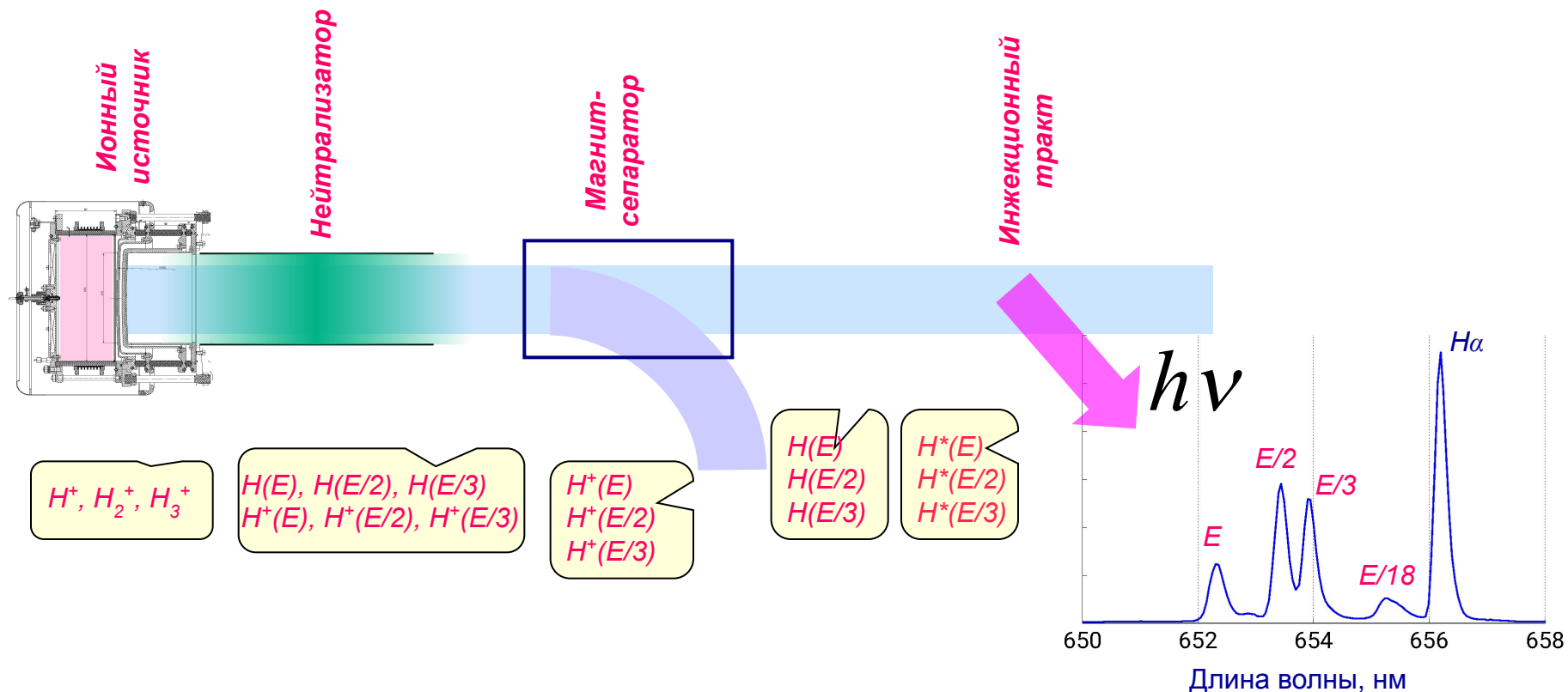


Об интерпретации результатов Доплеровской спектроскопии атомарных пучков

С.В. Полосаткин

Доплеровская спектроскопия атомарных пучков



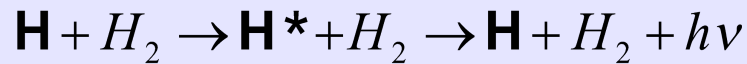
Атомарные пучки содержат компоненты частиц с дробными энергиями ($E/2, E/3, E/18$)

Для определения компонентного состава атомарных пучков используется спектроскопия Доплеровски смещенных линий атомов водорода

Доплеровская спектроскопия атомарных пучков

Относительное содержание различных компонент определяется по соотношению интенсивностей смещенных линий $H\alpha$

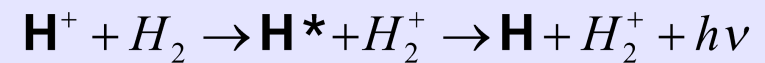
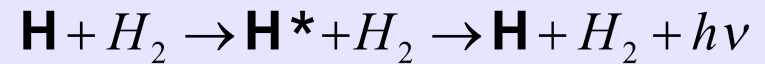
Атомарный пучок “с магнитом”



$$\frac{\eta(H_k^+)}{\eta_\Sigma} = \frac{c_{k0} \cdot I_k}{\sum_k c_{k0} \cdot I_k}$$

$$c_{k0} = \frac{\sigma_{H\alpha}^0(E) \cdot f^0(E)}{\sigma_{H\alpha}^0(E/k) \cdot f^0(E/k)}$$

Смешанный пучок “без магнита”



$$\frac{\eta(H_k^+)}{\eta_\Sigma} = \frac{c_k \cdot I_k}{\sum_k c_k \cdot I_k}$$

$$c_k = \frac{\sigma_{H\alpha}^0(E) \cdot f^0(E) + \sigma_{H\alpha}^+(E) \cdot f^+(E)}{\sigma_{H\alpha}^0(E/k) \cdot f^0(E/k) + \sigma_{H\alpha}^+(E/k) \cdot f^+(E/k)}$$

η – концентрации соответствующих ионов на выходе из ионного источника (“на сетке”)

I_k – интенсивности смещенных линий $H\alpha$

f^0, f^+ – коэффициенты конверсии в нейтрализаторе

$\sigma_{H\alpha}^0, \sigma_{H\alpha}^+$ - эффективные сечения генерации $H\alpha$ атомами и ионами

