Еволюция в развитието на оптиката: линейна, нелинейна оптика. Възможности и перспективи на развитие

доц. Иван Стефанов
Физически факултет при СУ

Кратка история на оптиката

Оптика – наука за светлината, светлинните явления и взаимодействието на светлината с веществото. И почти цялата история на оптиката е история на търсене на отговор на въпроса: какво е светлината?

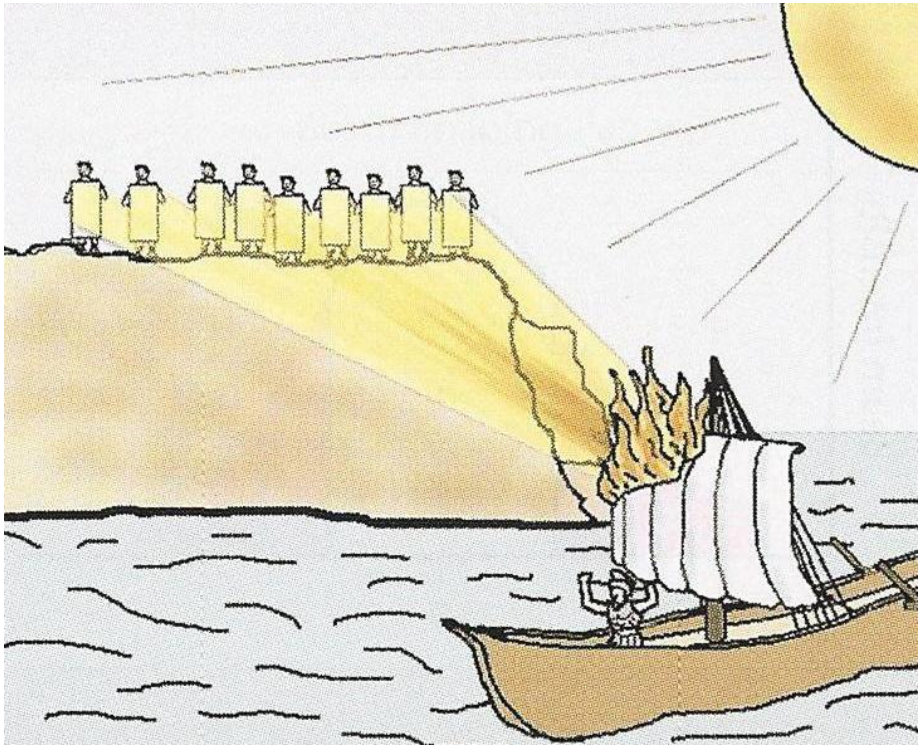
От възникванети си през гръцката античност до около 1600г., науката Оптика се занимава предимно с анализ на зрението, а не със светлината.

•Древна Гърция (~5-3 в.пр.н.е.)

- Платон: светлинните лъчи се излъчват от окото
- Аристотел предлага математическа теория на „зрителните лъчи”. Както е отбелязано в Евклидовата оптика (около 300 пр.н.е.), тази теория предполага, че окото излъчва отделни лъчи през зеницата и се образува конус от лъчи извън окото и връх в точка вътре в окото.
- **Epicur:** цветът на обекта зависи от цвета на лъчите, с които го облъчваме.
- **Платон:** душата е източник на зрението и светлинните лъчи се излъчват от очите. Въпросът е защо не можем да видим нищо в напълно тъмна стая? Подобно на светлината, която е необходима за зрението Платон казва, че "БОГ" е като интелектуална светлина, която ни позволява да "видим" невидимите "форми".

Антична Гърция: Древни светлинни оръжия

Древните гръцки и римски историци съобщават, че Архимед е въоръжил няколко стотин души с метални огледала, за да насочат слънчева светлина върху римски военни кораби в битката за Сиракуза (213 -211 г. пр.н.е.).



Оптиката в средните векове: Alhazen

Забележителният арабски учен Alhazen (~ 1000 г.) изучава сферични и параболични огледала. Alhazen правилно предполага, че очите пасивно получават светлина, отразена от обектите, а не излъчват светлинни лъчи. Той дава обяснение също на законите за отражение и пречупване, като ги обяснява с по-бавната скорост на разпространение на светлината в плътни среди.

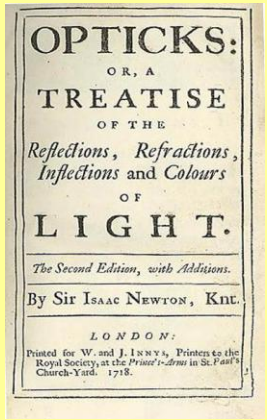
Alhazen
(965-1040)

Кратка история на оптиката

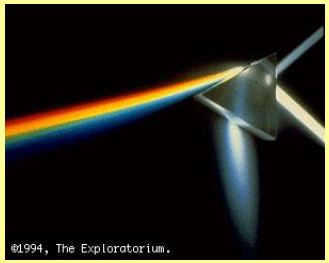
- 18-ти–19-ти век
  – Френел, Юнг експериментално наблюдават дифракция на светлината, победа на Нютоновата теория за корпусколярния характер на светлината
  – Максуел формулира известните уравнения за разпространение на електро-магнитни вълни
- 20-ти век
  – Квантовата теория обяснява дуализма вълна-частица
  – Поява на холографията (1948)
  – Първият квантов генератор (мазер-1956г., лазер-1960г.)
  – Нарастващ брой приложения на оптичните технологии: комуникации, фундаментални изследвания, медицина, метрология, промишленост и забавления.

Исторически дебат за същността на светлината

Particles


OPTICKS:
OR, A
TREATISE
OF THE
Reflections, Refractions, Inflections and *Colours*
OF
LIGHT.
The Second Edition, with Additions.
By Sir Isaac Newton, Knt.
LONDON:
Printed for W. and J. Innys, Printers to the Royal Society, at the *Prince's-Arms* in St. *Paul's* Church-Yard. 1718.

