

Koherens populáció-átvitel kettős Λ struktúrájú atomokban

Sándor Nóra Katalin

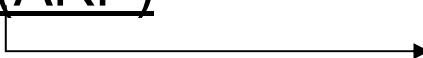
V. évf.

Témavezető: Dr. Djotyan Gagik

tudományos tanácsadó, KFKI RMKI

2007. november 16.

Bevezetés – atomi kvantumállapotok koherens kontrollja

- Fontos szerepet játszik számos tudományterületen:
 - Atomok lézeres mozgatása
 - Atomok csapdázása és hűtése
 - EIT (Elektromágnesesen indukált átlátszóság)
 - Kvantum-informatika
 - Kémiai reakciók kontrollja
- Eddig alkalmazott módszerek:
 - π -impulzusok
 - stimulált emissziós pumpálás (SEP)
 - STIRAP (Indukált Raman adiabatikus átmenet)
 - Adiabatikus átmenet (ARP)

frekvencia-modulált
lézerimpulzusokkal

Adiabatikus átmenet (ARP) – előzmények

■ Kétszintes atomban:

- A teljes populáció átvihető az egyik atomi állapotból a másikba

■ Többszintes atomban:

- Lehetséges a szintek között koherens szuperpozíció létrehozása, illetve atomi szintek közötti populáció-átvitel megvalósítása közel 1 valószínűséggel
- Λ -atomban megmutatták, hogy az adiabatikus követés tartományában lehetséges az atommal kölcsönható 2 lézer-impulzus **relatív fázisát** a gerjesztett állapotba kódolni

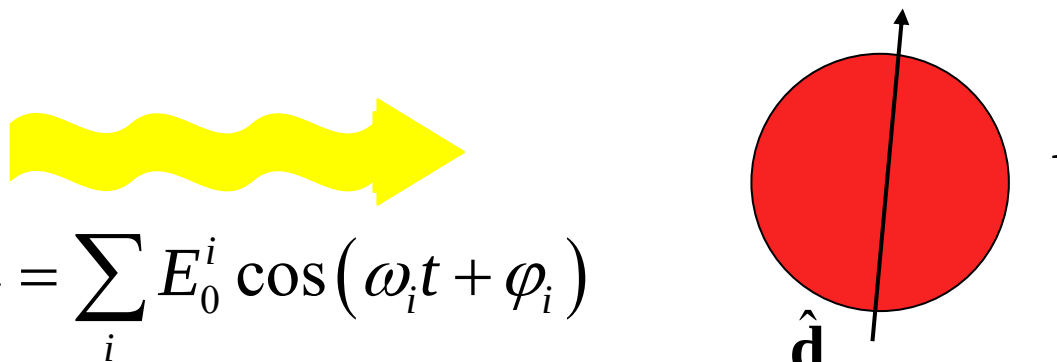
Hátrány: **gerjesztés** – elrontja a koherenciát

A munka célja

- Az atom egy kiválasztott szintjére történő populáció-átvitel megvalósítása **gerjesztés nélkül**
- Az atomi metastabil (alap)állapotokban **koherens szuperpozíció** létrehozása
- Követelmény:
 - gyors és robusztus kölcsönhatás
(ne legyen túlzottan érzékeny a paraméterekre)

Atom-fény kölcsönhatás leírása

■ Féklklasszikus elmélet, dipólközelítésben:



The diagram illustrates the interaction between an external electric field and an atom. On the left, a yellow wavy arrow points to the right, representing the electric field E . Below it is the equation $E = \sum_i E_0^i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$, with the text "(klasszikus tér)" underneath. On the right, a red circle represents the atom. A vertical arrow passes through the center of the circle, labeled $\hat{\mathbf{d}}$ below it, representing the dipole moment. To the right of the circle is the text $\hat{H}_A$ (atomi Hamilton-operátor). A bracket connects the text "(klasszikus tér)" and "(dipólmomentum)" below the respective terms.

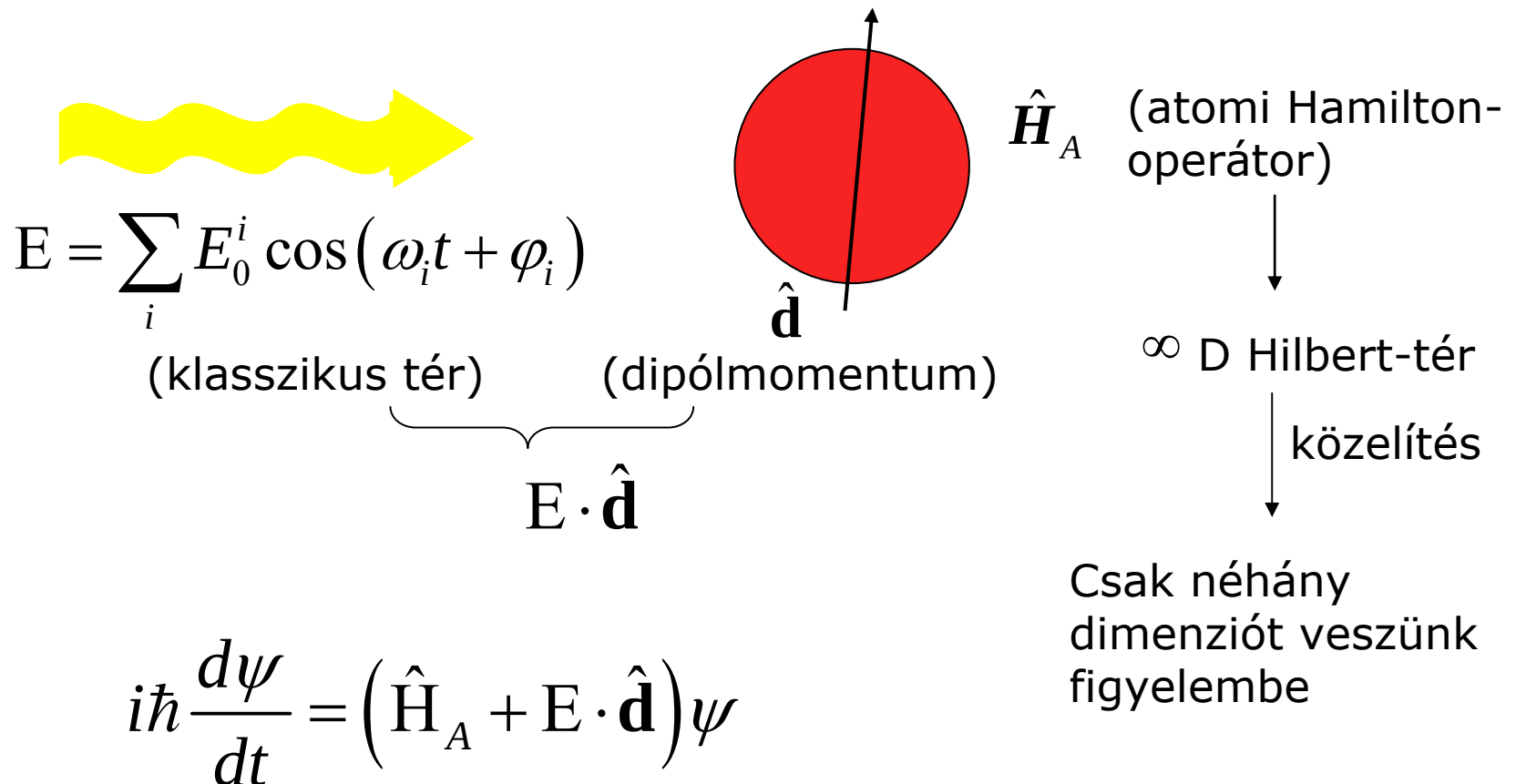
$$E = \sum_i E_0^i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

(klasszikus tér) (dipólmomentum)

- Kölcsönhatási tag: $E \cdot \hat{\mathbf{d}}$
- Időfüggő Schrödinger-egyenlet:

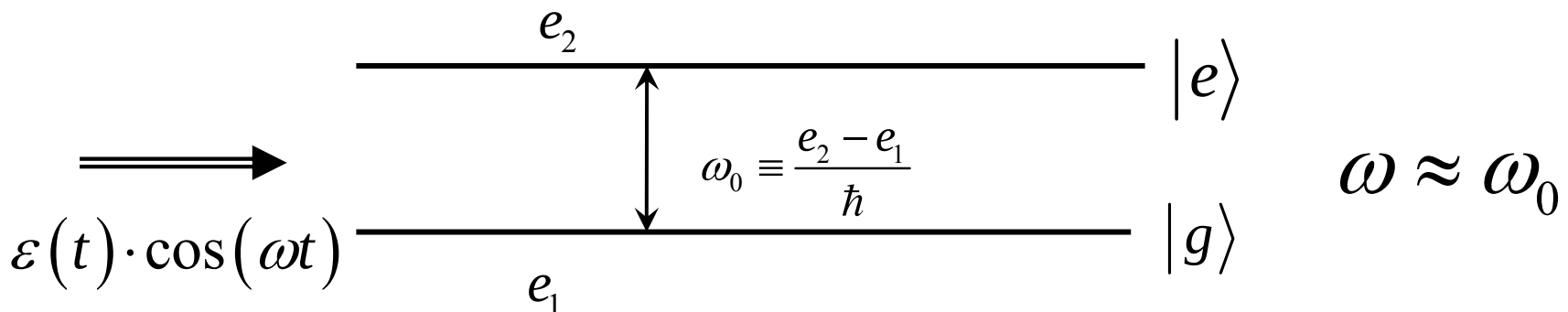
$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = (\hat{H}_A + E \cdot \hat{\mathbf{d}}) \psi$$

Atom-fény kölcsönhatás leírása

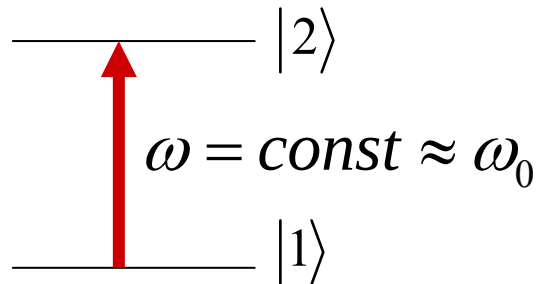


Kétszintes atom - közelítés

- A Hilbert-térnek egy 2-D alterét vesszük figyelembe.
 - Feltételek:
 - A lézer jó közelítéssel monokromatikus
 - A lézerimpulzus kvázirezonáns
 - Az impulzus ablakfüggvényének Fourier-spektruma sokkal keskenyebb, mint az atom összes többi szintjének a vizsgált szinttől vett távolsága.