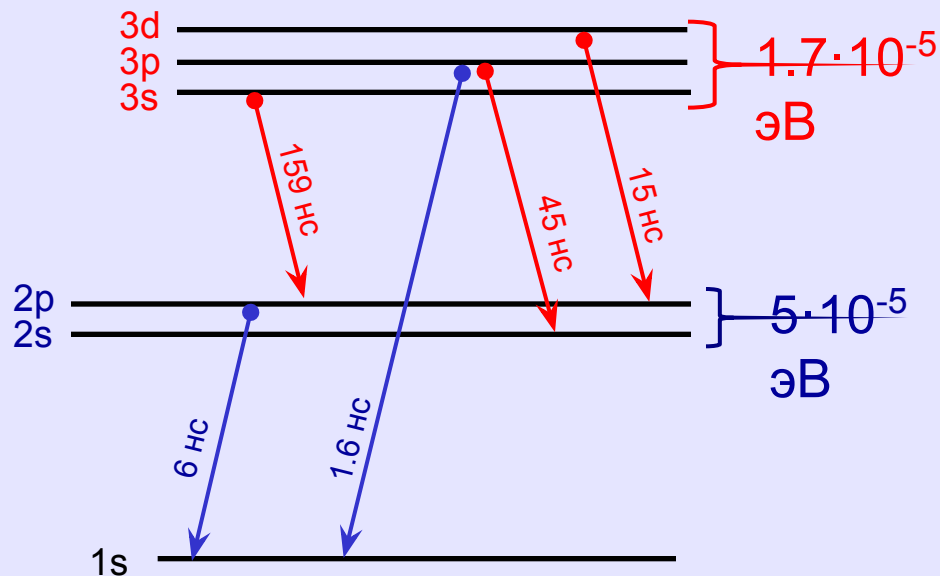
Как найти сечение генерации $H\alpha$?



$$\sigma_{H\alpha}^0 = \sum \sigma_{1 \rightarrow 3}^{ex} \times K_{br}$$

σ_{3s} 1
 σ_{3p} 0.12
 σ_{3d} 1

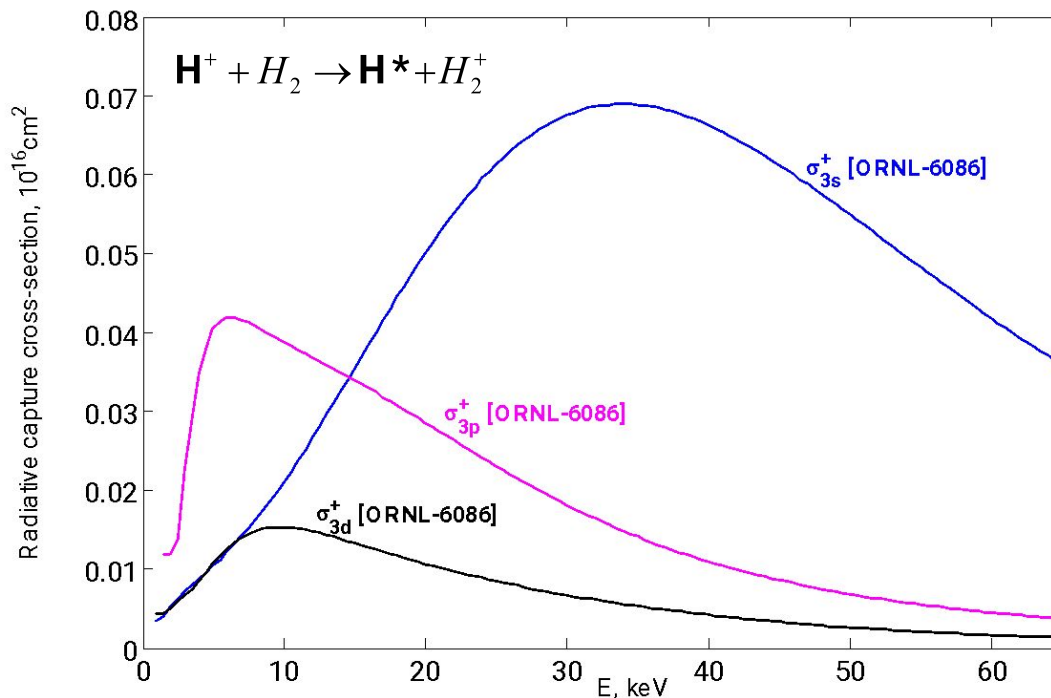
Излучательные переходы в атоме водорода



Как найти сечение генерации $H\alpha$?

Учет распределения заселенностей внутри тонкой структуры уровня необходим, если выполняются следующие условия:

- Сечения возбуждения σ_{3s} , σ_{3p} , σ_{3d} имеют разные энергетические зависимости
- Есть переходы между подуровнями тонкой структуры



Переходы между подуровнями

Столкновения, приводящие к переходам между подуровнями, должны обладать необычными свойствами

- Большое сечение (больше 10^{-13} см²)
- Малая энергия взаимодействия (10^{-6} эВ)

Электрическое поле, необходимое для перехода между подуровнями

$$E = \frac{\Delta \mathcal{E}}{e \cdot 2r_a \cdot n^2} \sim 10 \text{ В / см}$$

Переходы между подуровнями

Столкновения с кулоновскими центрами

$$\sigma = \pi r_0^2 = \pi \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{E_s} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 \quad n = \frac{\tau}{\sigma v} \sim 10^6 \text{ см}^{-3} \quad (50 \text{ кэВ})$$

Требуемая концентрация может достигаться за счет обдирки атомов пучка или ионизации остаточного газа