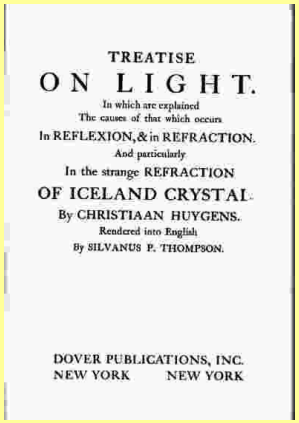
Sir Isaac Newton
(1642-1727)

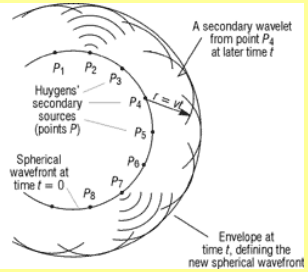


or

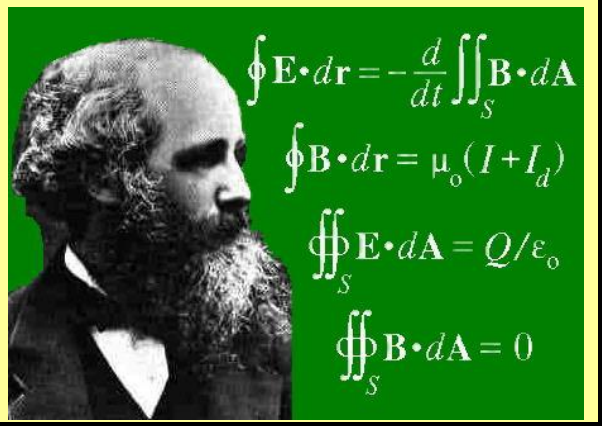
Waves

Christaan Huygens
(1629-1695)


TREATISE
ON LIGHT.
In which are explained
The causes of that which occurs
In REFLEXION, & in REFRACTION.
And particularly
In the strange REFRACTION
OF ICELAND CRYSTAL.
By CHRISTIAAN HUYGENS.
Rendered into English
By SILVANUS P. THOMPSON.
DOVER PUBLICATIONS, INC.
NEW YORK NEW YORK



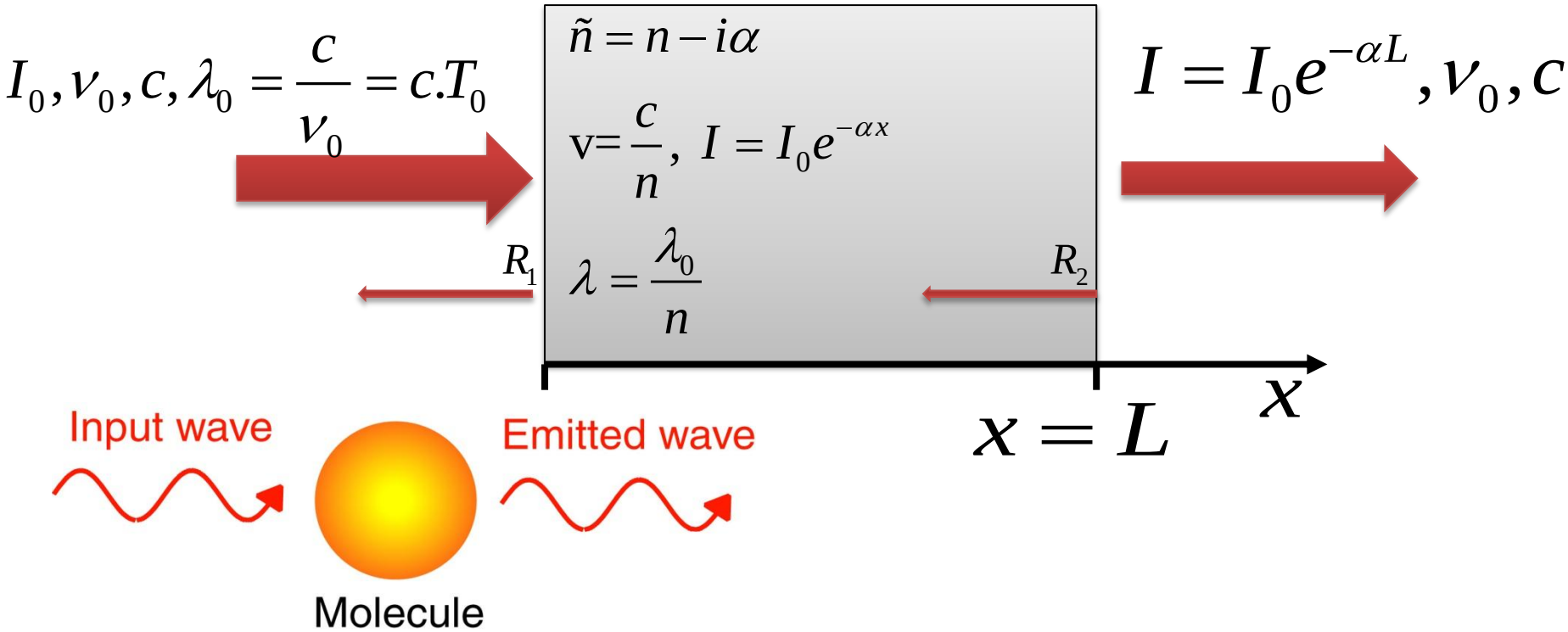
Light = EM waves



$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

В продължителен исторически период от развитието на оптиката, съвсем до скоро, се считаше, че всички оптически среди са линейни. Следствие от това предположение са основните закони за разпространение на светлината в материални среди:

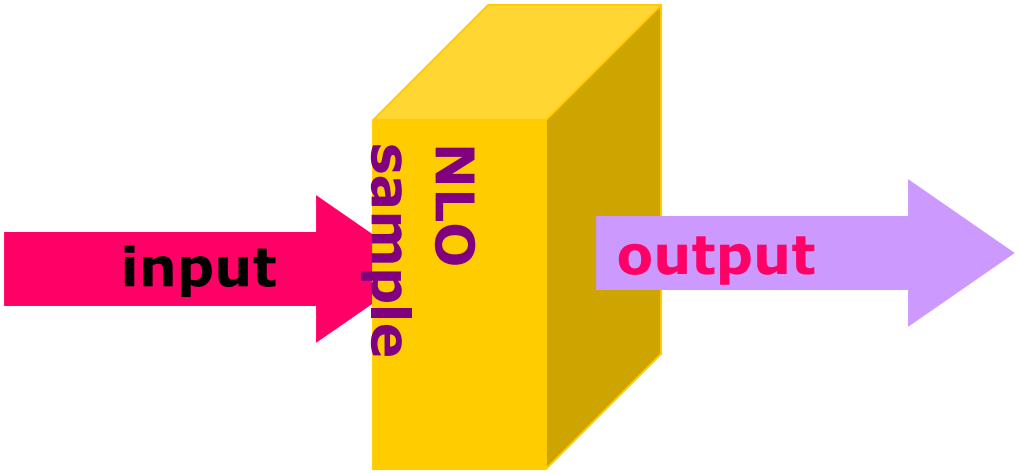
- Принципът на суперпозиция, един от основните принципи на класическата оптика
- Честотата на светлината не се променя при преминаване през една среда.
- Два снопа светлина, разпространяващи се в една и съща област, не си влияят един на друг. Следователно светлината не може да се използва за контролиране на светлина.