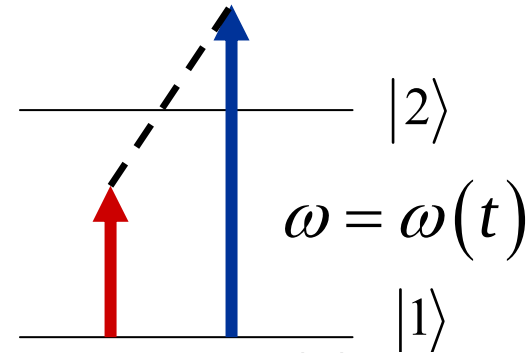
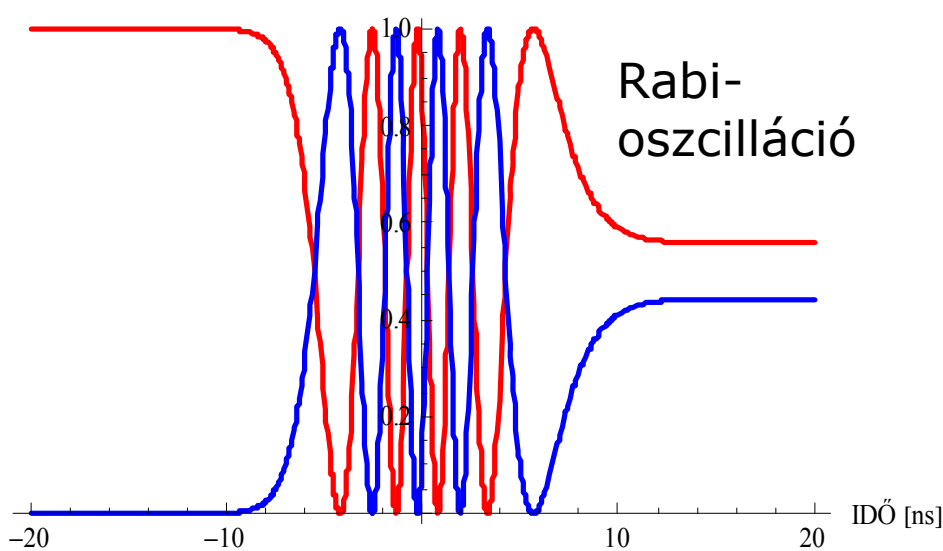


Kétszintes atom és a frekvenciamodulált lézerimpulzus kölcsönhatása



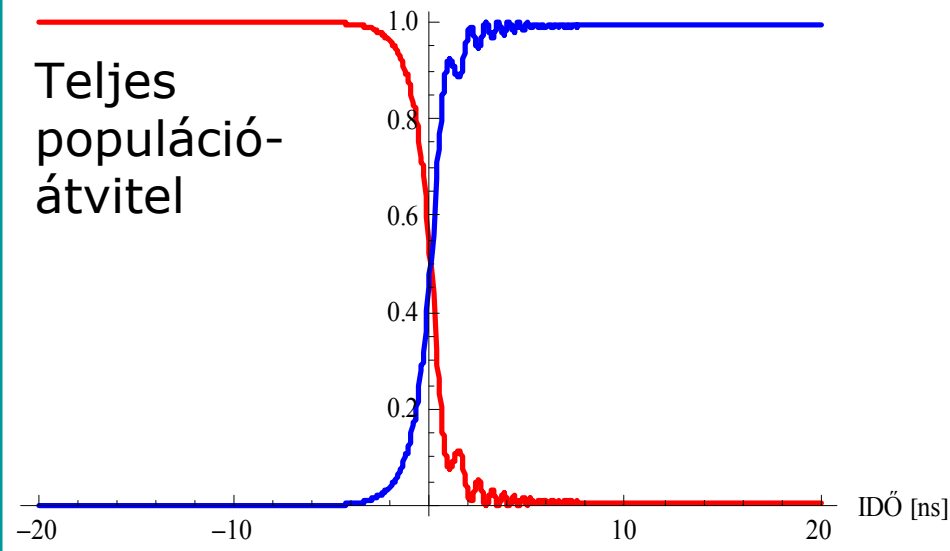
POPULÁCIÓ

Rabi-
oszcilláció



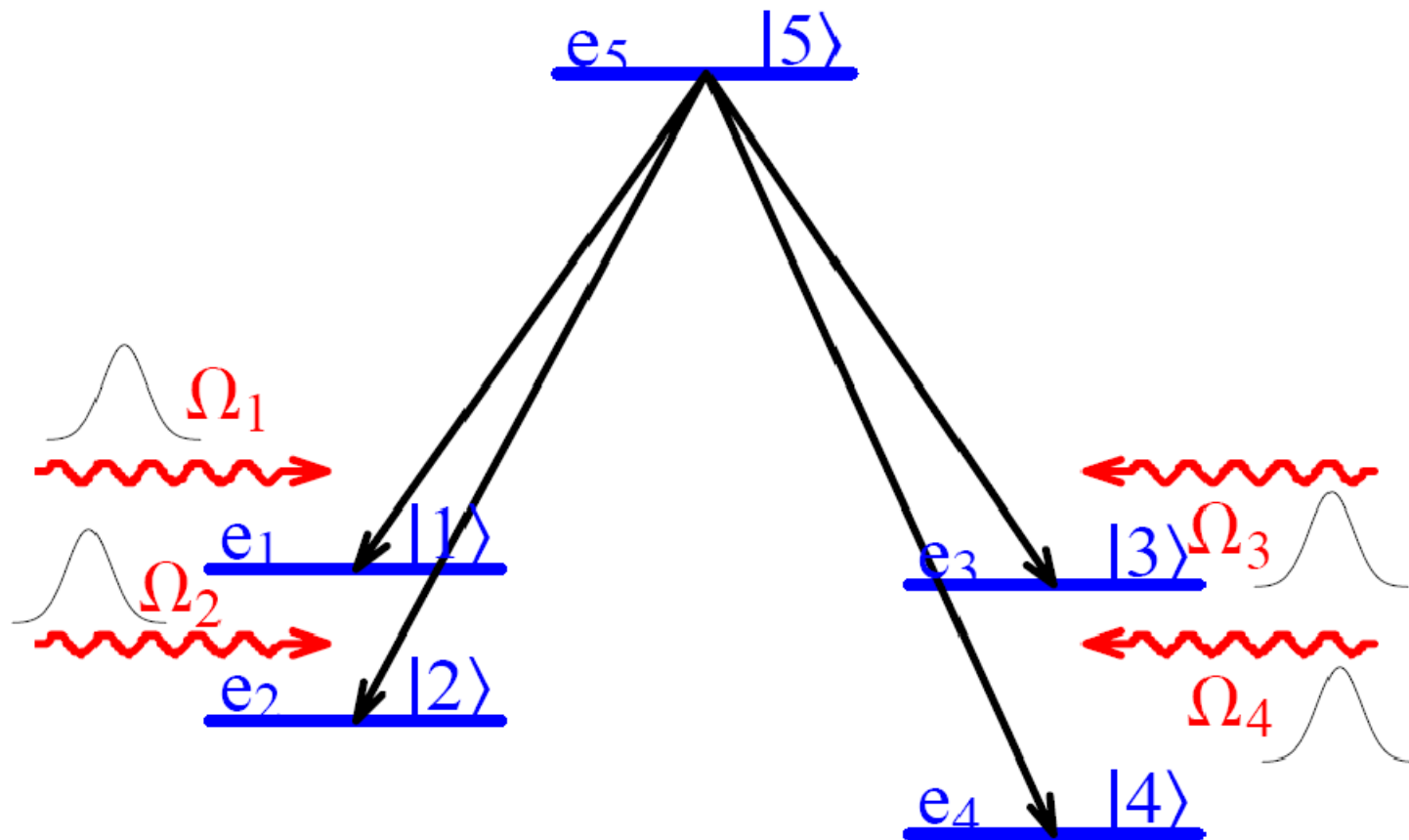
POPULÁCIÓ

Teljes
populáció-
átvitel



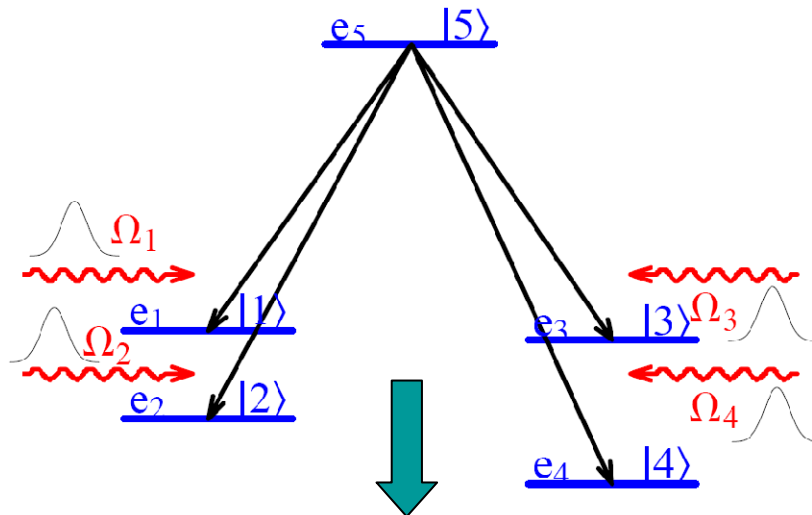
Vizsgált rendszer –

Kettős Λ struktúra



Kettős Λ struktúra –

közelebbről

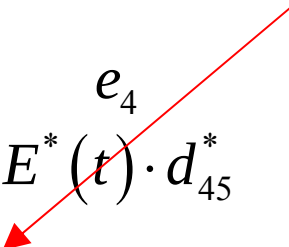


Ortonormált bázis az 5 D-s Hilbert térben:

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- ❑ $|5\rangle$ gerjesztett állapot
- ❑ $|1\rangle \dots |4\rangle$ metastabil (alap) állapotok
- ❑ Dipólszinten megengedett állapotok nyilakkal jelölve
- ❑ 4 egyidejű lézerimpulzus, frekvenciájuk a megengedett átmenetek frekvenciája körül lineárisan *csörpölt*

Hamilton-operátor dipólközelítésben

$$H = \begin{pmatrix} e_1 & & & & E(t) \cdot d_{15} \\ & e_2 & & & E(t) \cdot d_{25} \\ & & e_3 & & E(t) \cdot d_{35} \\ & & & e_4 & E(t) \cdot d_{45} \\ E^*(t) \cdot d_{15}^* & E^*(t) \cdot d_{25}^* & E^*(t) \cdot d_{35}^* & E^*(t) \cdot d_{45}^* & e_5 \end{pmatrix}$$


$$E(t) = \sum_{k=1}^4 \varepsilon_i(t) \cdot \cos \left[\int_0^t \omega_i(\hat{t}) dt \right] \varepsilon_1(t)$$