Столкновения с полярными молекулами

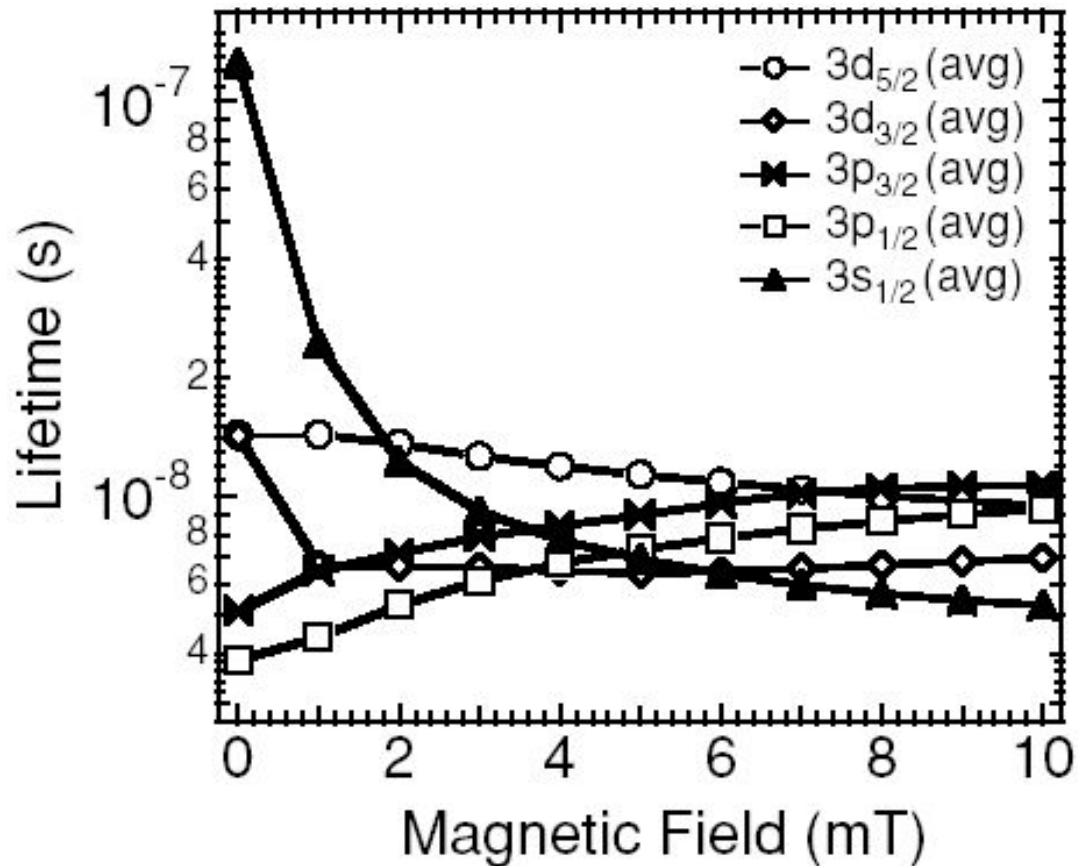
$$\sigma = \pi r_0^2 = \pi \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{E} \right)^{2/3} \sim 10^{-10} \text{ см}^2 \quad n = \frac{\tau}{\sigma v} \sim 10^9 \text{ см}^{-3} \quad P=3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$$

Столкновения с полярными молекулами примесей могут приводить к переходам между подуровнями тонкой структуры

Переходы между подуровнями

Динамический эффект Штарка

Зависимость времени жизни подуровней от магнитного поля



E L Foley and F M Levinton "A collisional-radiative model including sublevel parameters (CRISP) for H-alpha radiation" J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 39 (2006) 443–453

Модели заселенности подуровней

Корональное равновесие

$$\sigma_{\text{H}\alpha}^{\text{CE}} = \sigma_{3s} + \sigma_{3d} + \sigma_{3p} \frac{A_{3p-2s}}{A_{3p-2s} + A_{3p-1s}} = \sigma_{3s} + 0.12 \cdot \sigma_{3p} + \sigma_{3d}$$

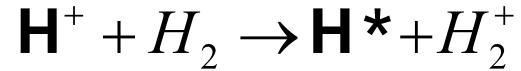
Термодинамическое равновесие

$$\sigma_{\text{H}\alpha}^{\text{TE}} = (\sigma_{3s} + \sigma_{3p} + \sigma_{3d}) \frac{g_{3s}A_{3s-2p} + g_pA_{3p-2s} + g_{3d}A_{3d-2p}}{g_{3s}A_{3s-2p} + g_{3p}A_{3p-2s} + g_{3d}A_{3d-2p} + g_{3p}A_{3p-1s}} = 0,43 \cdot (\sigma_{3s} + \sigma_{3p} + \sigma_{3d})$$