Цел на настоящата лекция

Въпрос:

Възможно ли е да се промени цвета на монохроматична светлина и как става това?



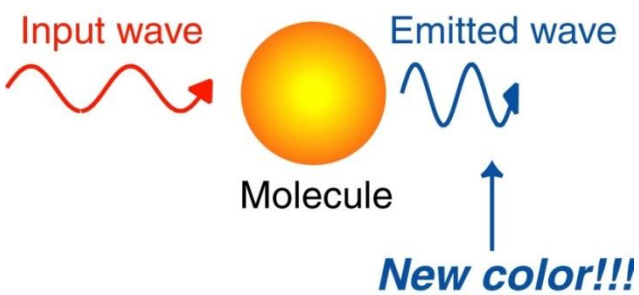
Отговор:

Не може с обикновена светлина.

Необходим е лазерен източник с висок интензитет

С откриване на първия лазер през 1960 г. се откри възможност да се изследва поведението на светлината в оптични материали при висок интензитет. Експерименти, извършени с лазерно лъчение показват, че оптичните среди проявяват нелинейни свойства, което е следствие от наблюдаване на следните ефекти:

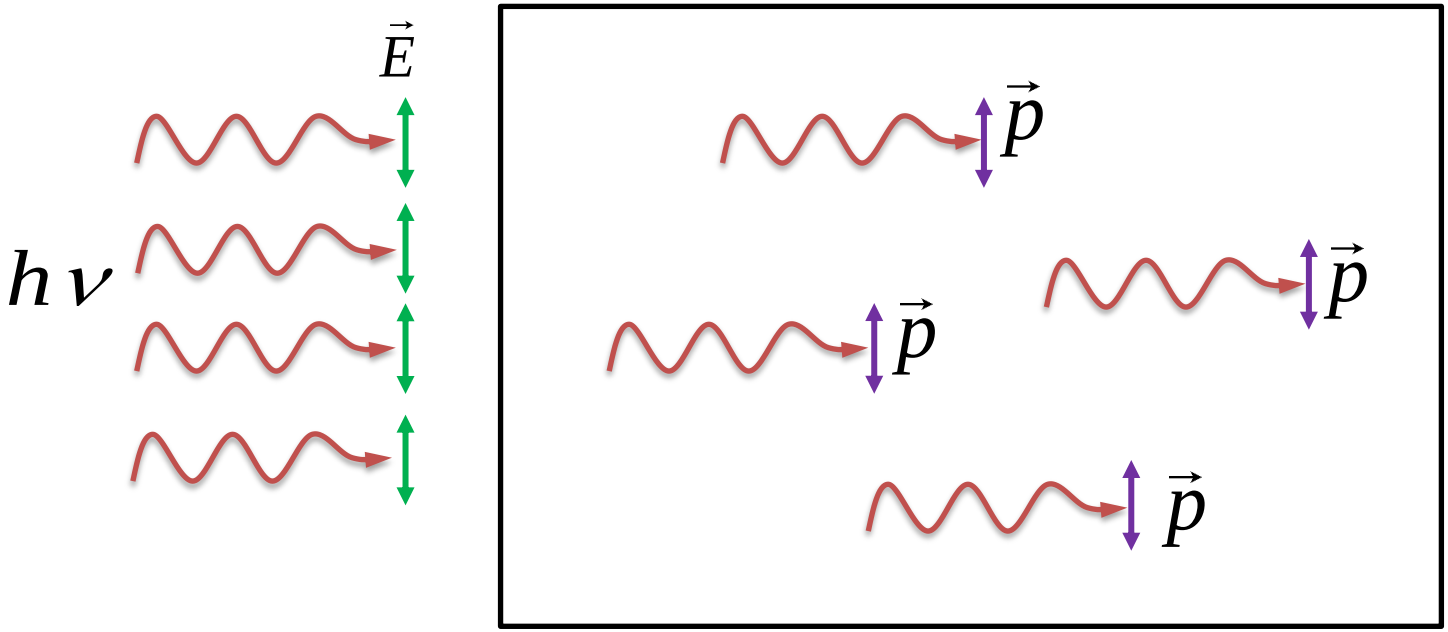
- Коефициентът на пречупване, и следователно скоростта на светлината в нелинейните среди зависи от интензивността на светлината.
- Принципът на суперпозиция се нарушава в нелинейните среди.
- Честотата на светлината се променя, когато преминава през нелинейна оптична среда.
- Фотоните си взаимодействат в пределите на нелинейната среда, така че светлината може да се използва за управление на светлина. Това взаимодействие се осъществява в самата нелинейна среда, като един от сноповете промена оптичните свойства на средата, през която се разпространява вторият сноп.
- Нелинейната оптика предлага множество впечатляващи явления, много от които са изключително полезни.
- Нелинейни оптични поведение не се наблюдава, когато светлината се разпространява във вакум.
- “Нелинейността” се поражда в самата среда, през която преминава светлината.



Оптичните свойства на диелектричните среди, в които се разпространява светлината се описват с поляризацията **P**, която се създава в средата от електричното поле **E** на светлинната вълна.

$$\vec{p} = -e\vec{E} - \text{ микро поляризация}$$

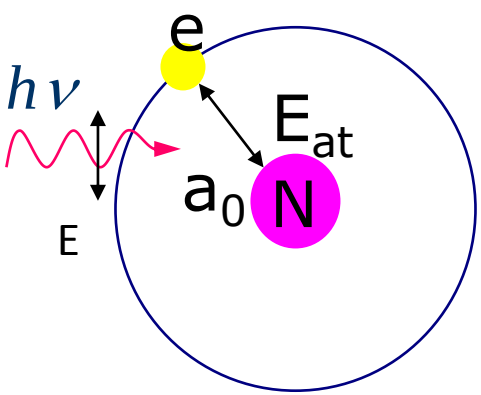
$$\vec{P} = N.\vec{p} - \text{ макро поляризация}$$



Динамиката на електрона в атома при прилагане на външно поле се определя от две сили. Едната сила е предизвикана от вътрешно атомното поле E_{at}, а другата от ел.поле на светлинната вълна.