- Az egyes szintek energiái szerepelnek – a gyakorlatban csak a *különbségekre* van szükség
- „Gyorsan oszcilláló” komponensek szerepelnek a mátrixban

Fázistranszformációk, Forgó hullámú közelítés (RWA)

- $A\{\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \nu_5\}$ bázisban kifejtett állapotvektor-komponensek együtthatóin *fázis*-transzformációt hajtunk végre
- RWA: A megoldás során a nagy frekvenciájú komponenseket elhanyagoljuk; konkrétan:

- Megtartjuk: $\omega_{5k} \cdot t - \int_0^t \omega_j(\hat{t}) d\hat{t}$, ha $j = k$

- Elhagyjuk: $\omega_{5k} \cdot t - \int_0^t \omega_j(\hat{t}) d\hat{t}$ ha $j \neq k$ és

$$\omega_{5k} \cdot t + \int_0^t \omega_j(\hat{t}) d\hat{t}; \quad j, k \in \{1, 2, 3, 4\}$$

Transzformált Schrödinger-egyenlet

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = \hbar \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega_1 \\ 0 & -(\Delta_{21} - \alpha_{21}t) & 0 & 0 & \Omega_2 \\ 0 & 0 & -(\Delta_{31} - \alpha_{31}t) & 0 & \Omega_3 \\ 0 & 0 & 0 & -(\Delta_{41} - \alpha_{41}t) & \Omega_4 \\ \Omega_1^* & \Omega_2^* & \Omega_3^* & \Omega_4^* & (\Delta_1 - \alpha_1 t) \end{pmatrix} \cdot \psi$$

- Rabi-frekvencia: $\Omega_k(t) \equiv \frac{\varepsilon_k(t) d_{k5}}{2\hbar}$
- Lineáris csörpöt veszünk tekintetbe: $\omega_k(t) = \omega_{0k} + \alpha_k t$, α_k csörpsebesség
- Elhangolás: $\Delta_k = \omega_{5k} - \omega_{0k}$
- $\Delta_{j1} = \Delta_j - \Delta_1$ a elhangolások közötti különbség, $\alpha_j - \alpha_1 = \alpha_{j1}$ a csörpsebességek közti különbség. (Kapcsolatosak a kettős Raman-rezonanciával)

A numerikus megoldás

- Az egyenletet **Mathematica** software segítségével oldottuk meg

- A Rabi-frekvenciák következő alakját alkalmazzuk:

Rabi-frekvencia
amplitúdója

$$\Omega_k(t) = \omega_p^k \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_p}\right)^2} \cdot e^{i \cdot \varphi_k}$$

impulzus fázisa

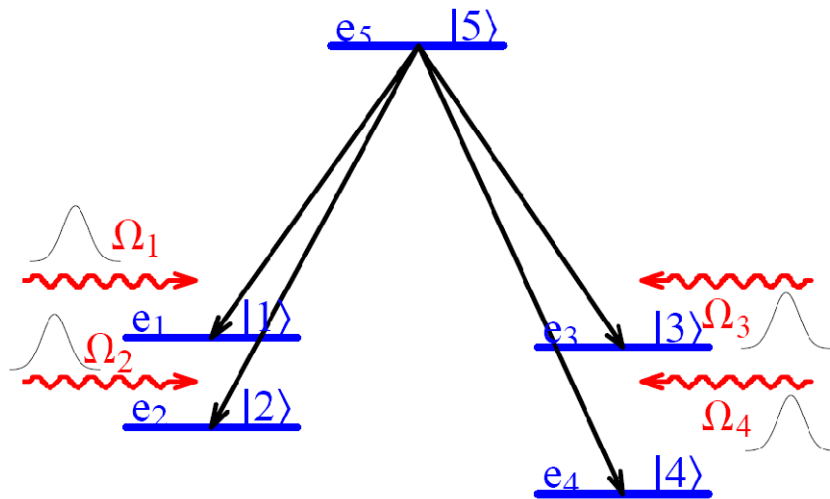
lézimpulzus szélessége

- „tipikus” paraméterértékek (gyakorlatban könnyen beállíthatóak)

$\omega_p^k *$	α_1	$\alpha_{k1} *$	Δ_1	Δ_{31}	$\Delta_{21} = \Delta_{41}$	t_p
15 GHz	$5 \frac{\text{GHz}}{\text{ns}}$	$0 \frac{\text{GHz}}{\text{ns}}$	0 GHz	0 GHz	1 GHz	10 ns

* $k \in \{1, 2, 3, 4\}$

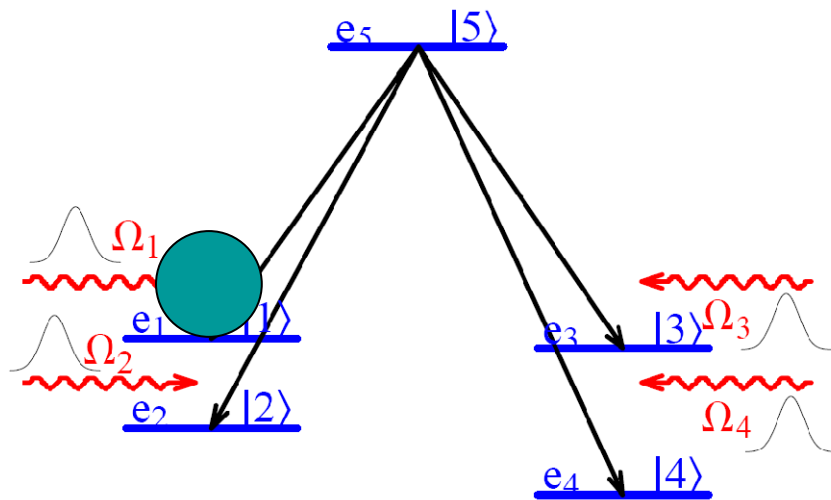
A rendszer viselkedése különböző kezdeti populációk esetén



Ω_1 és Ω_2 fáziskülönbségétől való függést vizsgáljuk

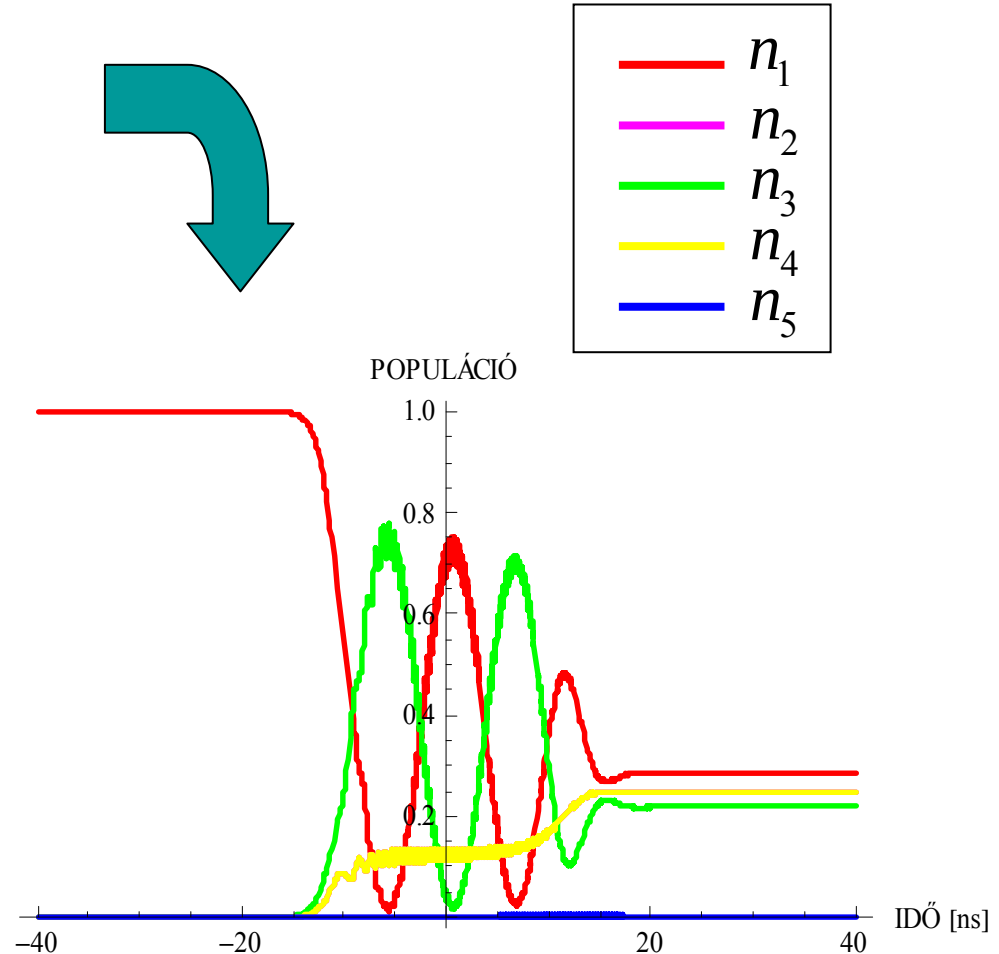
$$\Omega_k(t) = \omega_p^k \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_p}\right)^2} \cdot e^{i \cdot \varphi_k}$$

A rendszer viselkedése különböző kezdeti populációk esetén

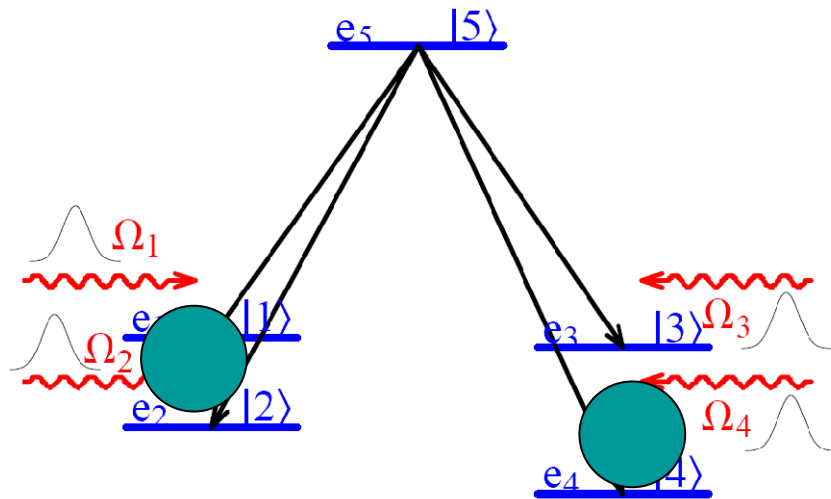


Ω_1 és fáziskülönbségétől való függést vizsgáljuk

$$\Omega_k(t) = \omega_p^k \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_p}\right)^2} \cdot e^{i \cdot \varphi_k}$$