Столкновительно-излучательное равновесие

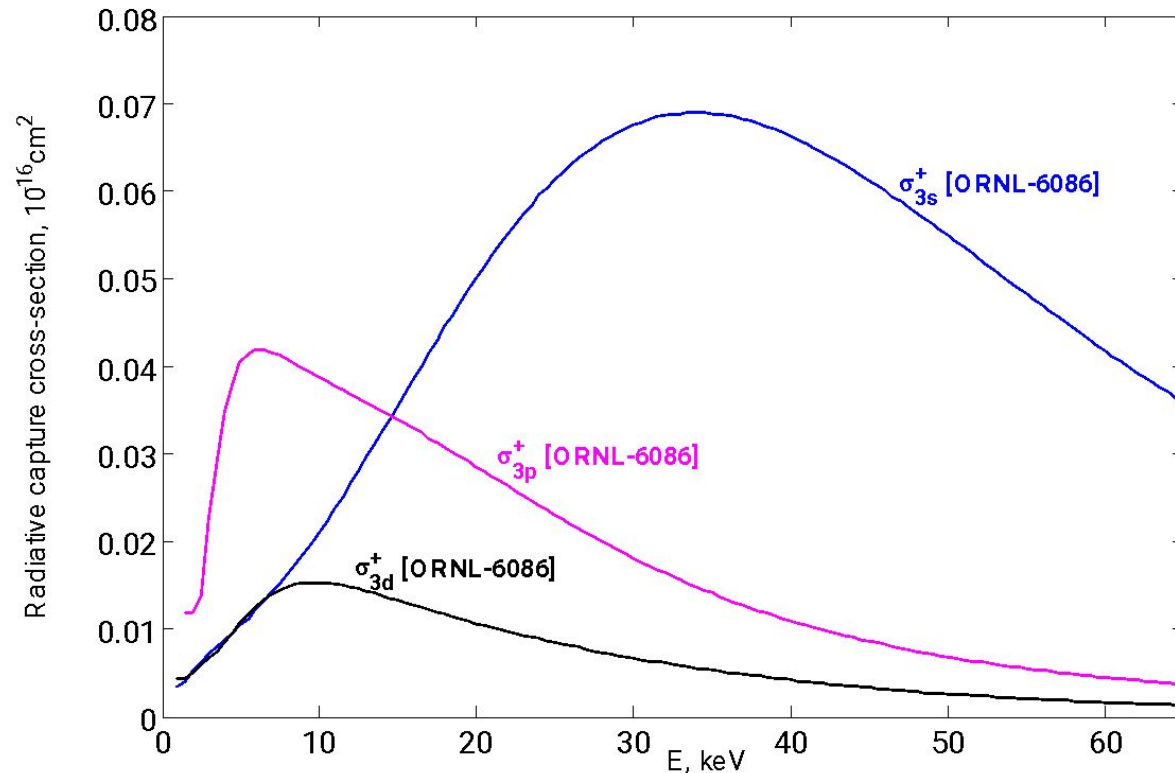
$$\sigma_{\text{H}\alpha}^{\text{CRE}} = \sigma_{3s} \frac{A_{3p-2s}}{A_{3p-2s} + A_{3p-1s}} + \sigma_{3p} \frac{A_{3p-2s}}{A_{3p-2s} + A_{3p-1s}} + \sigma_{3d} = 0.12 \cdot \sigma_{3s} + 0.12 \cdot \sigma_{3p} + \sigma_{3d}$$

Сечения возбуждения атома водорода

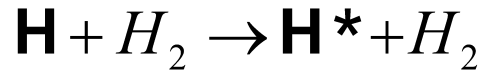


ORNL-6086

C. Barnett "Atomic Data for Fusion. Volume 1: Collisions of H, H₂, He, and Li atoms and ions with atoms and molecules", ORNL-6086/VI report (1990)



Сечения возбуждения атома водорода



ORNL-6086

C. Barnett "Atomic Data for Fusion. Volume 1: Collisions of H, H₂, He, and Li atoms and ions with atoms and molecules", ORNL-6086/VI report (1990)



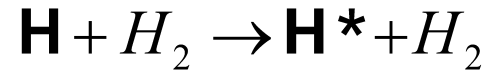
I. Williams, J. Geddes, and H. Gilbody "Balmer alpha emission in collisions of H, H⁺, H⁻²(+) and H⁻³(+) with h⁻²", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 15, 1377 (1982)

$$\sigma_{3s} \\ 0.12\sigma_{3p} + \sigma_{3d}$$

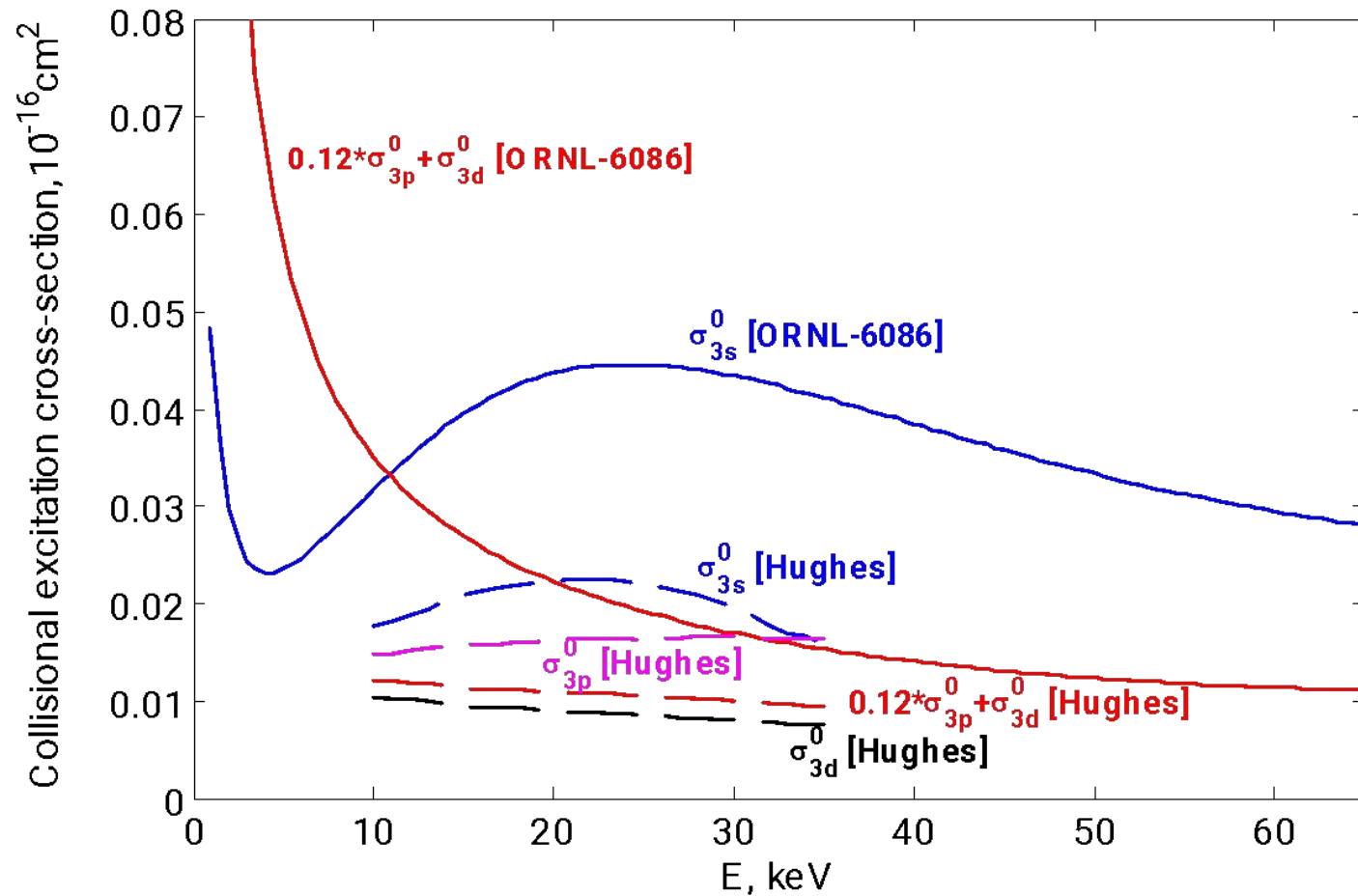
R. Hughes, H. Peterfish, and H. Kisner "Excitation of H atoms to the n=3 states by the impact of 10- to 35-keV ground-state atoms on He, Ne, Ar, H₂, O₂, and N₂", Phys.Rev.A, 5, 2103 (1972)

