ЯДЕРНЫЕ СТЕПЕНИЯ СВОБОДЫ В АТОМНОЙ ФИЗИКЕ

Е.В. Грызлова

НИИЯФ МГУ

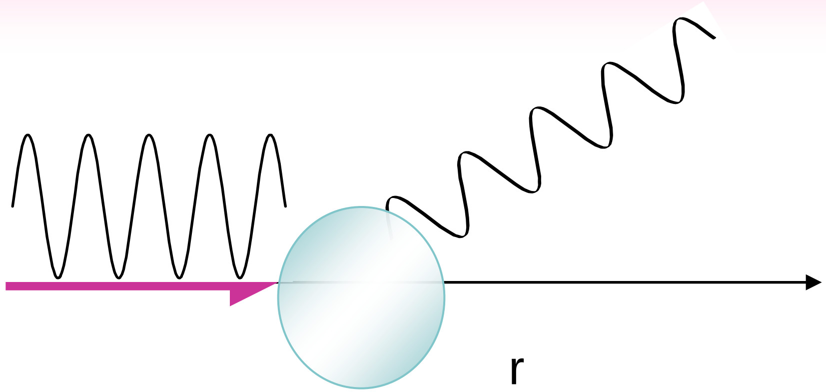
Весенний семестр 2020 г.

- «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

Резонансы в атомной и ядерной физике и неэкспоненциальный распад

а) рассеяние на квазидискретном уровне.
б) Вырождение квантовых уровней.
в) комплексная квазиэнергия и двойные полюса S-матрицы.

Начала теории рассеяния



Некоторые свойства амплитуды рассеяния

$$\boxed{f(\theta) = \frac{1}{2ik}\sum_l (2l+1)(S_l - 1)P_l(\cos\theta)}$$

$S_l = e^{2i\delta_l}$ **- матрица рассеяния**

$$\psi(\vec{r}) \to e^{ikz} + \frac{f(n,n')}{r}e^{ikr},$$

Сечение рассеяния

$$\sigma = \int |f(\theta)|^2 d\Omega = \frac{4\pi}{k^2}\sum_l (2l+1)\sin^2\delta_l$$

Парциальные характеристики рассеяния

$$f(\theta) = \sum_l (2l+1) f_l P_l(\cos\theta)$$

$$f_l = \frac{1}{2ik}(S_l - 1) = \frac{e^{2i\delta_l} - 1}{2ik} = \frac{1}{k(ctg\delta_l - i)}$$

$$\sigma_l = 4\pi(2l+1)|f_l|^2$$

Начала теории рассеяния

Рассеяние при наличии резонанса l=0

$$\chi = r\cdot\psi(r) = A(E)e^{-\sqrt{-2E}r} + B(E)e^{\sqrt{-2E}r}$$

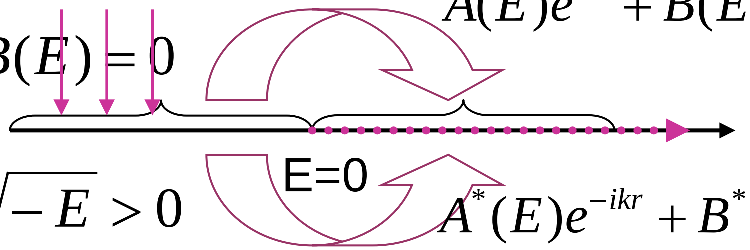
Будем рассматривать *E* как комплексную переменную

дискретные состояния

$$B(E) = 0$$

$$A(E)e^{ikr} + B(E)e^{-ikr} \qquad k = \sqrt{2E}$$

$$A, B \subset \Re$$



$$\sqrt{-E} > 0$$

$$A^*(E)e^{-ikr} + B^*(E)e^{ikr}$$

$$A(E) = B^*(E)$$

$$\chi \approx C\left(e^{i(kr+\delta_0)} - e^{-i(kr+\delta_0)}\right) \qquad e^{2i\delta_0} = -\frac{A(E)}{B(E)}$$

$$f_0 = \frac{1}{2ik}(e^{2i\delta_0} - 1) = \frac{1}{2\sqrt{-2E}}\left(\frac{A(E)}{B(E)} + 1\right)$$