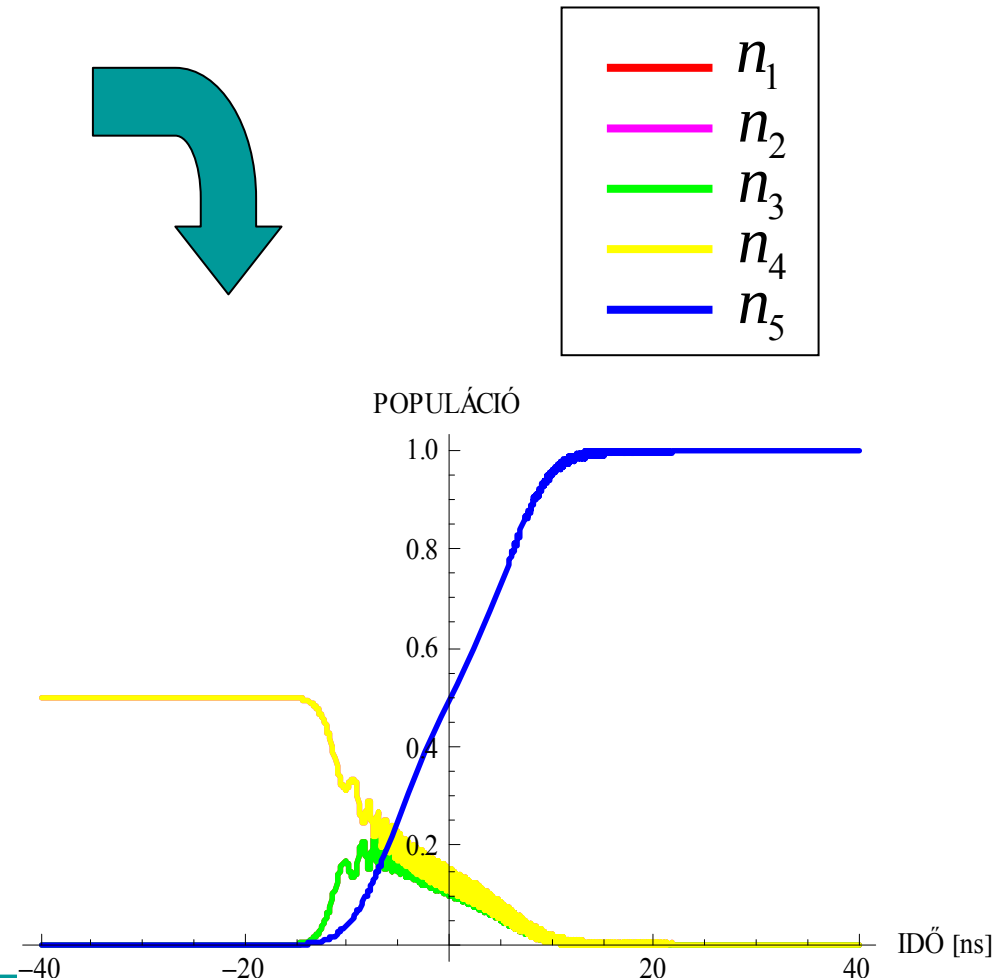


A rendszer viselkedése különböző kezdeti populációk esetén

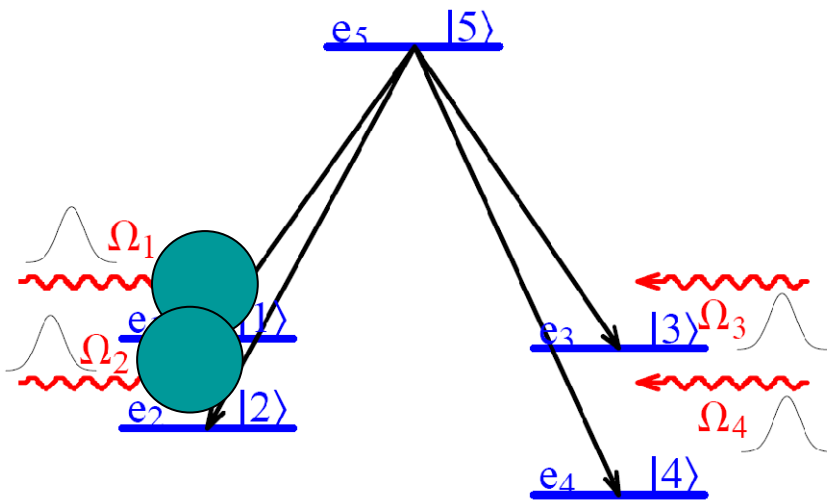


Ω_1 és fáziskülönbségétől való függést vizsgáljuk

$$\Omega_k(t) = \omega_p^k \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_p}\right)^2} \cdot e^{i \cdot \varphi_k}$$

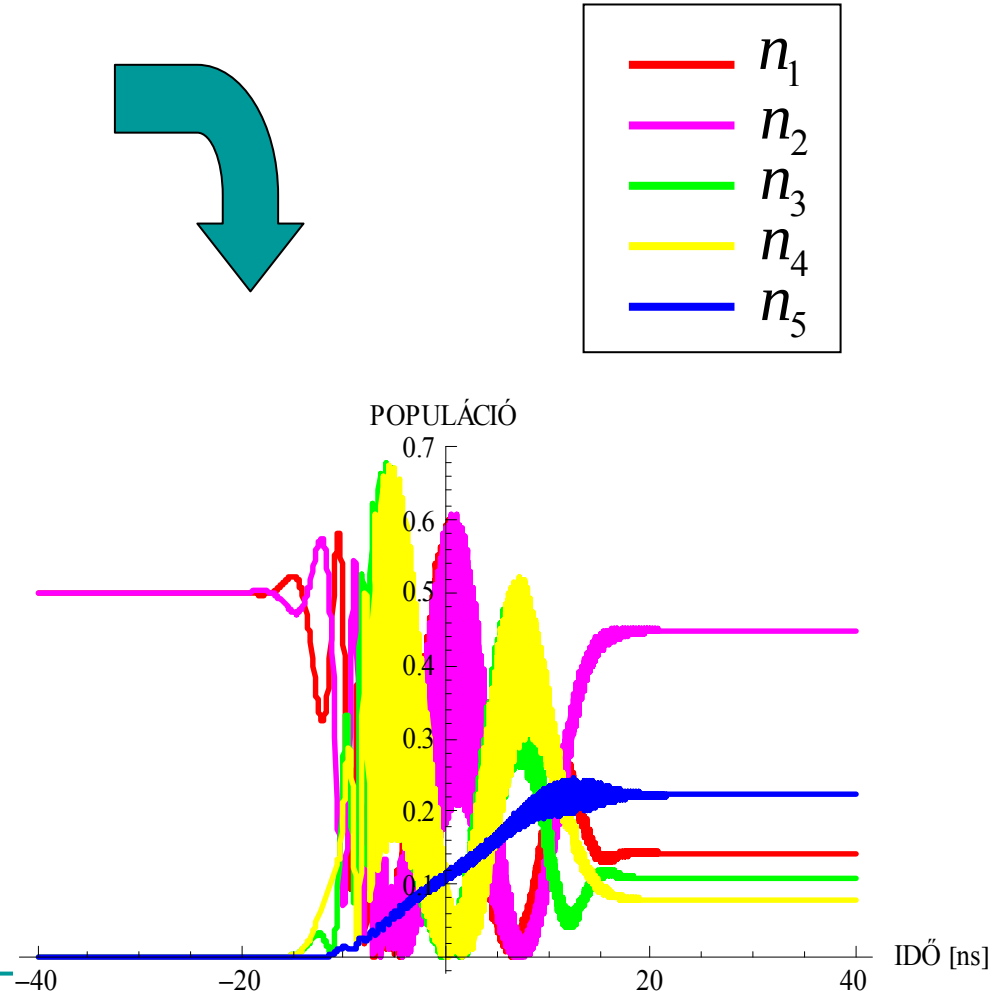


A rendszer viselkedése különböző kezdeti populációk esetén

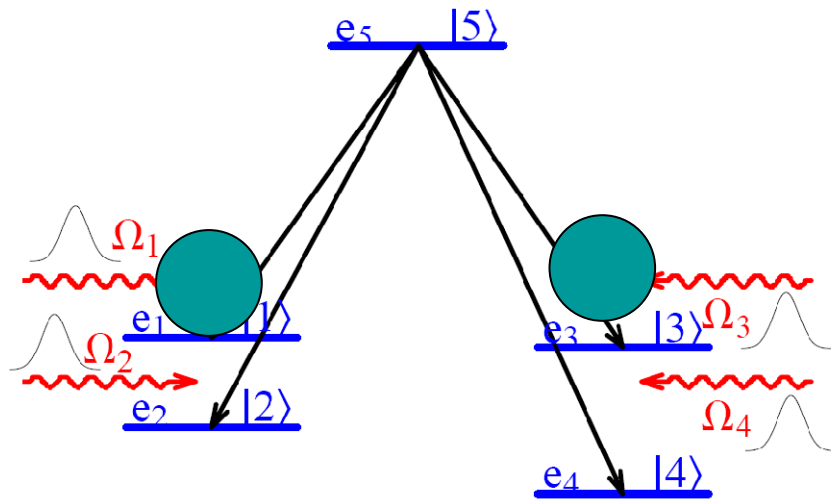


Ω_1 és Ω_2 fáziskülönbségétől való függést vizsgáljuk

$$\Omega_k(t) = \omega_p^k \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_p}\right)^2} \cdot e^{i \cdot \varphi_k}$$