$$\sigma_{3s}, \sigma_{3p}, \sigma_{3d} \\ 10 - 35 \text{ keV}$$

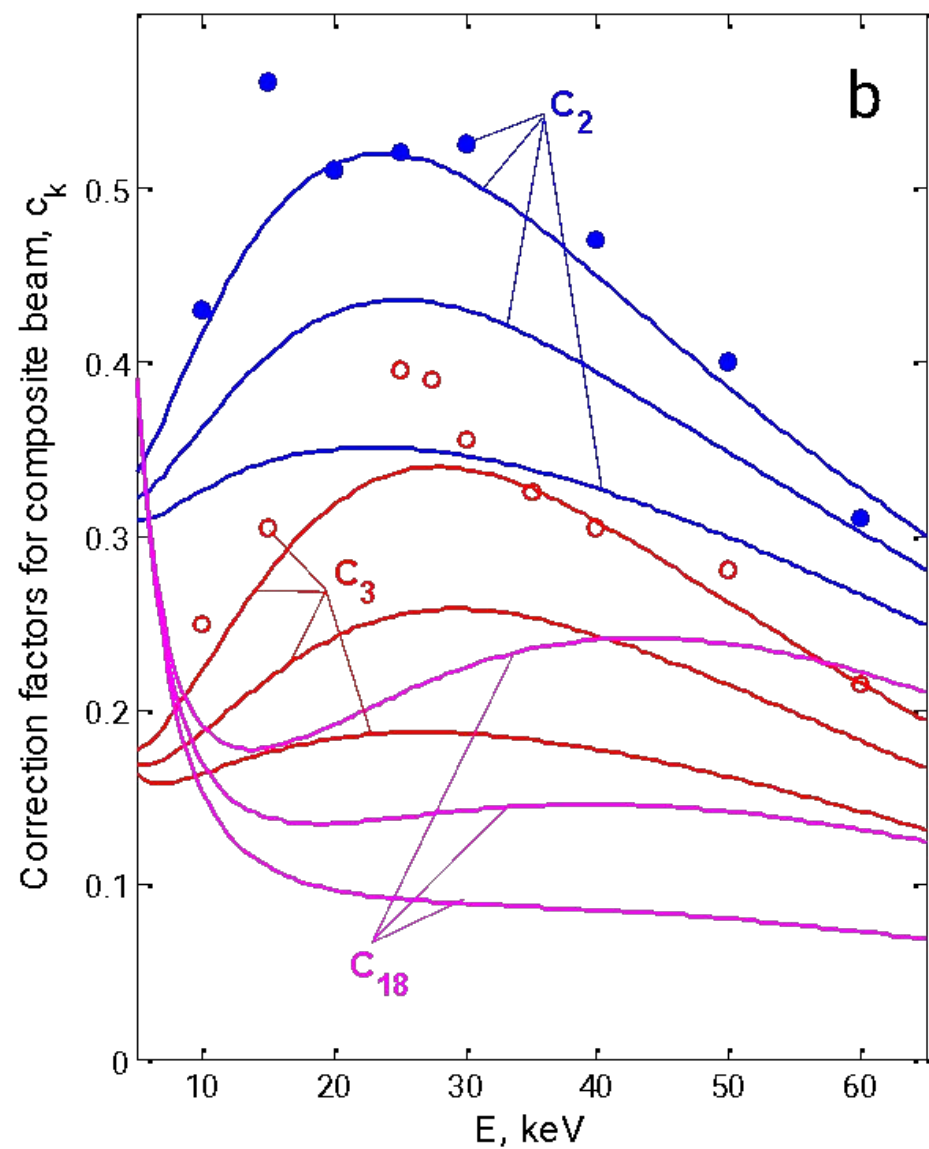
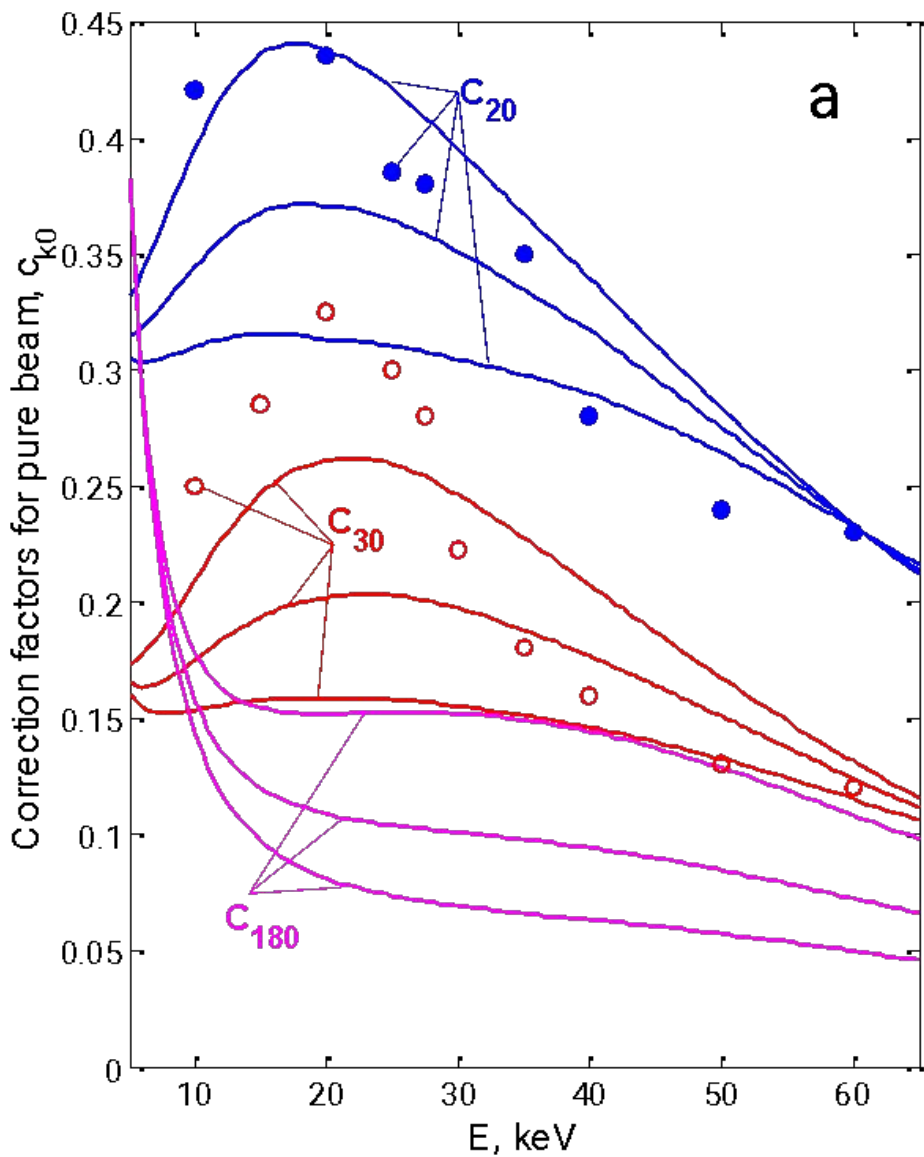
Сечения возбуждения атома водорода