Дискретные уровни являются простыми полюсами для амплитуды рассеяния

Начала теории рассеяния

Рассеяние при наличии дискретного состояния в точке $E=E_0$

$l=0$

$$\chi = r\cdot\psi(r) = A(E)e^{-\sqrt{-2E}r} + B(E)e^{\sqrt{-2E}r}$$

$$\chi''(r) + 2(E-U(r))\chi(r) = 0; \quad \frac{\partial\chi''(r)}{\partial E} + 2(E-U(r))\frac{\partial\chi(r)}{\partial E} = -2\chi(r)$$

$$\chi'(r)\frac{\partial\chi(r)}{\partial E} - \chi(r)\frac{\partial\chi'(r)}{\partial E} = 2\int\chi(r)^2 dr$$

$$A(E)\approx A(E_0) = A_0; \quad B(E) = (E+|E_0|)\frac{\partial B}{\partial E} = (E+|E_0|)\beta$$

$$\beta = -\frac{1}{A_0\sqrt{2|E|}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{-2E}}\left(\frac{A(E)}{B(E)}+1\right) \qquad \Rightarrow -\frac{A_0^2}{2}\frac{1}{E+|E_0|}$$

Вычет определяется коэффициентом A_0

Начала теории рассеяния

Рассеяние при наличии дискретного состояния в точке E=E$_0$; Произвольное значение орбитального момента *l*

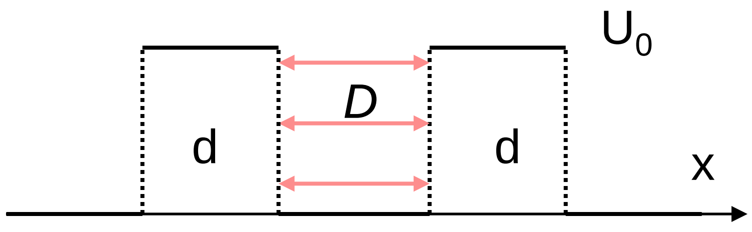
$$\chi = r \cdot \psi(r) \sim \exp\left(-i \cdot (kr - \frac{l\pi}{2} + \delta_l)\right) - \exp\left(i \cdot (kr - \frac{l\pi}{2} + \delta_l)\right)$$

$$f_l = \frac{1}{2\sqrt{-2E}}\left((-1)^l \frac{A(E)}{B(E)} + 1\right)$$

Главный член амплитуды рассеяния

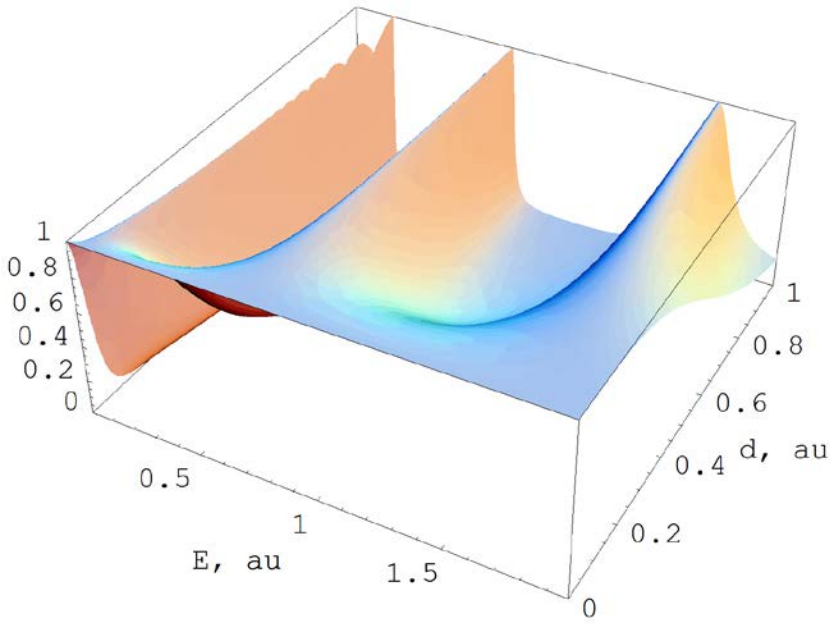
$$f \approx (2l+1) f_l P_l(\cos\theta) = (-1)^{l+1} \frac{A_0^2}{2} \frac{1}{E + |E_0|} (2l+1) P_l(\cos\theta)$$