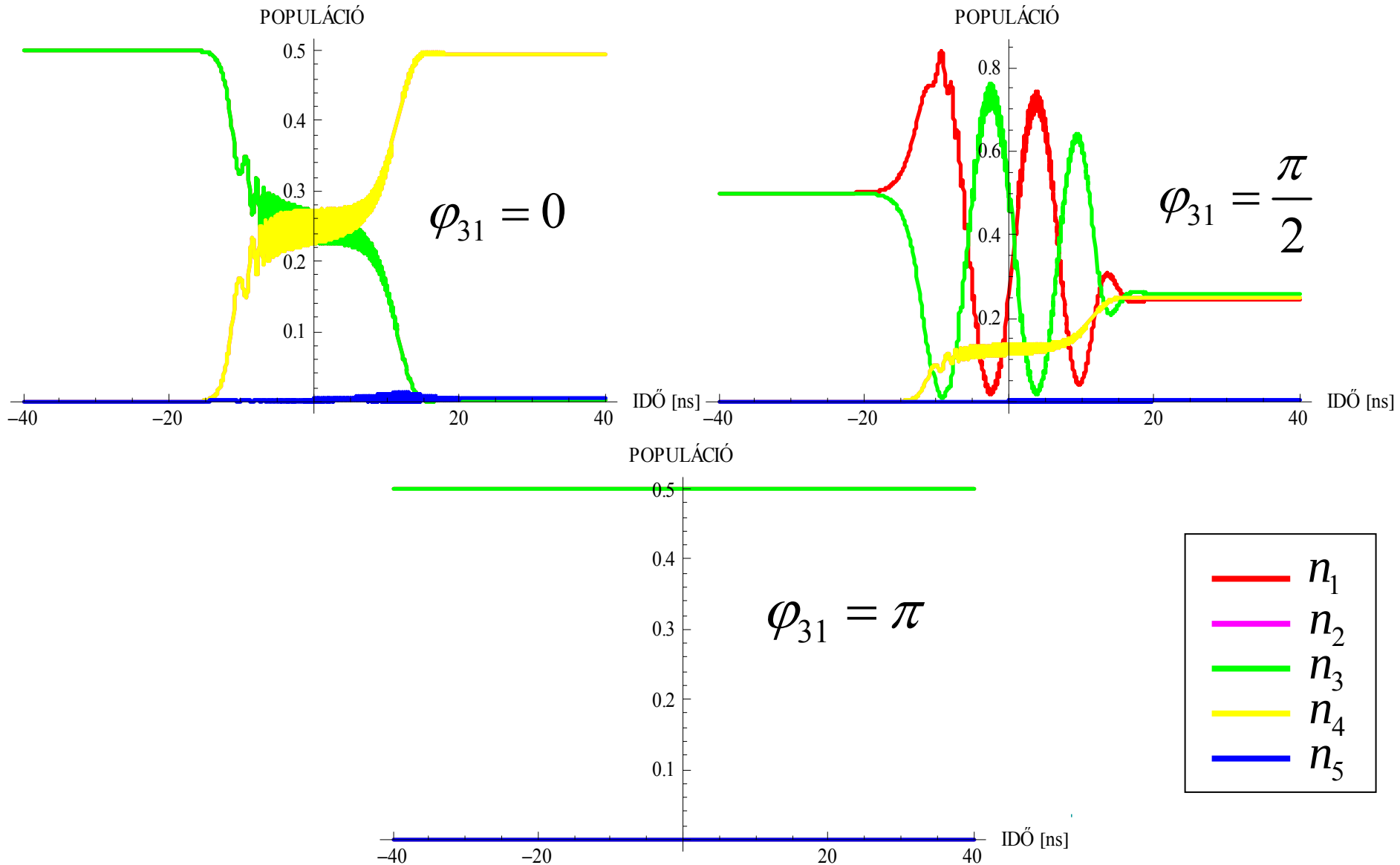
A rendszer viselkedése különböző kezdeti populációk esetén



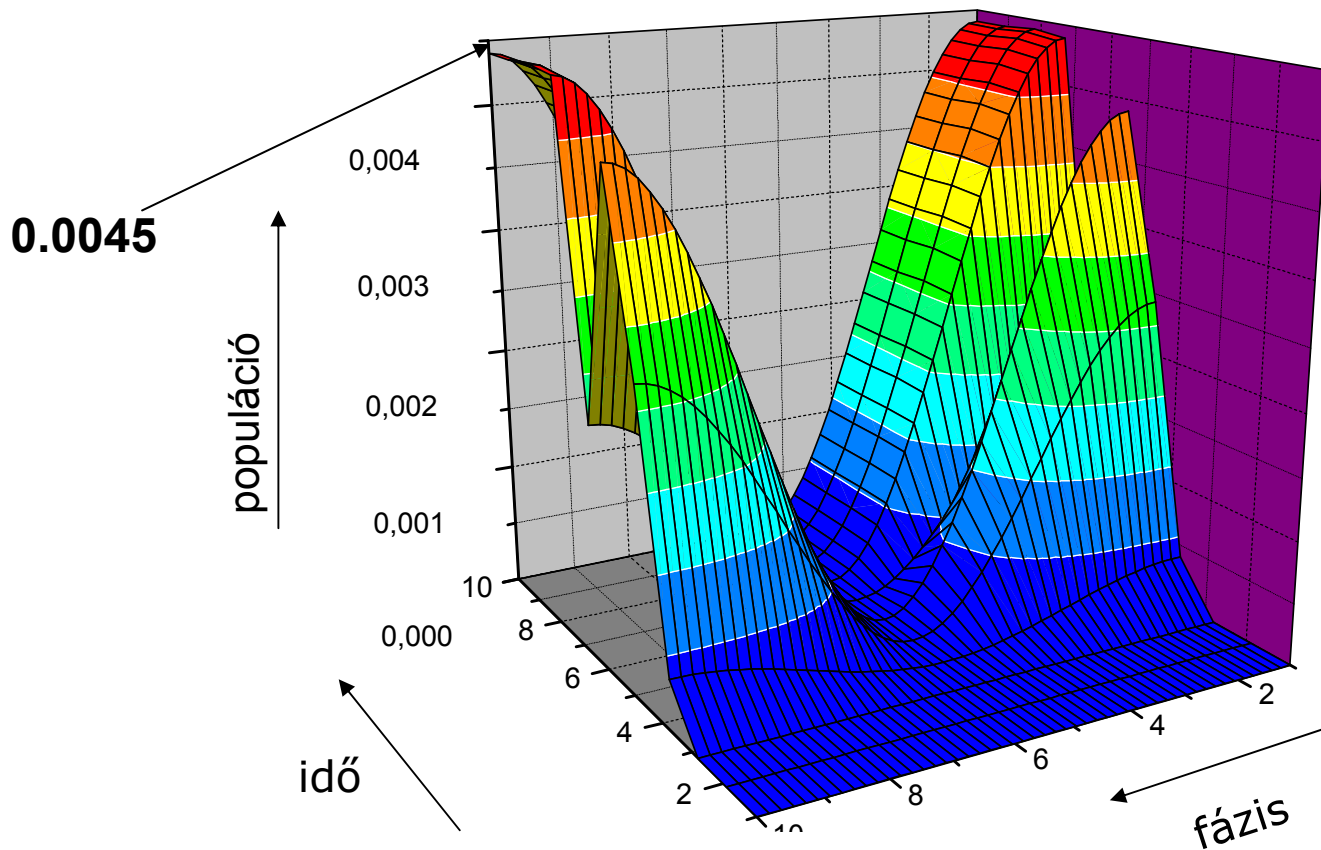
Ω_1 és Ω_3 fáziskülönbségétől való függést vizsgáljuk

$$\Omega_k(t) = \omega_p^k \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_p}\right)^2} \cdot e^{i \cdot \varphi_k}$$

