

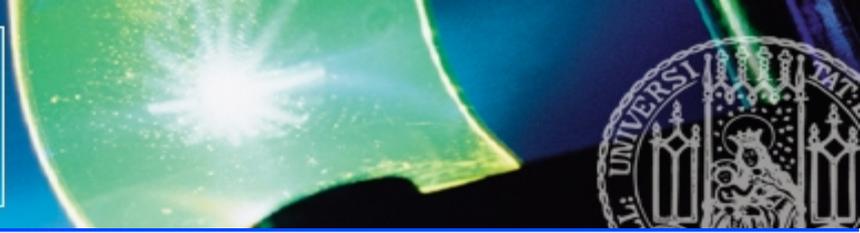


Seminar: Atom trifft Photon

Elektromagnetisch induzierte Transparenz

(EIT)

Langsames Licht



Photon-Photon Wechselwirkung



[von: FOG Imperial College]

Langsames Licht



[Hau, Nature 1999]

1. EIT: Boller-Experiment 1991

2. Theorie der EIT

- 3-Niveau-Schemata
- Anschauliche Erklärung
- Zustandspopulation und Suszeptibilität
- Pulspropagation

3. Langsames Licht: Hau-Experiment 1999

4. Zusammenfassung

1. Boller-Experiment

EIT/ Langsames Licht

VOLUME 66, NUMBER 20

PHYSICAL REVIEW LETTERS

20 MAY 1991

Observation of Electromagnetically Induced Transparency

K.-J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris

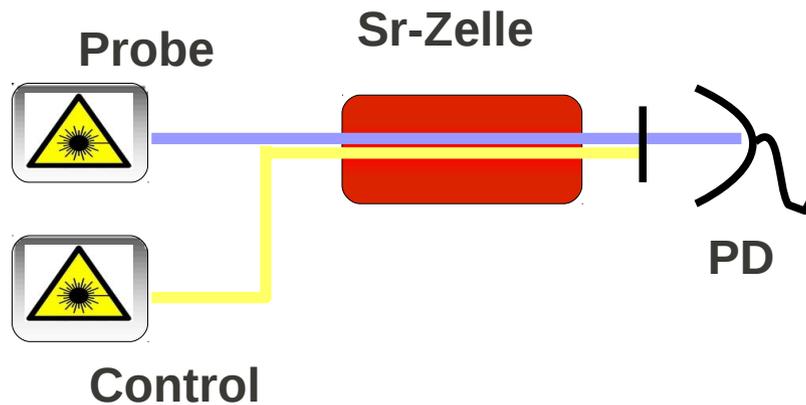
Edward L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 12 December 1990)