Радиус на електрона $$r_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{m_2 c^2} = 2.8179402894x10^{-15} m$$

Радиус на Бор, разстоянието между ядрото и електрона в атома на H $$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 5.292.10^{-11} m$$



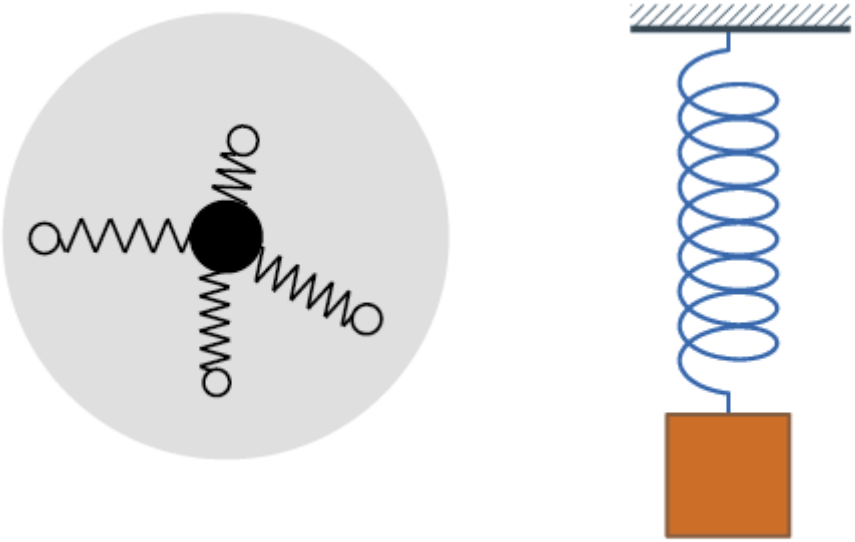
Вътрешноатомно поле $$E_{at} = \frac{e}{a_0^2} = 6x10^{11} V/m$$

$$I = \frac{nc}{2\pi}|E|^2$$

I	CGS		MKS	
	I (erg/cm² sec)	E (statvolt/cm)	I (W/m²)	E (V/m)
1 W/cm²	10^7	0.0458	10^4	$1.37x10^3$
1 kW/cm²	10^{10}	1.45	10^7	$4.34x10^4$
1 MW/cm²	10^{13}	45.8	10^{10}	$1.37x10^6$
1 GW/cm²	10^{16}	$1.45x10^3$	10^{13}	$4.34x10^7$
1 TW/cm²	10^{19}	$4.85x10^4$	10^{16}	$1.37x10^9$

Движение на електрона в атома при въздействие на светлинно поле

Класически модел на атома
Електроните са свързани към ядрото със еластична сила, подобна на пружинка. Тази сила определя резонансните честоти на атома.



Свързани електрони (диелектрици)
•еластична сила при малки отклонения от равновесното положение $F = -kx$
$\Rightarrow$собствена резонансна честота $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$
•ω_0 попада в близката ИЧ/видимата/ UV спектрална област

Свободни електрони (метали)
•$k = 0 \Rightarrow \omega_0 = 0$

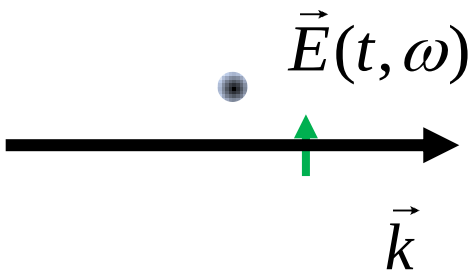
Линейна оптика E<<E$_{at}$

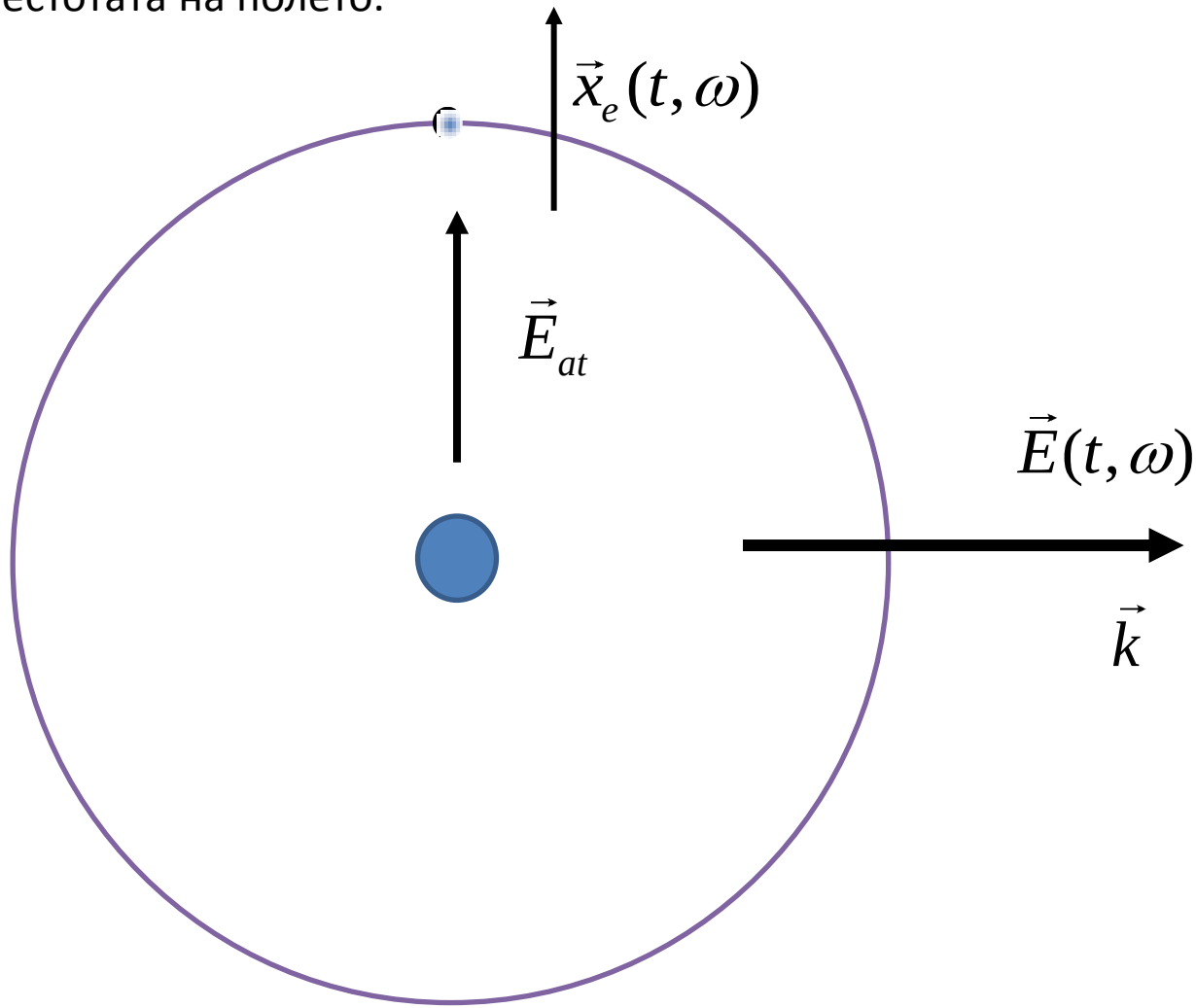
Отклонението на електрона от равновесното положение, причинено от електричното поле на светлинната вълна, е с **малка амплитуда**. Отклонението **x$_e$** е **хармонична функция** с честота, равна на честотата на полето.