Для расчетов принято $\sigma_{3p} = 2\sigma_{3d}$



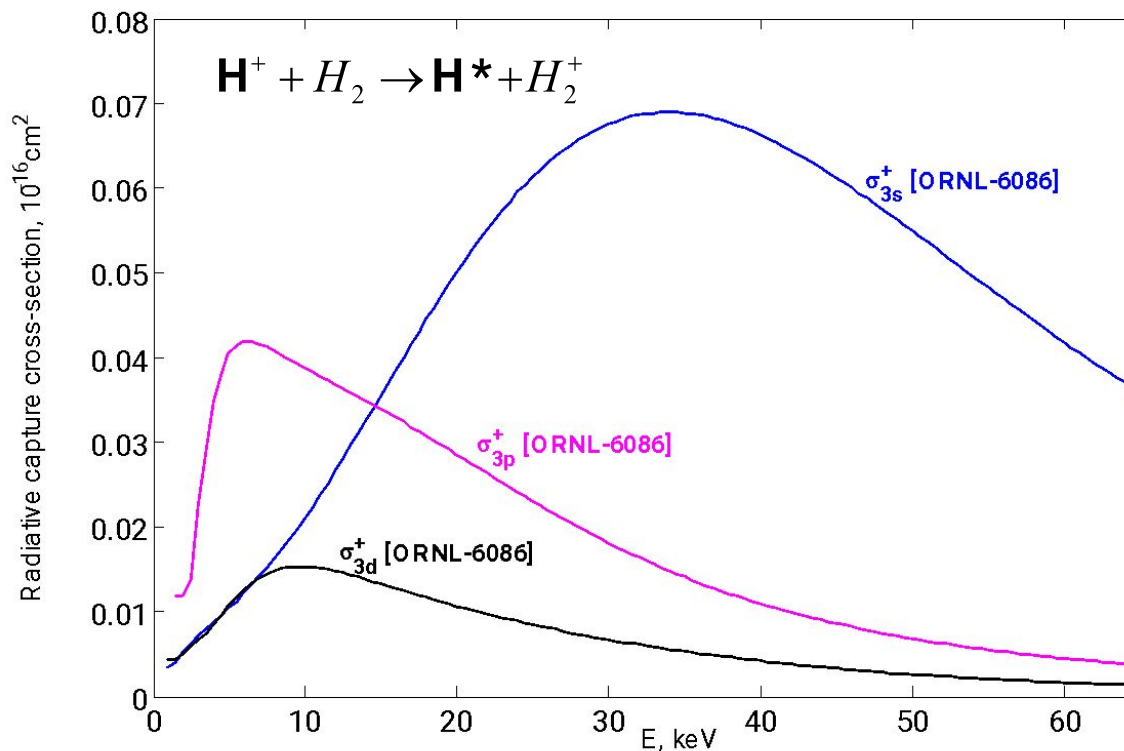
Коэффициенты Доплеровской спектроскопии



Экспериментальное наблюдение смешивания заселенностей

Сравнение интенсивностей линий в атомарном и смешанном пучках

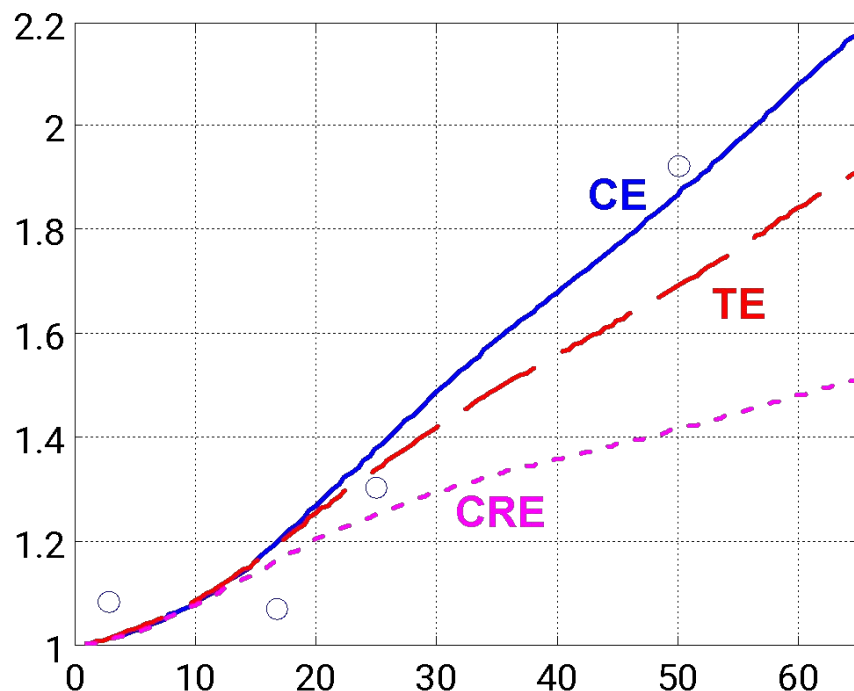