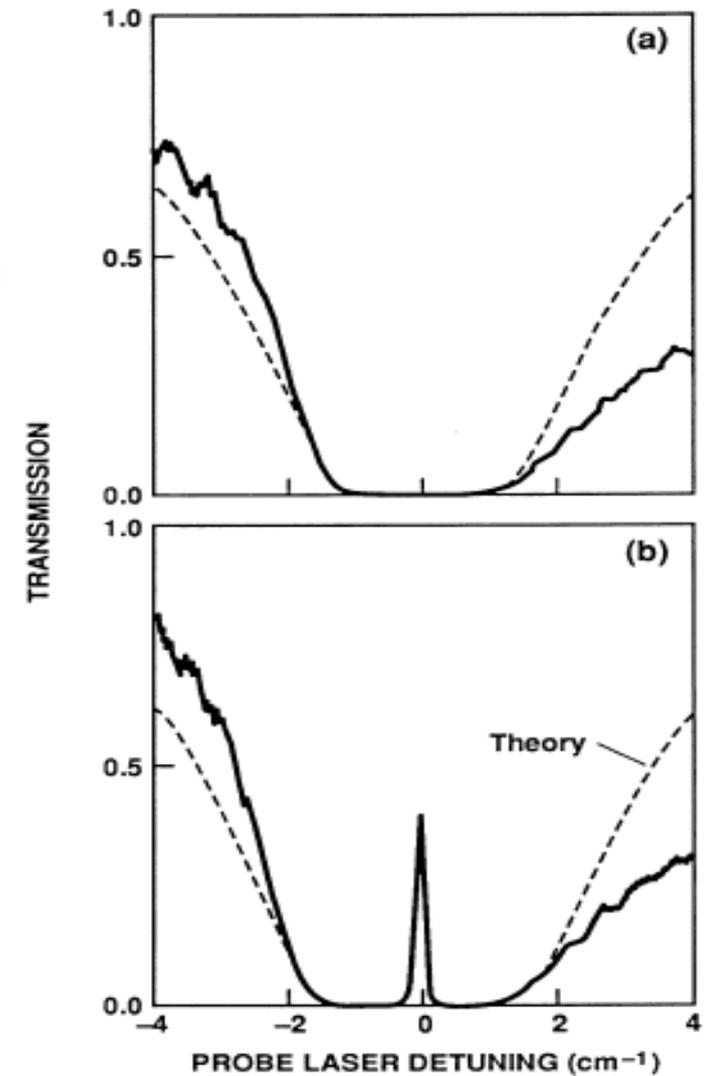
- **System:**

optisch dichtes, gasförmiges Sr

- **2 Lasersysteme**



ohne
Control



mit
Control

[aus: Boller et al. 1991]

1. Boller-Experiment

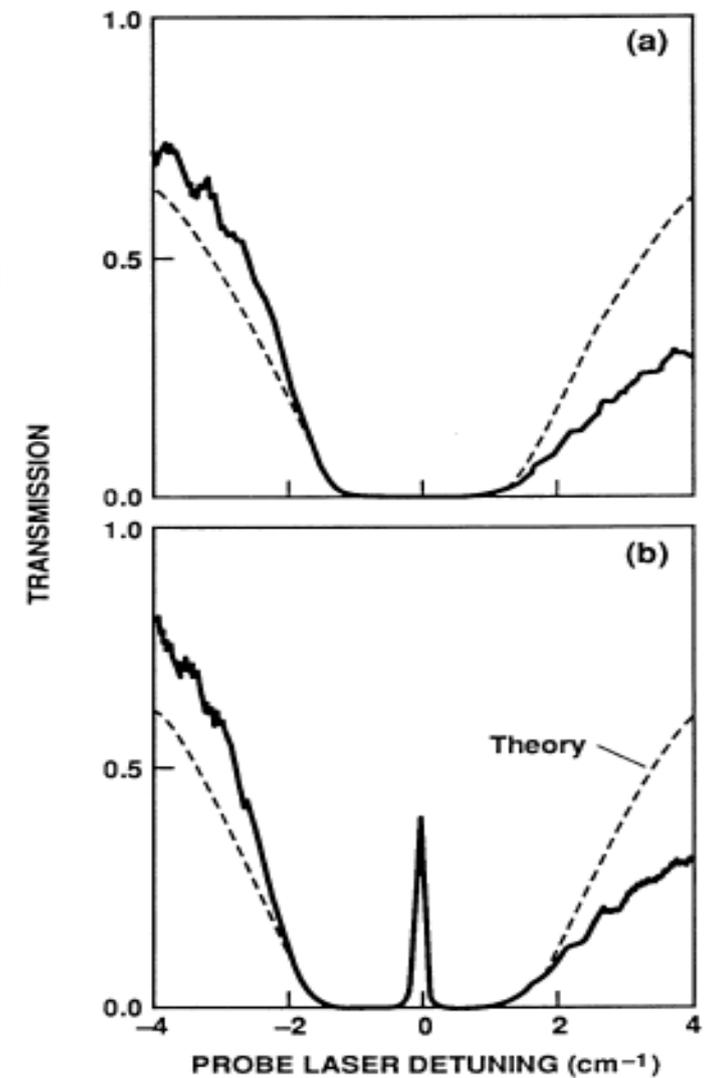
- **Beobachtung:** Transparenzfenster auf Resonanz in ansonsten optisch dichtem Medium