$$\vec{x}_e \sim \vec{E}$$

$$\Rightarrow \vec{p} = -e\vec{x}_e = \alpha\vec{E}$$

α- поляризуемост на атома/молекулата





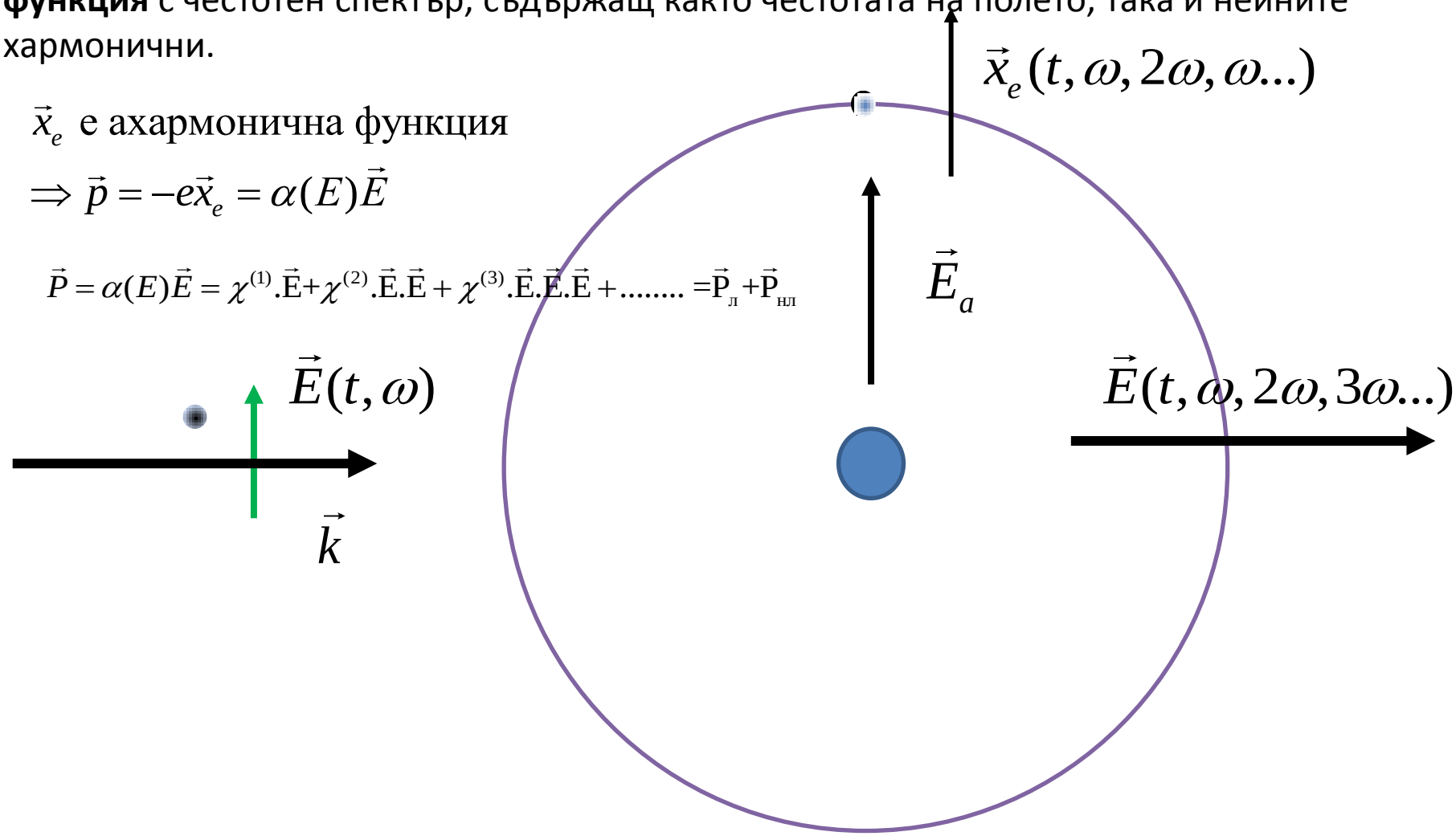
Нелинейна оптика $E \sim E_{at}$

Отклонението на електрона от равновесното положение, причинено от електричното поле на светлинната вълна, е с **голяма амплитуда**. Отклонението $\mathbf{x_e}$ е **ахармонична функция** с честотен спектър, съдържащ както честотата на полето, така и нейните хармонични.

$\vec{x}_e$ е ахармонична функция

$$\Rightarrow \vec{p} = -e\vec{x}_e = \alpha(E)\vec{E}$$

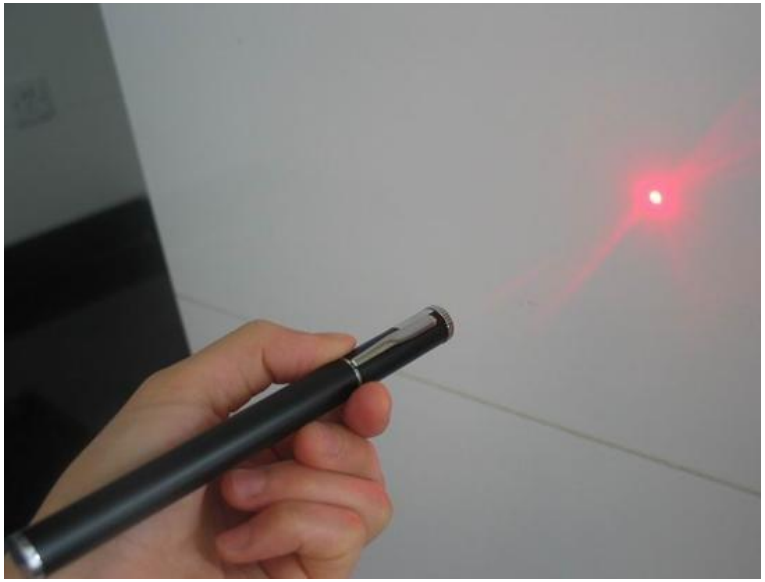
$$\vec{P} = \alpha(E)\vec{E} = \chi^{(1)}.\vec{E} + \chi^{(2)}.\vec{E}.\vec{E} + \chi^{(3)}.\vec{E}.\vec{E}.\vec{E} + \ldots\ldots = \vec{P}_{л} + \vec{P}_{нл}$$