Автоионизационные состояния



Автоионизационное (квазидискретное) состояние - резонанс

U_0=2 au, D=4 au



E_1=0.20
E_2=0.77
E_3=1.62

Начала теории рассеяния

Рассеяние на квазидискретном уровне $E=E_0-i\cdot\Gamma/2$

$$\chi \sim \exp(-i\cdot Et) = \exp\left(i\cdot E_0 t - \frac{\Gamma}{2}\right)$$

$$B_l(E_0 - i\frac{\Gamma}{2}) = 0$$

- Квазилискретные состояния

$$R_l(r) \sim \frac{1}{r}\left((E - E_0 - \frac{i\Gamma}{2})b_l^+ \exp(i\cdot kr) + (E - E_0 + \frac{i\Gamma}{2})b_l \exp(-i\cdot kr)\right)$$

$$A_l(E) = B_l^*(E)$$

$$e^{2i\delta_l} = \frac{E - E_0 - i\cdot\Gamma/2}{E - E_0 + i\cdot\Gamma/2} e^{2i\delta_l^{(0)}} = \left(1 - \frac{i\cdot\Gamma}{E - E_0 + i\cdot\Gamma/2}\right) e^{2i\delta_l^{(0)}}$$

Где фаза вдали от резонанса

$$e^{2i\delta_l^{(0)}} = (-1)^{l+1}\frac{b_l^+}{b_l}$$

$$\delta_l = \delta_l^{(0)} - arctg\frac{\Gamma}{2(E - E_0)}$$

При прохождении вдоль резонанса фаза меняется на π

Полный поток в расходящейся волне должен совпадать с вероятностью распада

$$\Rightarrow \quad |b_l|^2 = \frac{1}{k\Gamma}$$

Начала теории рассеяния

Рассеяние на квазидискретном уровне E=E$_0$-i·Γ/2

$$\boxed{f(\theta) = f^{(0)}(\theta) - \frac{2l+1}{k}\frac{\Gamma/2}{E - E_0 + i\cdot\Gamma/2}e^{2i\delta_l^{(0)}}P_l(\cos\theta)}$$

Резонансное рассеяние

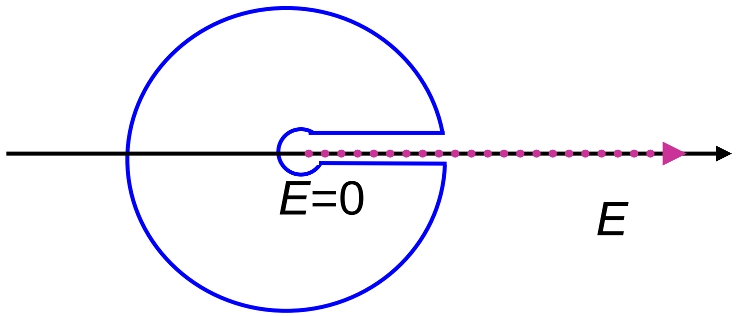
Потенциальное рассеяние

$$\boxed{f^{(0)}(\theta) = \frac{1}{2ik}\sum_l (2l+1)(S_l - 1)P_l(\cos\theta)}$$

Начала теории рассеяния

Дисперсионное соотношение для амплитуды рассеяния

Физический лист



$$\Delta\psi(r)+k^2\psi(r)=2\cdot U(r)\psi(r)$$

Решение в виде запаздывающего потенциала

$$\psi(r)=-\frac{e^{ikr}}{4\pi r}\int 2U(r')\psi(r')e^{i(k-k')r'}dv'$$

$$f(0,E)=-\frac{1}{2\pi}\int U(r')\psi(r')e^{-ikz}dv'$$

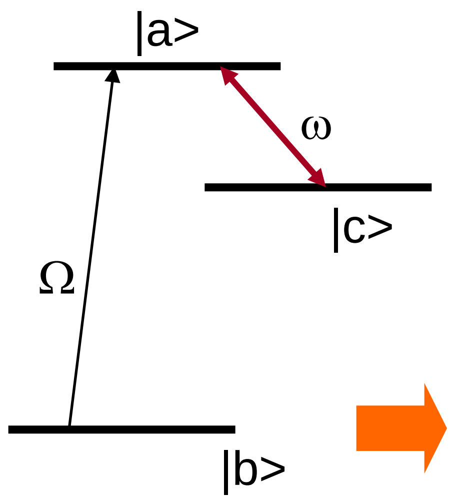
Амплитуда рассеяния регулярна на всем физическом листе, за исключением дискретных состояний спектра