$$T_{\text{EIT}}/T_{\text{reg}} = 10^8$$

→ „EIT“

Elektromagnetisch induzierte Transparenz

ohne
Control

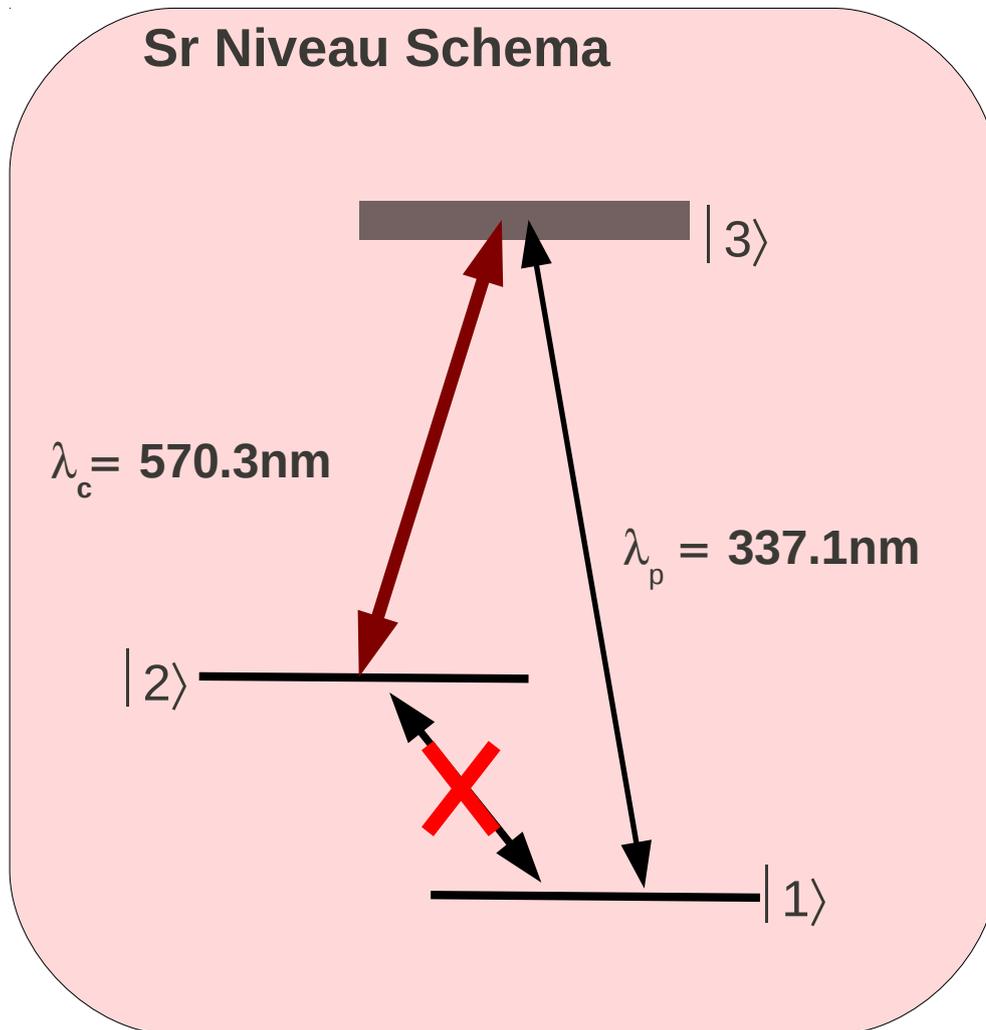


mit
Control

[aus: Boller et al. 1991]

1. Boller-Experiment (Modell)

EIT/ Langsames Licht



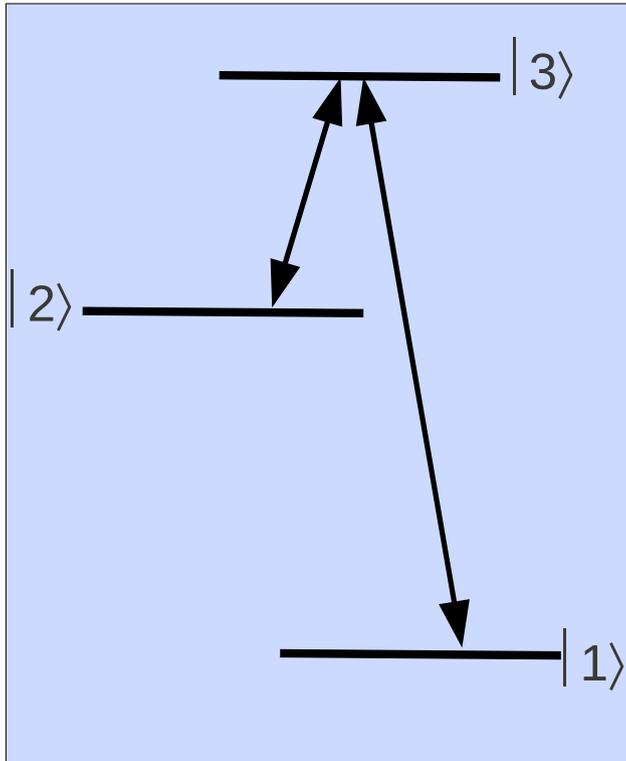
$$I_{\text{contr}} / I_{\text{probe}} = 1000$$