$$\frac{I_c}{I_p} = \frac{\sigma_{H\alpha}^0(E) \cdot f^0(E) + \sigma_{H\alpha}^+(E) \cdot f^+(E)}{\sigma_{H\alpha}^0(E) \cdot f^0(E)}$$



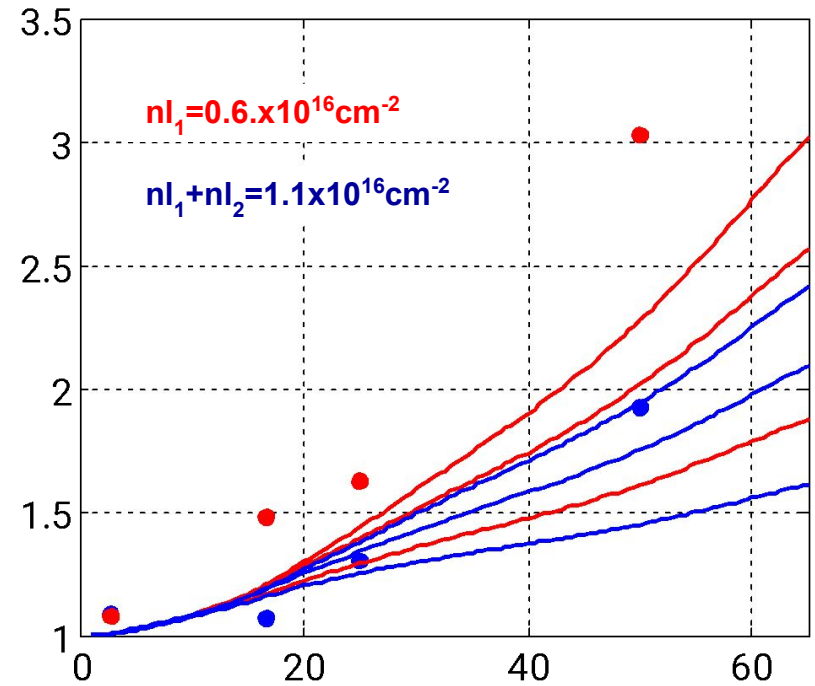
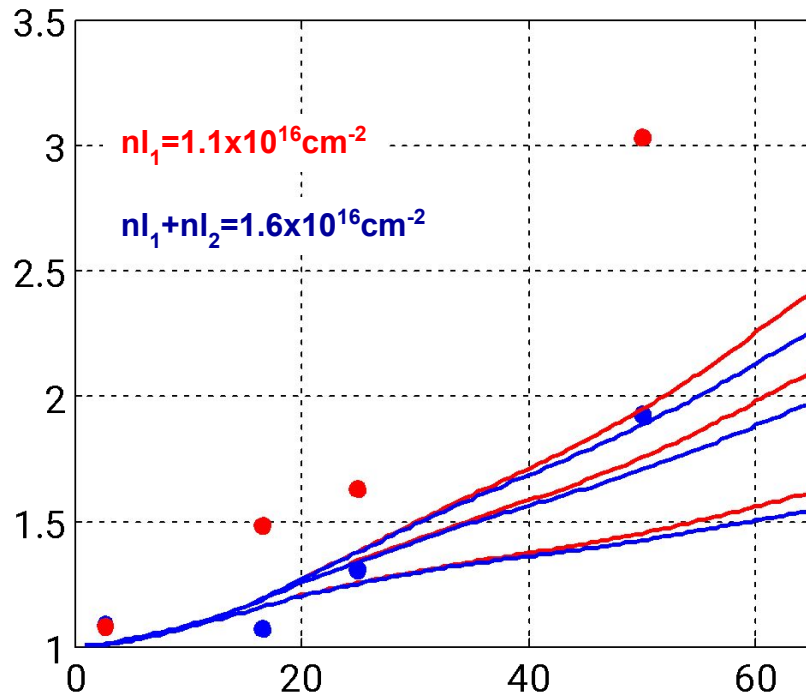
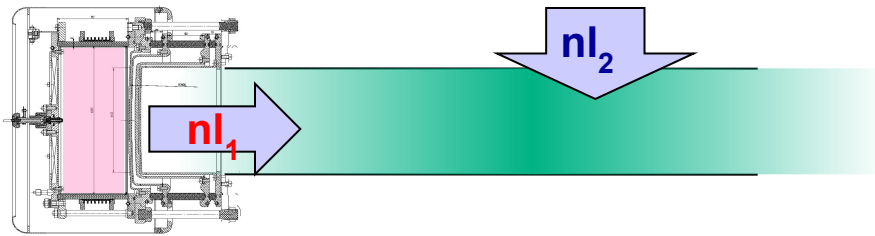
Экспериментальное наблюдение смешивания заселенностей