$$\frac{1}{2\pi i}\oint\frac{f(0,E')-f_b}{E'-E}dE'$$

$$\boxed{f(0,E)=f_b(0)+\frac{1}{\pi}\int_0^\infty\frac{\mathrm{Im}(f(0,E'))}{E'-E}dE'+\sum_n\frac{d_n}{E-E_n}}$$

$$d_n=(-1)^{l_n+1}(2l_n+1)\frac{A_{0(n)}^2}{2}$$

Индуцированная прозрачность в λ-системе



Решение уравнения, осциллирующее на частоте падающего поля

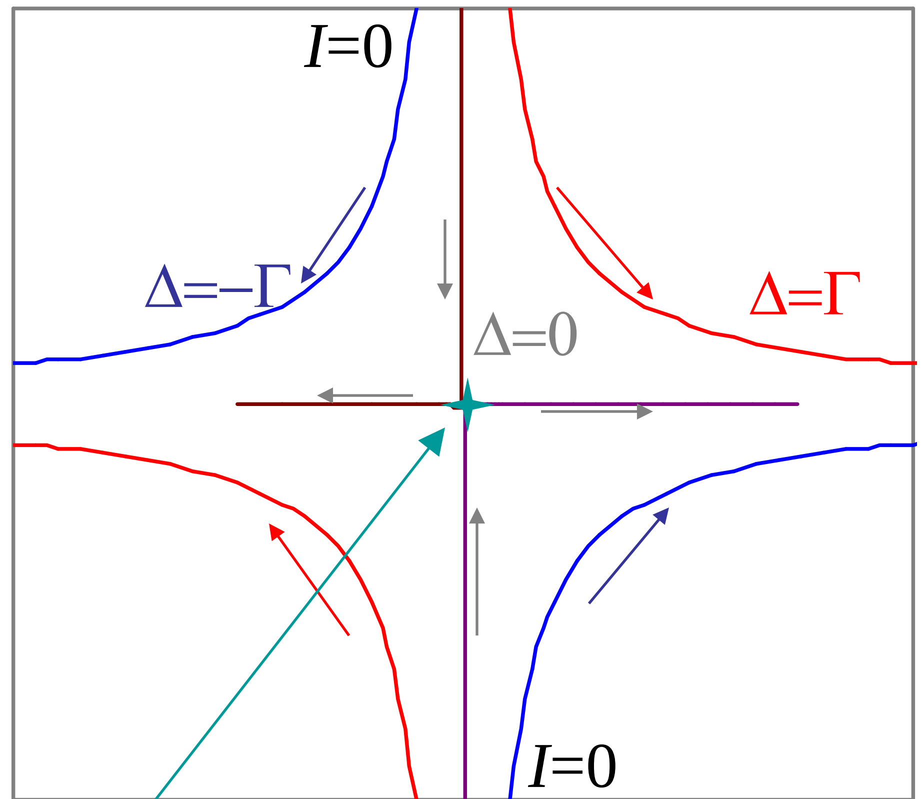
$$\chi(\Omega)=\frac{iN\left|d_{ab}\right|^{2}(\gamma_{bc}+i\Delta)}{2\left(\Delta^{2}-\gamma_{ab}\gamma_{bc}-\Omega_{\mu}^{2}/4-i\Delta(\gamma_{ab}+\gamma_{bc})\right)}$$

$$-\frac{N\left|d_{ab}\right|^{2}(\Delta-i\gamma_{c})}{2\sqrt{\Omega_{\mu}^{2}-(\gamma_{a}-\gamma_{c})^{2}}}\left(\frac{1}{\Delta-\Delta_{r}^{(1)}}-\frac{1}{\Delta-\Delta_{r}^{(2)}}\right)$$

$$\Delta_{r}=\frac{i(\gamma_{a}+\gamma_{c})\pm\sqrt{\Omega_{\mu}^{2}-(\gamma_{a}-\gamma_{c})^{2}}}{2}\rightarrow\frac{i(\gamma_{a}+\gamma_{c})\pm\Omega_{\mu}}{2}$$

Динамика собственных значений матрицы эффективного гамильтониана при изменении интенсивности лазерного поля

$\Gamma = -2\,\mathrm{Im}(E_e)$



E_e – собственные значения матрицы неэрмитового эффективного гамильтониана

$E = \mathrm{Re}(E_e)$

Дважды вырожденные собственные значения, соответствующего двойному полюсу S-матрицы