Нелинейно оптични ефекти

- 2-ри порядък нелинейни ефекти
  - Генерация на втора хармонична
  - Генерация на сума/разлика от честоти
  - Оптическа параметрична генерация/усилване
- 3-ти порядък нелинейни ефекти
  - Оптически ефект на Кер/квадратичен ефект на Покелс
  - Генерация на трета хармонична
  - Четири фотонно смесване
  - Стимулирано Раманово/Брилуеново разсейване на светлината

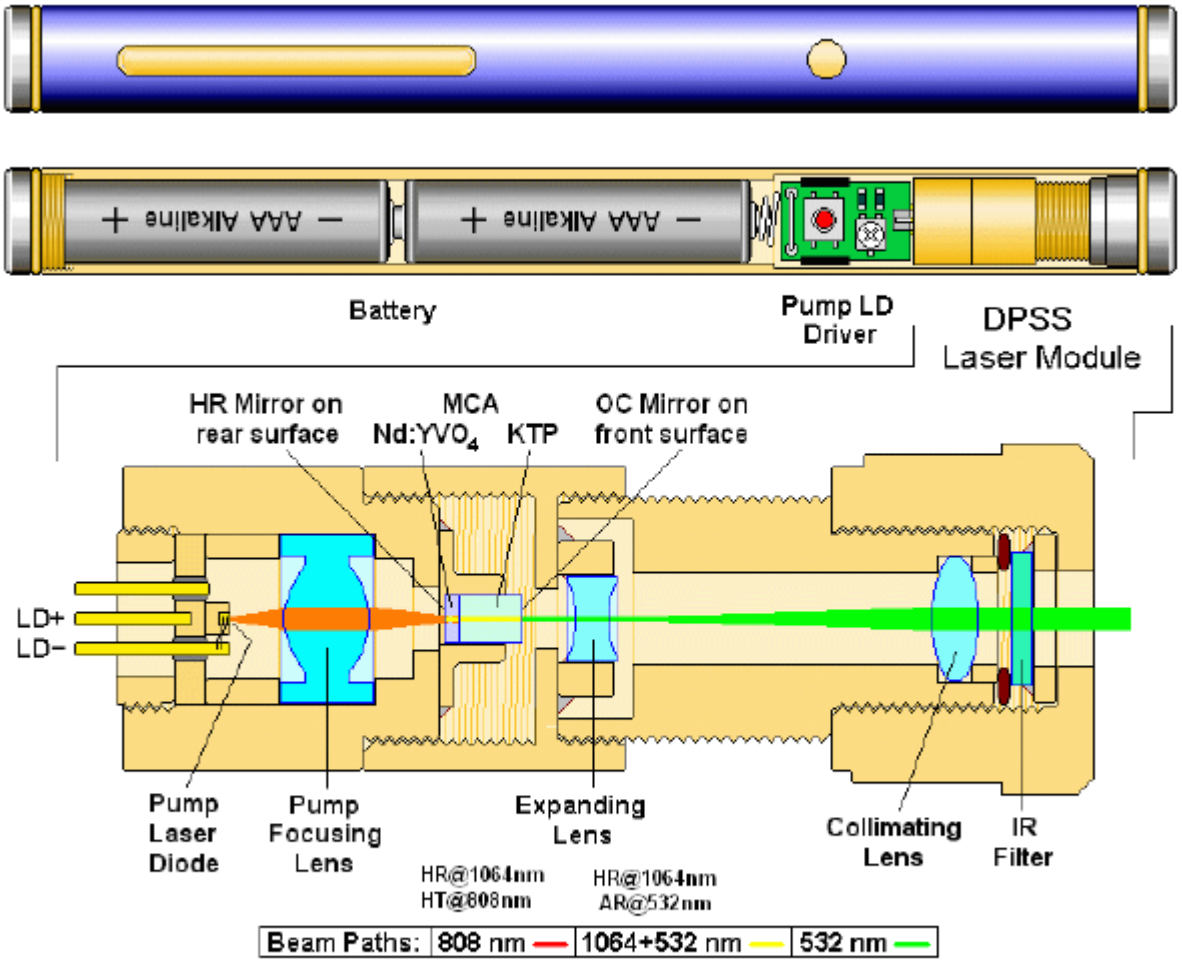
Мотивация да изучаваме нелинейните оптични ефекти е в моите ръце



