заселенности уровней могут отличаться: при $B=1\text{G}, T=10\text{mK}$

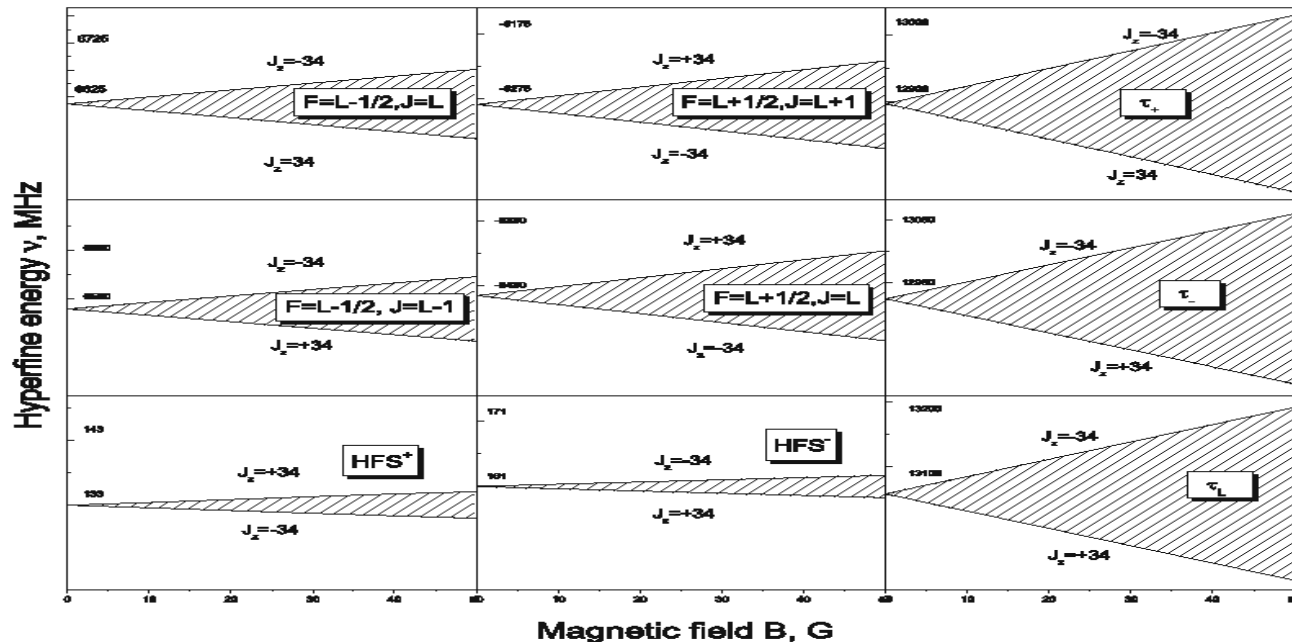
$$\Delta E^Z \sim 2 \text{ MHz} \sim 10^{-8} \text{ eV}, \quad kT \sim 10^{-6} \text{ eV},$$
$$\Delta E^Z / kT \sim 10^{-2}$$

HFS антипротонного гелия-4

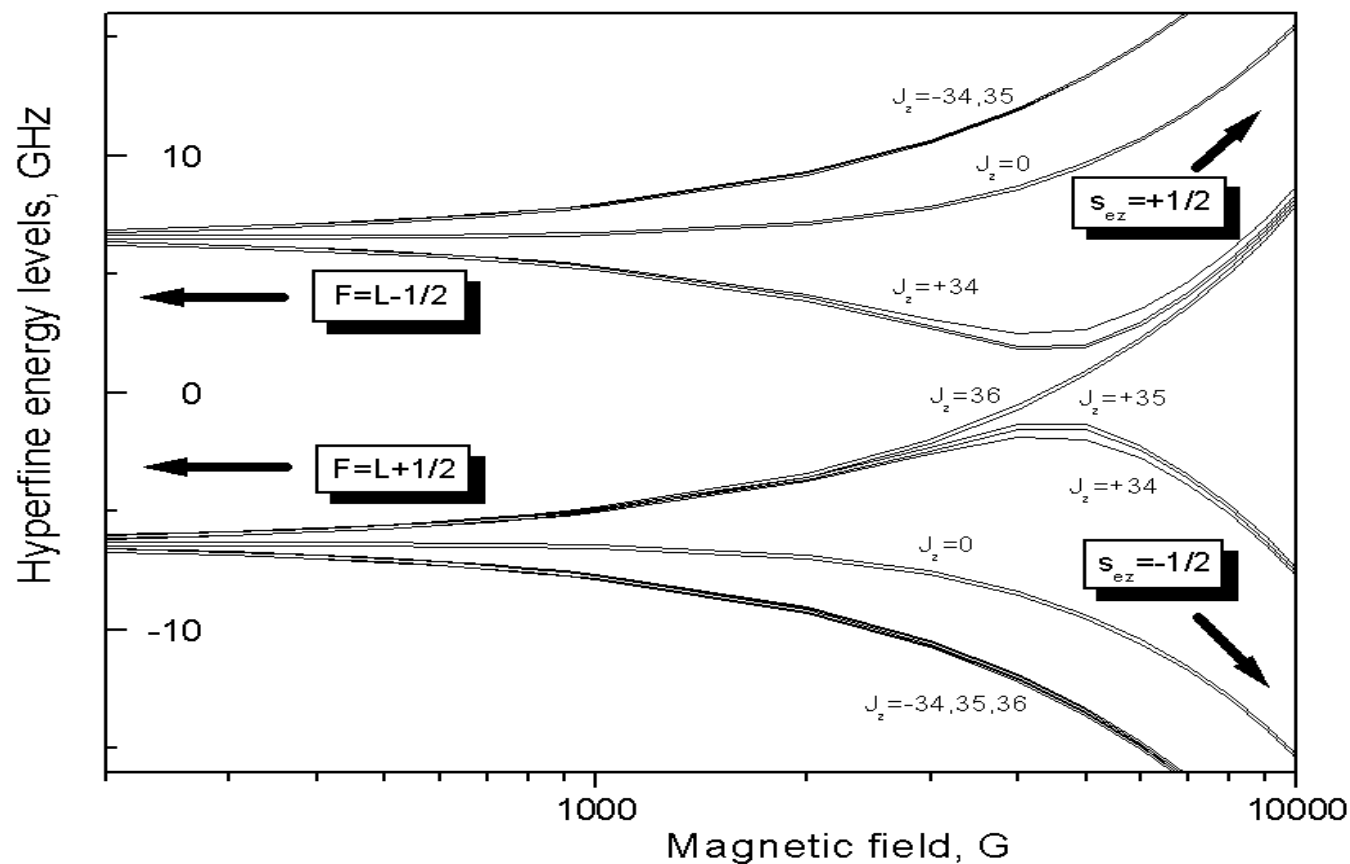


Антипротонный гелий в слабом поле

- “Перестройка” спектра при $B > 1000$ G
- При $B < 1$ G – уширение линий.



Антипротонный гелий в сильном поле



Антипротонный гелий в сильном поле