A populációk dinamikájának fázisfüggése

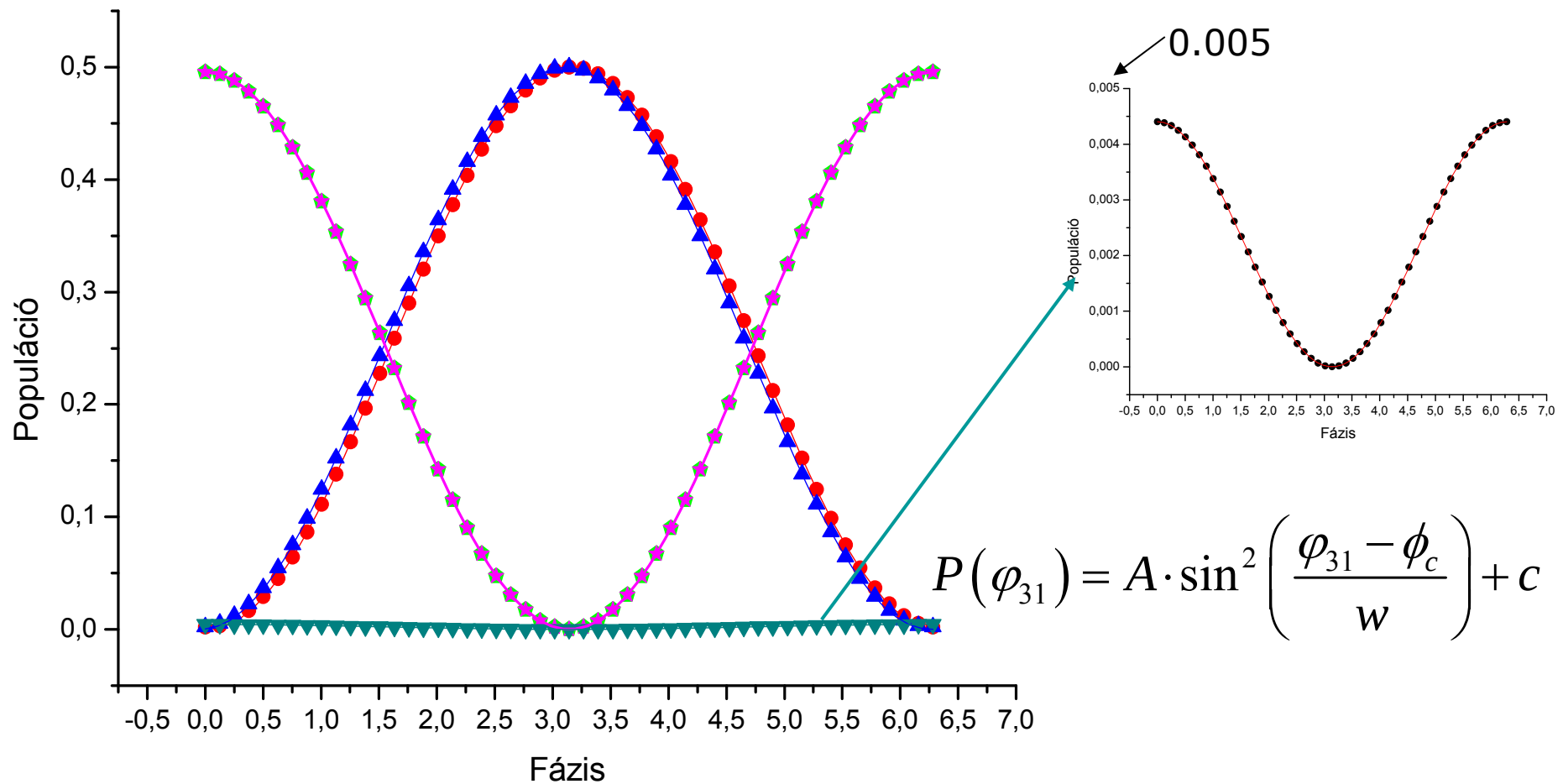


A gerjesztett állapot populációja a kölcsönhatás ideje alatt

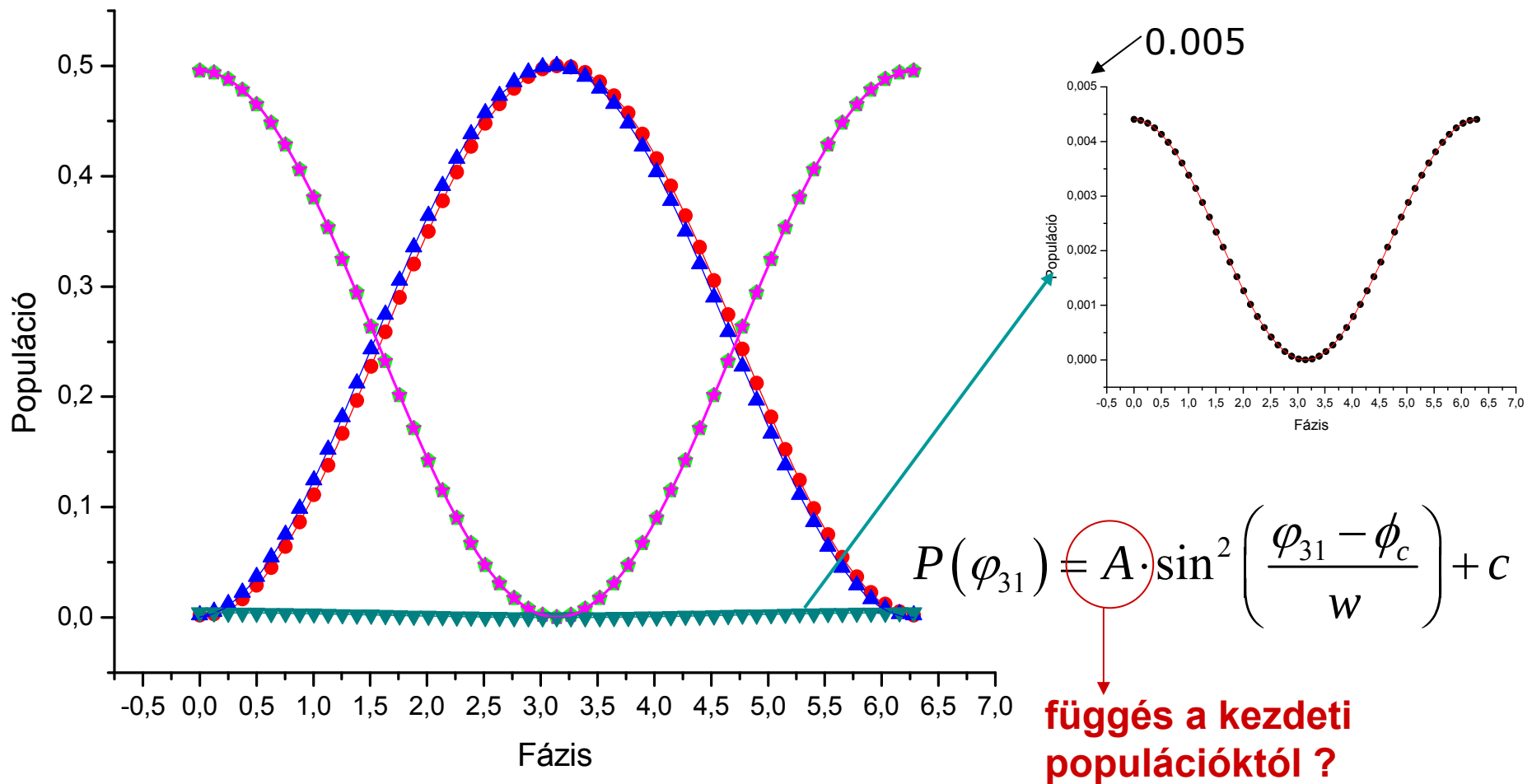


$$\varphi_{31} \in \{0, 2\pi\}$$

A végső populációk fázisfüggése

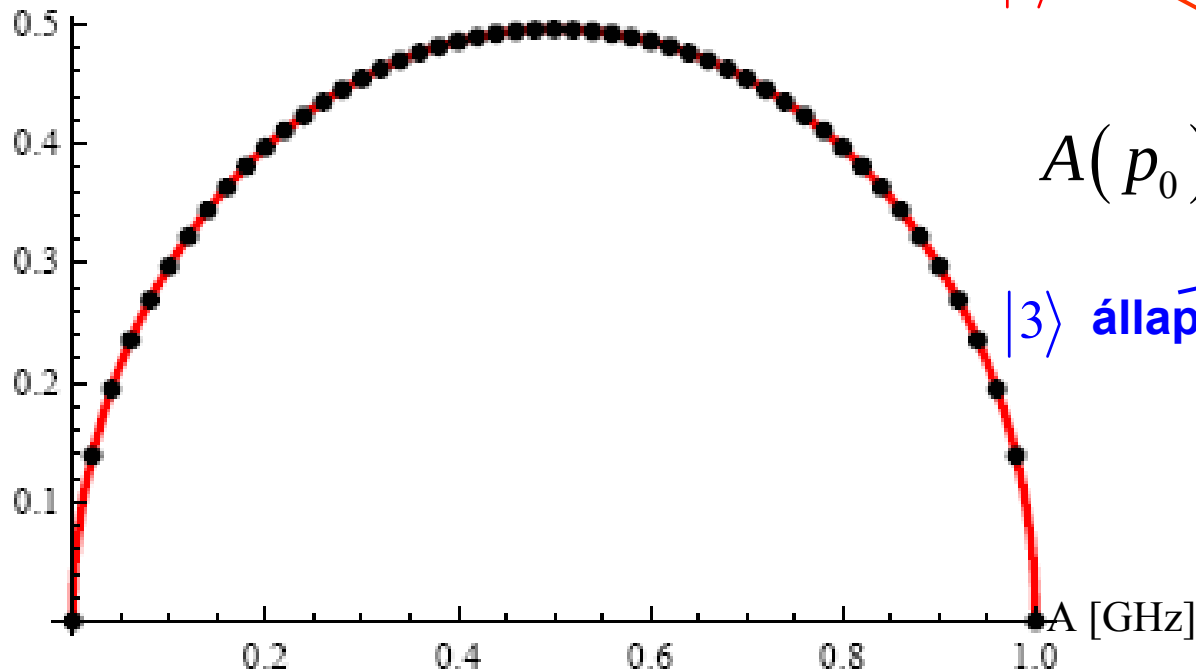


A végső populációk fázisfüggése



Az „A” paraméter függése a kezdeti populációtól

POPULÁCIÓ



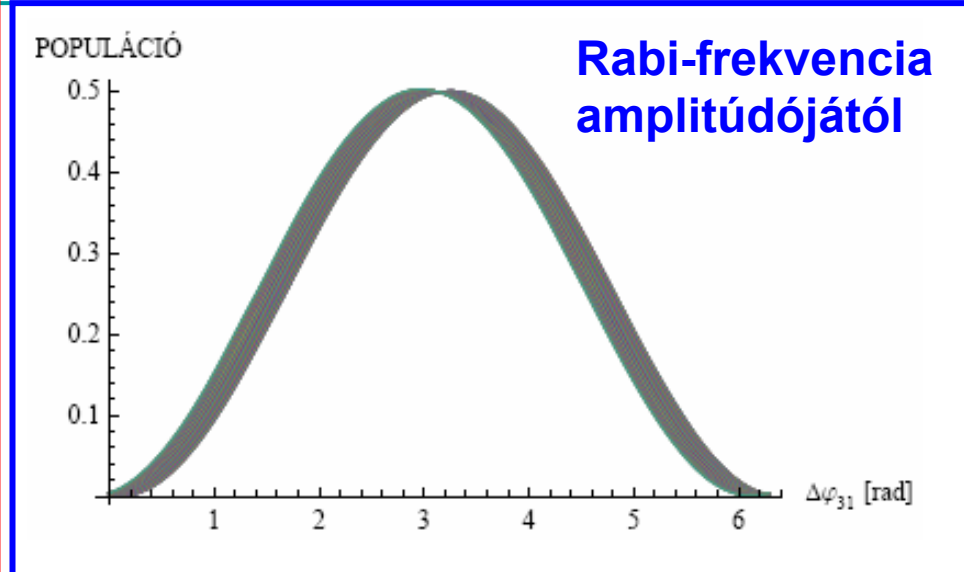
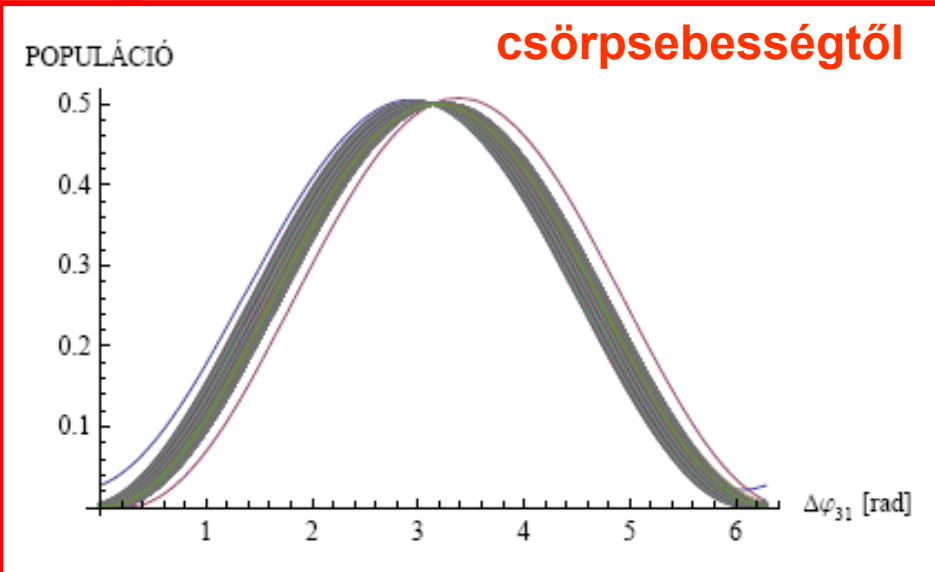
$|1\rangle$ állapot kezdeti populációja