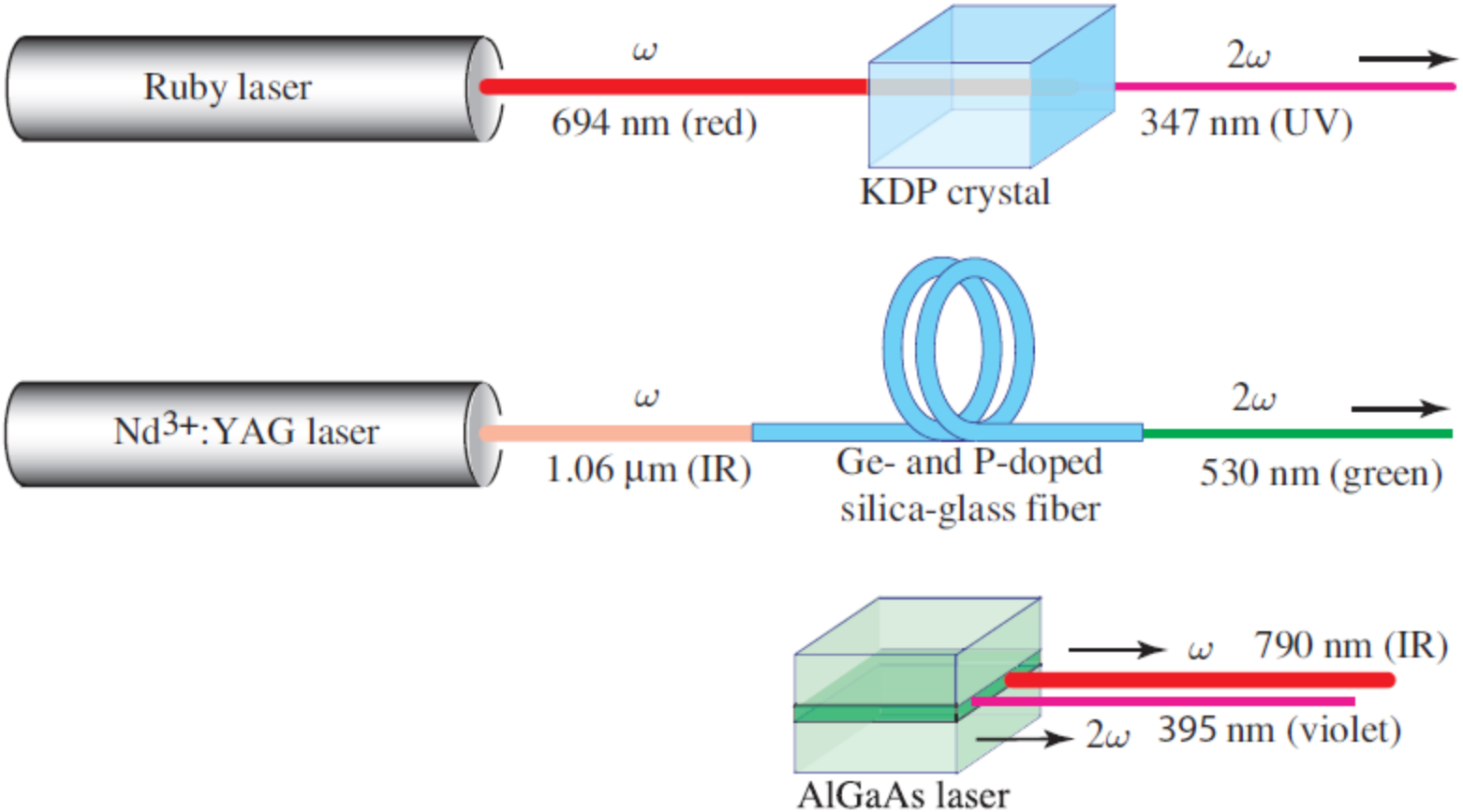
Това е червен лазер

Това не е зелен лазер

СХЕМА НА ЗЕЛЕНА ЛАЗЕРНА ПОКАЗАЛКА:

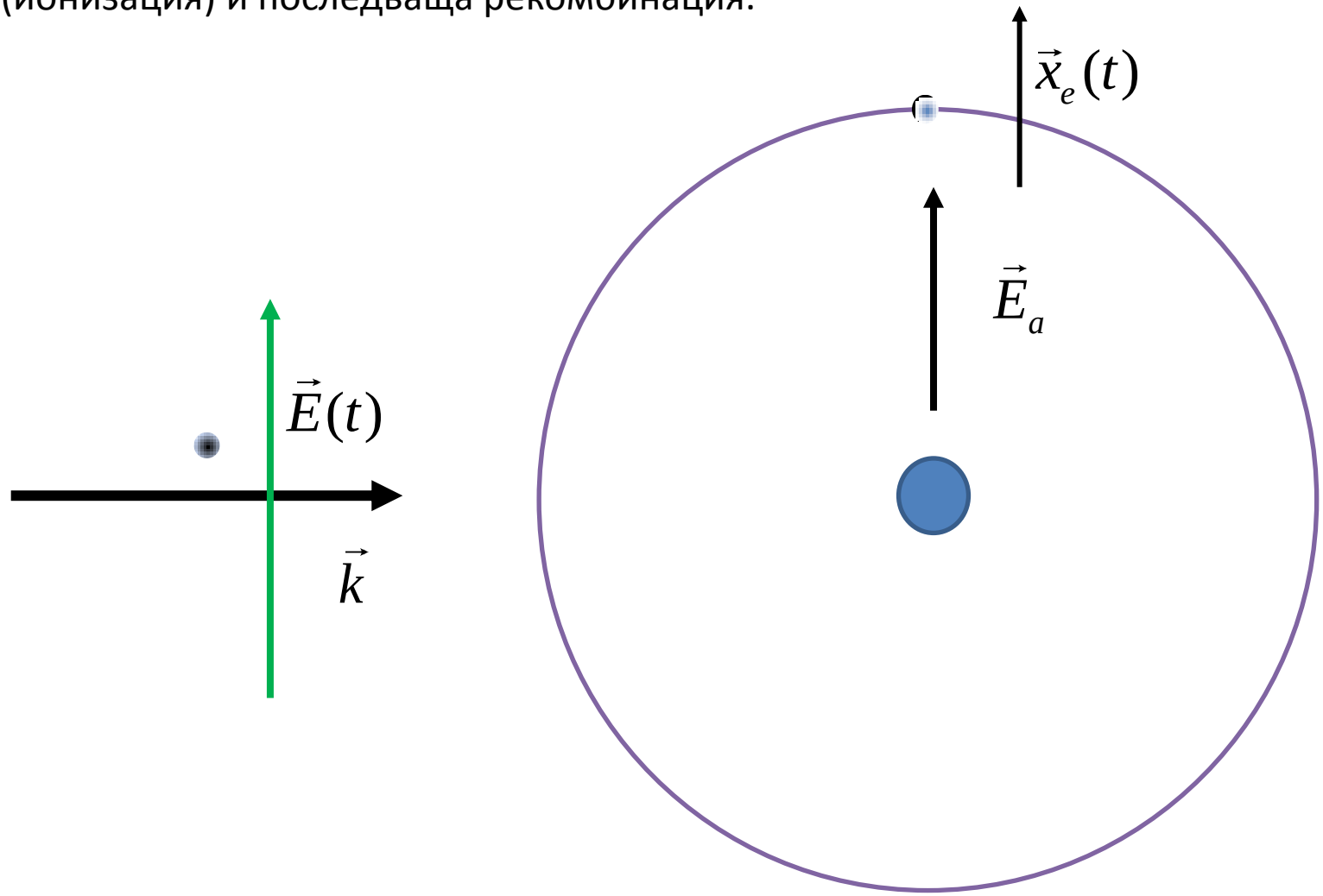


Typical Green DPSS Laser Pointer Using MCA


Ruby laser
ω
694 nm (red)
KDP crystal
2ω
347 nm (UV)
Nd3+:YAG laser
ω
1.06 μm (IR)
Ge- and P-doped
silica-glass fiber
2ω
530 nm (green)
ω
790 nm (IR)
2ω
395 nm (violet)
AlGaAs laser

Екстремна нелинейна оптика $E>E_{at}$

Отклонението на електрона от равновесното положение, причинено от електричното поле на светлинната вълна, преминава през процес на откъсване на валентния електрон (йонизация) и последваща рекомбинация.