Сравнение интенсивностей линий в атомарном и смешанном пучках

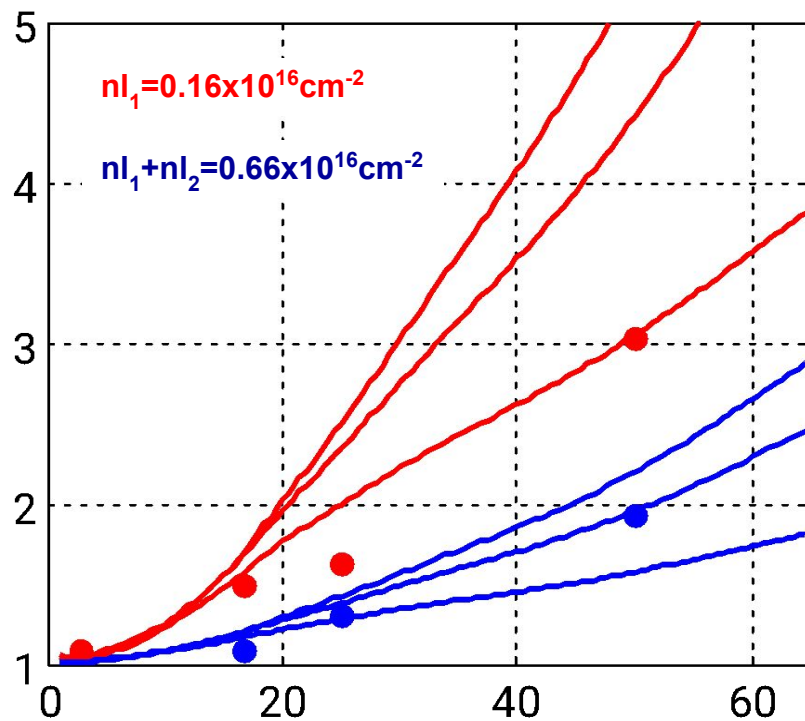
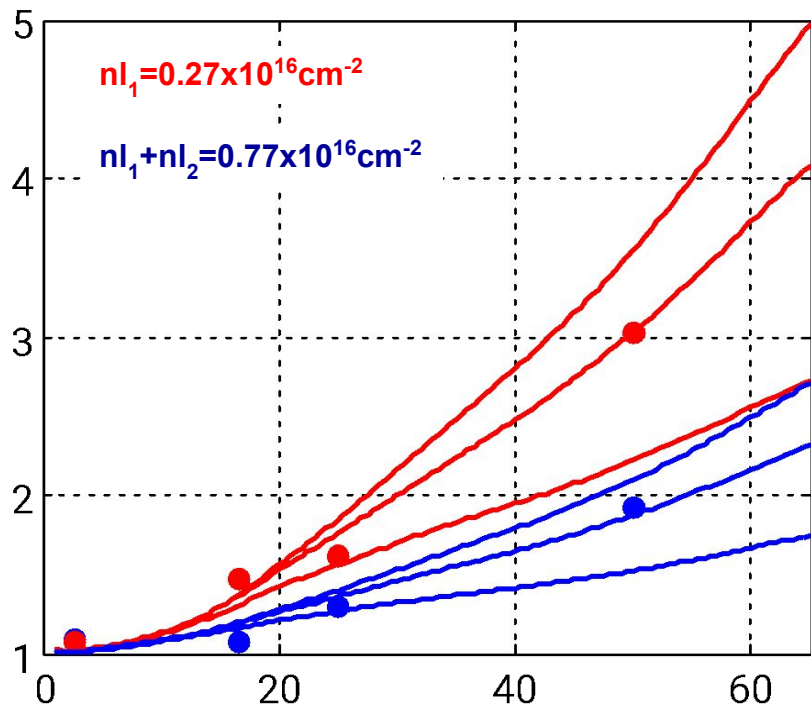
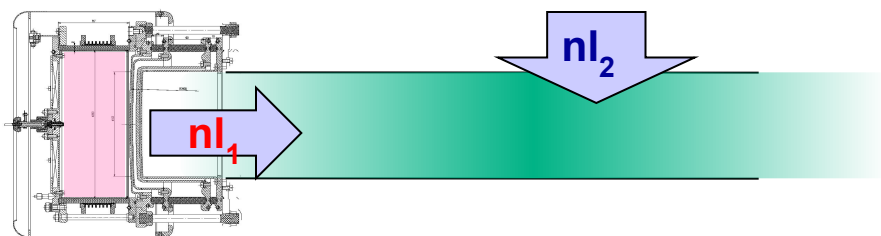
$$\frac{I_c}{I_p} = \frac{\sigma_{H\alpha}^0(E) \cdot f^0(E) + \sigma_{H\alpha}^+(E) \cdot f^+(E)}{\sigma_{H\alpha}^0(E) \cdot f^0(E)}$$



Зависимость от эффективной толщины мишени



Зависимость от эффективной толщины мишени



Заключение

Эффекты смешивания заселенностей подуровней тонкой структуры могут влиять на точность определения компонентного состава атомарных пучков

Смешивание заселенностей может быть экспериментально обнаружено по соотношению интенсивностей линий в атомарном и смешанном пучках

Сечения возбуждения при столкновениях с атомами и молекулами