$$A(p_0) = B \sqrt{p_0} \sqrt{(1-p_0)}$$

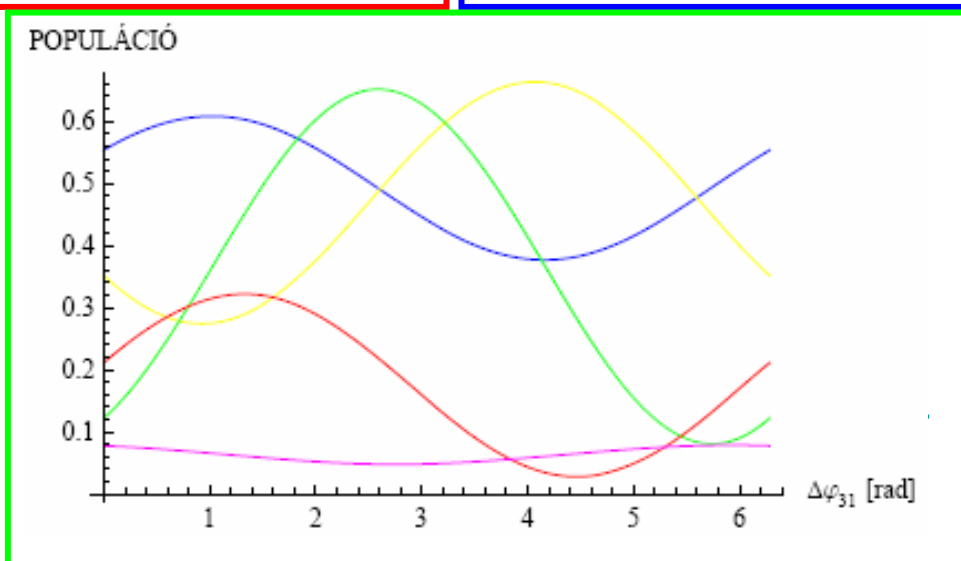
$|3\rangle$ állapot kezdeti populációja

Összefoglalva:
$$P(\varphi_{31}, p_0) = B \cdot \sqrt{p_0 (1-p_0)} \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{31} - \phi_c}{w} \right) + c$$

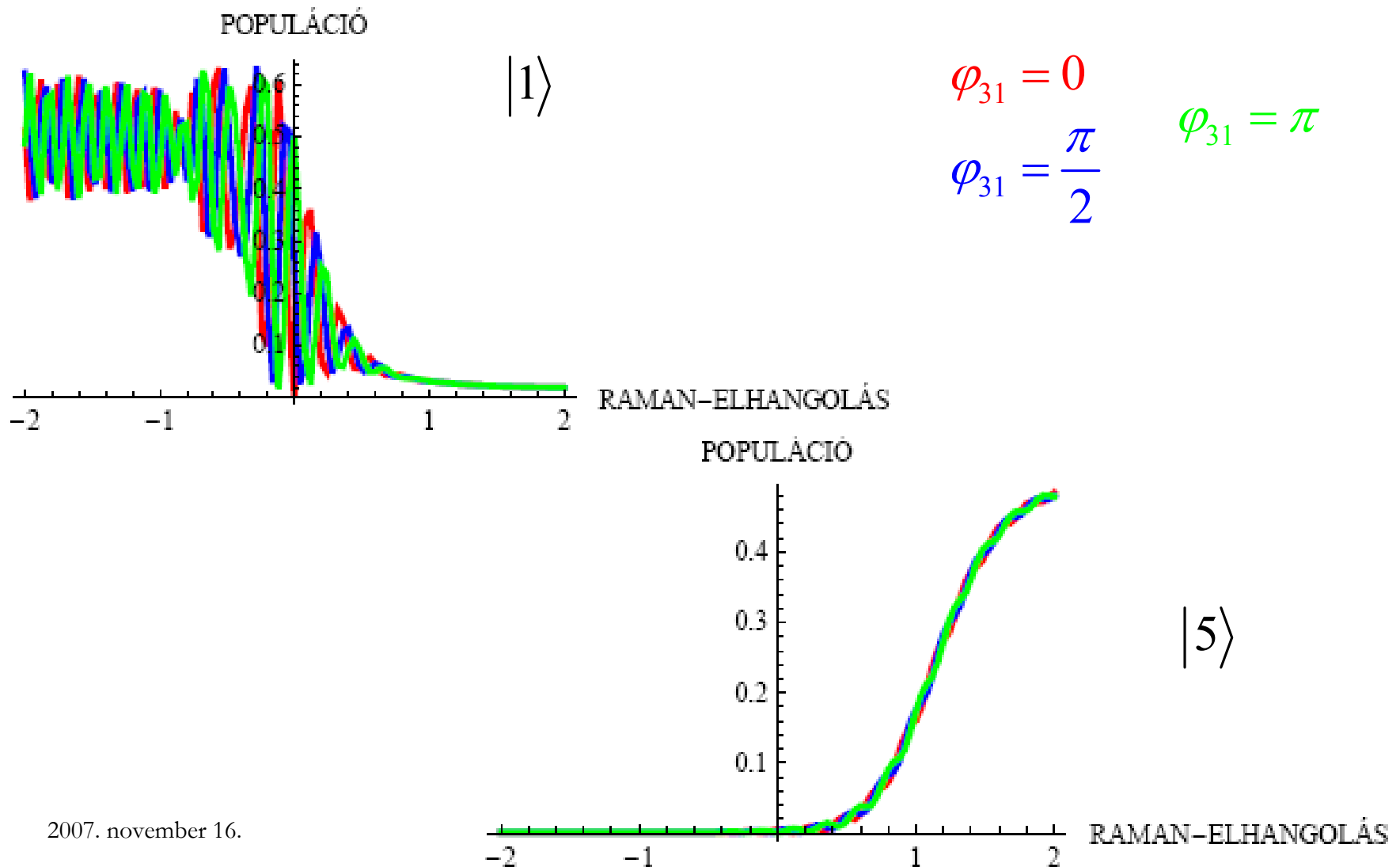
A végső populációk függése az egyes paraméterektől



az 1. és 3. lézer-
impulzus közötti
**Raman-
elhangolástól**



Végső populációk függése a Raman-elhangolástól



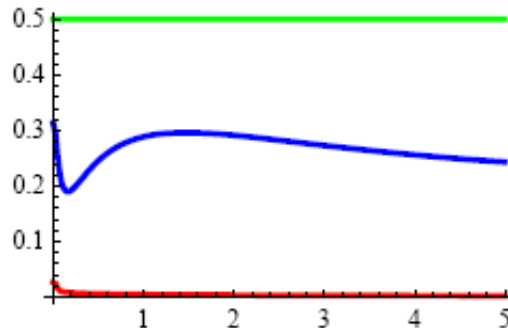
Végső populációk függése a csörpsebességtől

$$\varphi_{31} = 0$$

$$\varphi_{31} = \frac{\pi}{2}$$

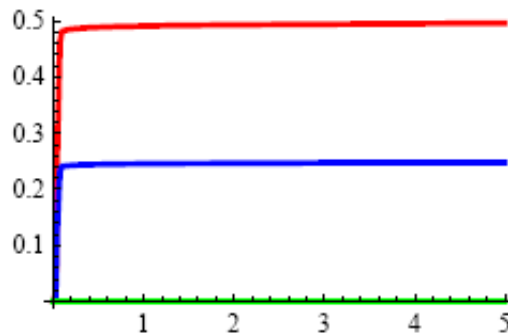
$$\varphi_{31} = \pi$$

POPULÁCIÓ



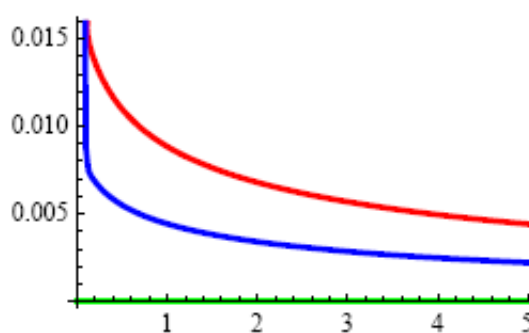
CSÖRP-SEBESSÉG $[\frac{\text{GHz}}{\text{ns}}]$

POPULÁCIÓ



CSÖRP-SEBESSÉG $[\frac{\text{GHz}}{\text{ns}}]$

POPULÁCIÓ



CSÖRP-SEBESSÉG $[\frac{\text{GHz}}{\text{ns}}]$

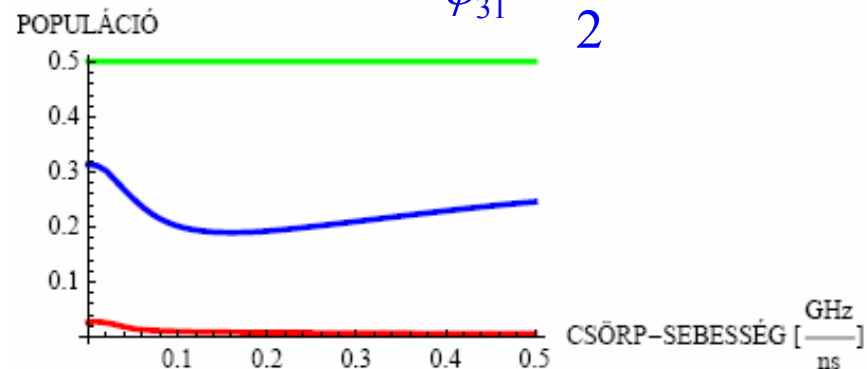
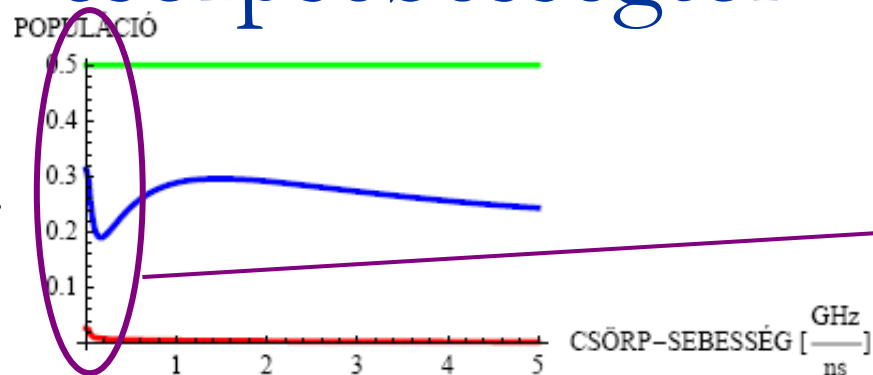
Végső populációk függése a csörpsebességtől