E
atom
e-

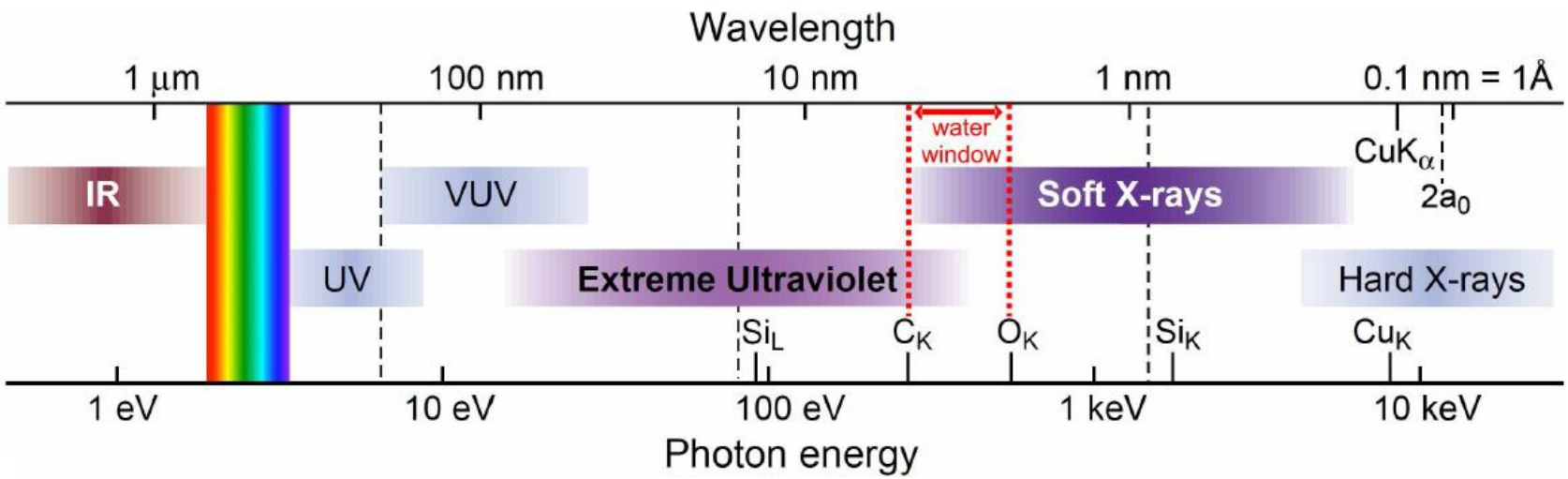
В основата си източниците на високи хармонични излъчват оптично поле с параметри подобни на лазерното лъчение:

•Хармоничните са кохерентни и насочени

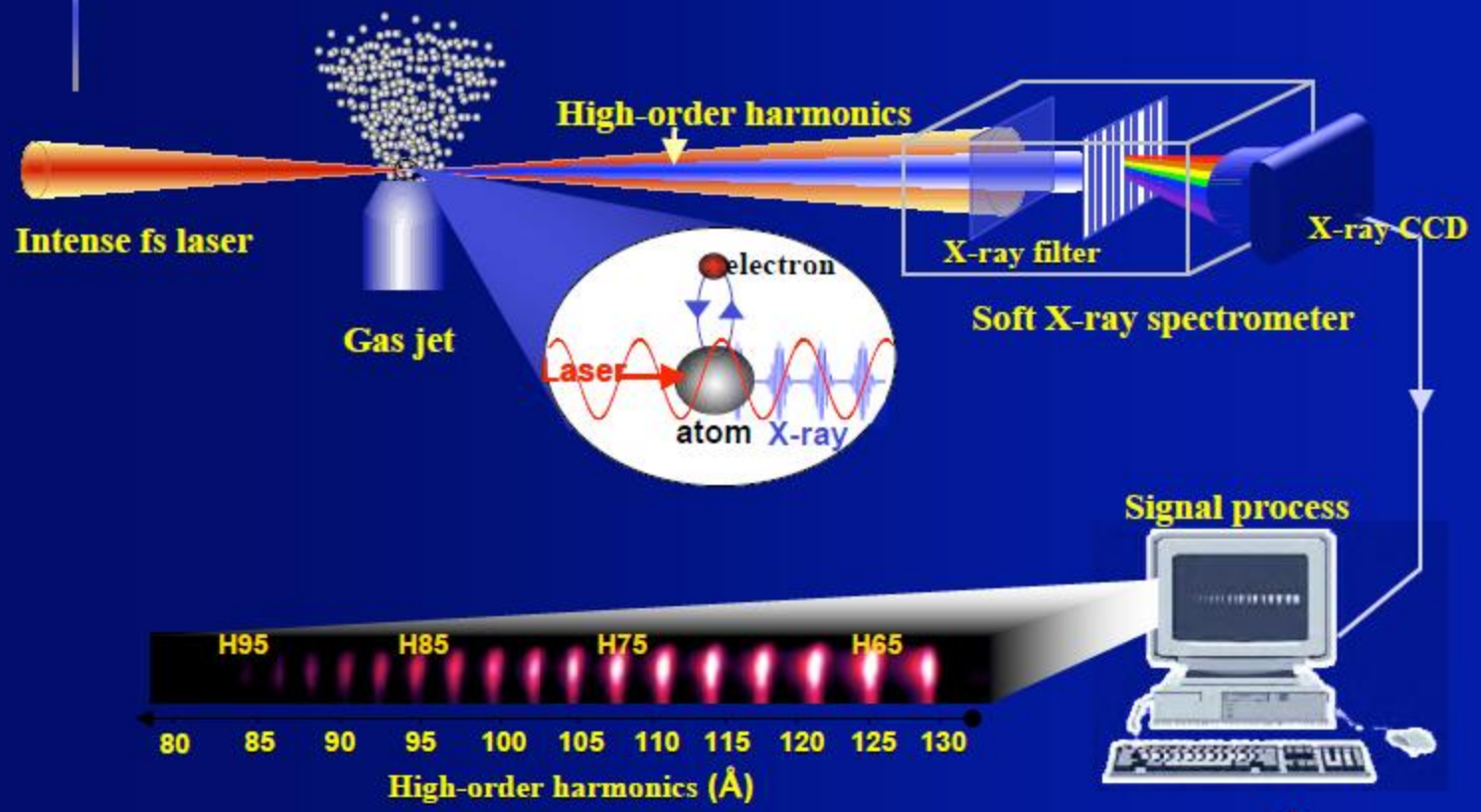
•Спектърът на това лъчение попада от вакумния ултравиолетов диапазон до меката ренгенова област (от 100nm до под 1nm)

•Генерацията на високи хармонични е оптичен процес проявяващ се в така наречения режим на силно взаимодействие. Необходимо условие за реализация на този режим е интензитетът на електричното поле на светлината да бъде от порядъка или по-голямо от Кулоновия потенциал, удържащ електрона свързан в атома. Такъв интензитет $>10^{13}$W/cm^2 се постига с фокусиране на фемто секунди лазерни импусли.

•Прозорец на пропускане на водата в диапазона 4.4-2.3nm открива големи възможности за кохерентно дифракционно изобразяване на биологични обекти.



High-order Harmonic Generation (HHG)



KAIST

CXRC