$$\varphi_{31} = 0$$

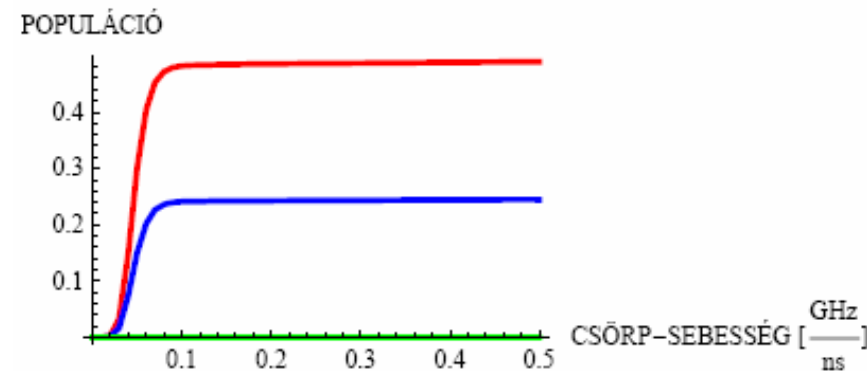
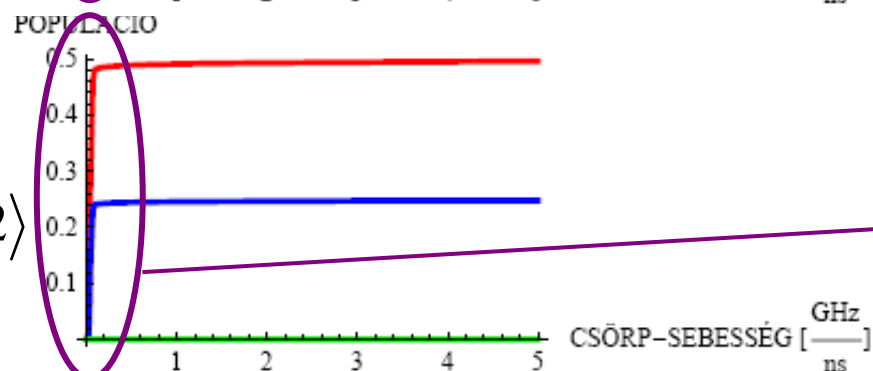
$$\varphi_{31} = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi_{31} = \pi$$

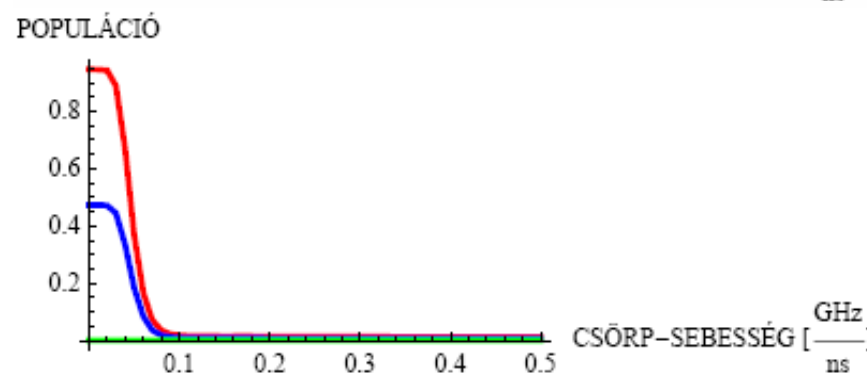
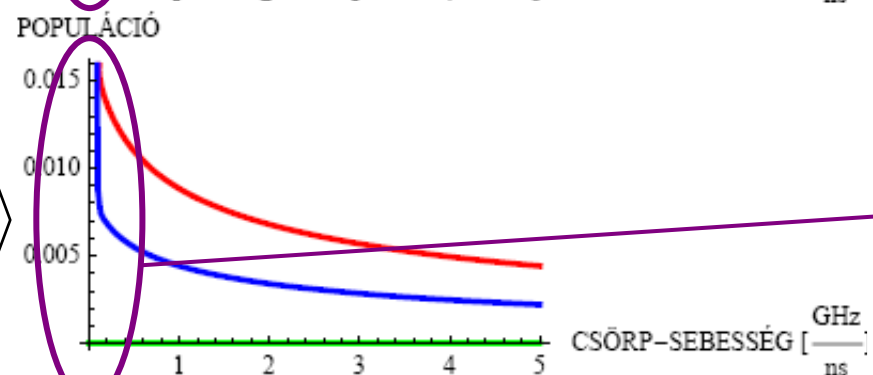
|1>



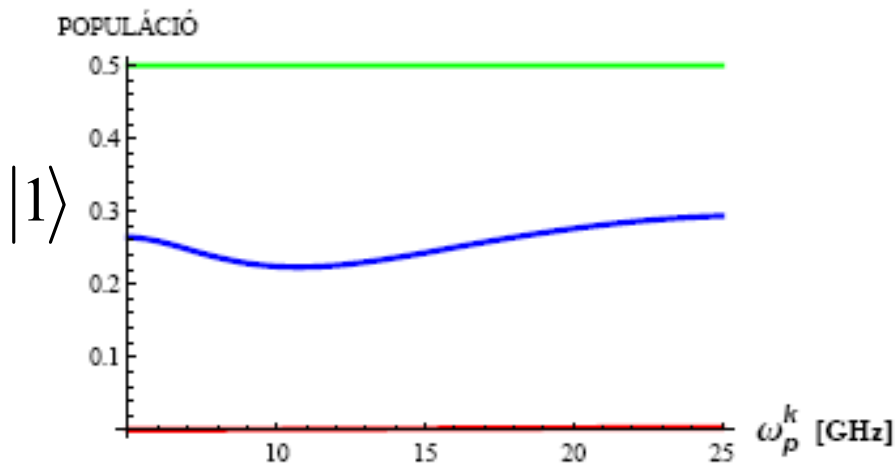
|2>



|5>



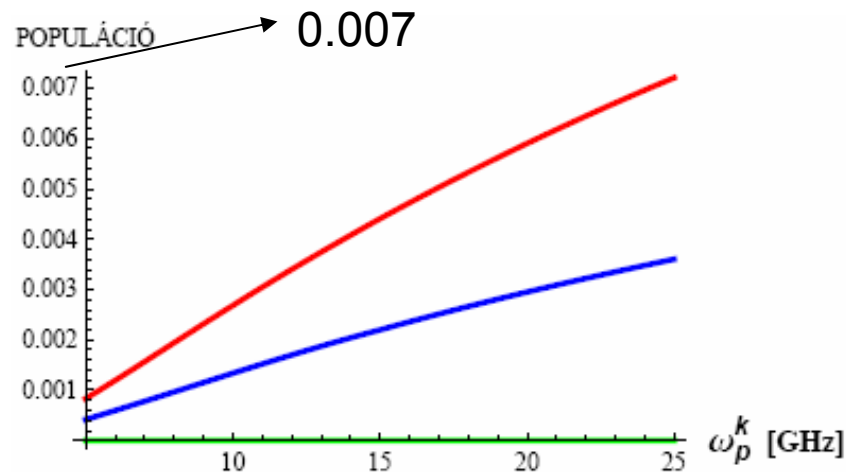
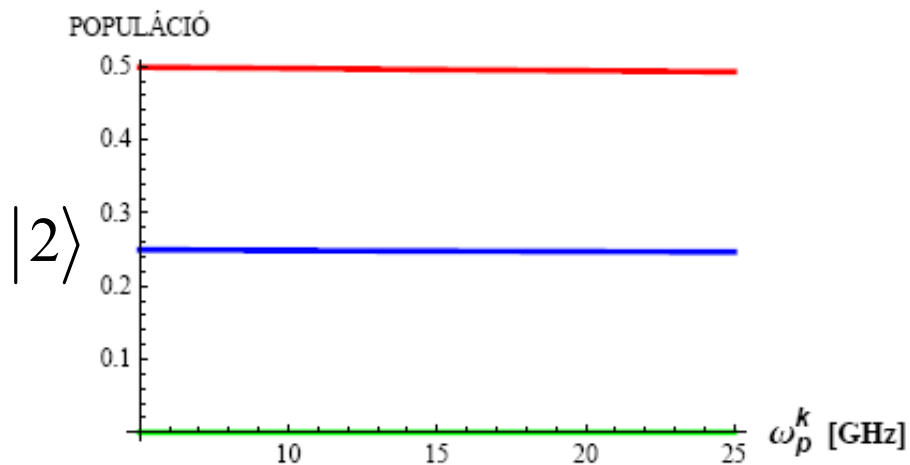
Végső populációk függése a Rabi-frekvenciák amplitúdójától



$$\varphi_{31} = 0$$

$$\varphi_{31} = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi_{31} = \pi$$



$|5\rangle$

Összefoglalás

- Kettős lambda atomi struktúra és lézerimpulzusok kölcsönhatását vizsgáltuk
- Meghatároztuk az atomi szintek populációinak időfüggését különböző kezdeti feltételek mellett; bizonyos feltételek mellett az atom *elhanyagolható mértékben gerjesztődik* és az atomi populációk *függnek* a kölcsönható impulzusok *fáziskülönbségétől*
- Megvizsgáltuk a végső populációk relatív fázistól és a kezdeti feltételektől való függését
- A kölcsönhatás eredményeképpen kialakuló populációk invertálható függvényei a relatív fázisnak —————→ alkalmazás: fázisinformáció beírása az atomi populációkba
- Vizsgáltuk a kölcsönhatás paramétereinek hatását a végső populációkra: ezek alapján kijelenthetjük, hogy a kölcsönhatás *robosztus* (azaz a paraméterek nem túl nagymértékű megváltoztatása elhanyagolható mértékben változtatja meg az eredményt)

Köszönetnyilvánítás

- Köszönöm a segítséget és a türelmet témavezetőmnek, Dr. Djotyan Gagiknak
- A KFKI RMKI Plazmafizikai főosztályának munkatársainak a munkaszemináriumokon való részvételt és a hasznos észrevételeket
- Dr. Tóth Jánosnak a Mathematica kezelésében nyújtott segítségét

Köszönöm a figyelmet!