EIT:

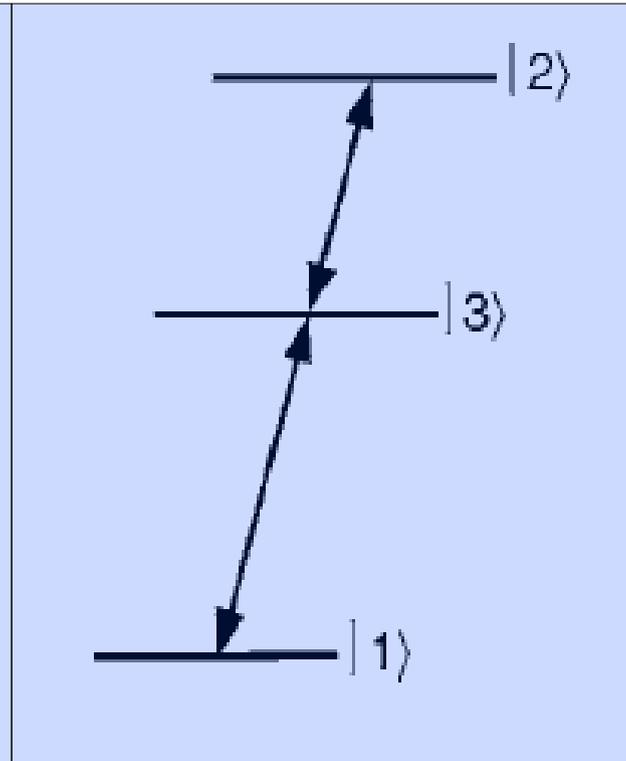
Charakteristisch für
3-Niveau System!

2. Theorie: 3-Niveau Schemata

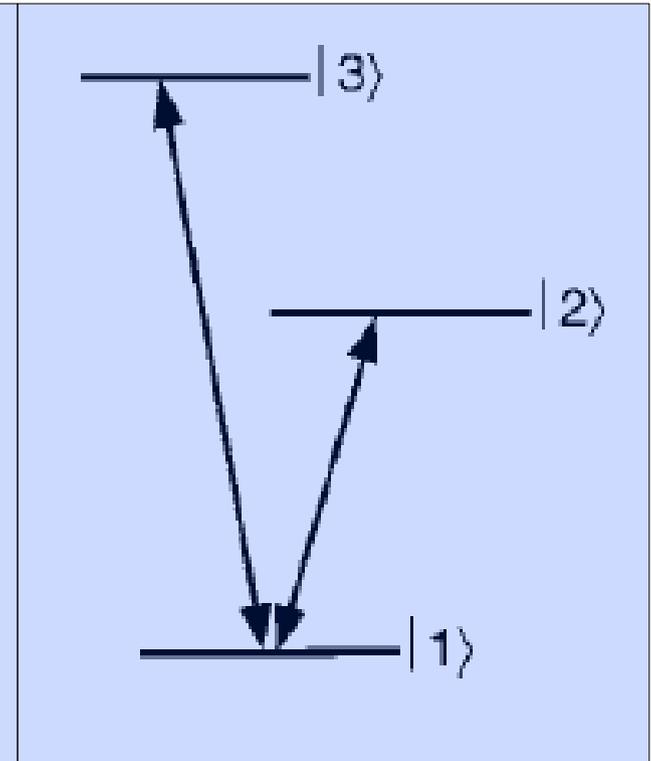
EIT/ Langsames Licht



Λ -Schema



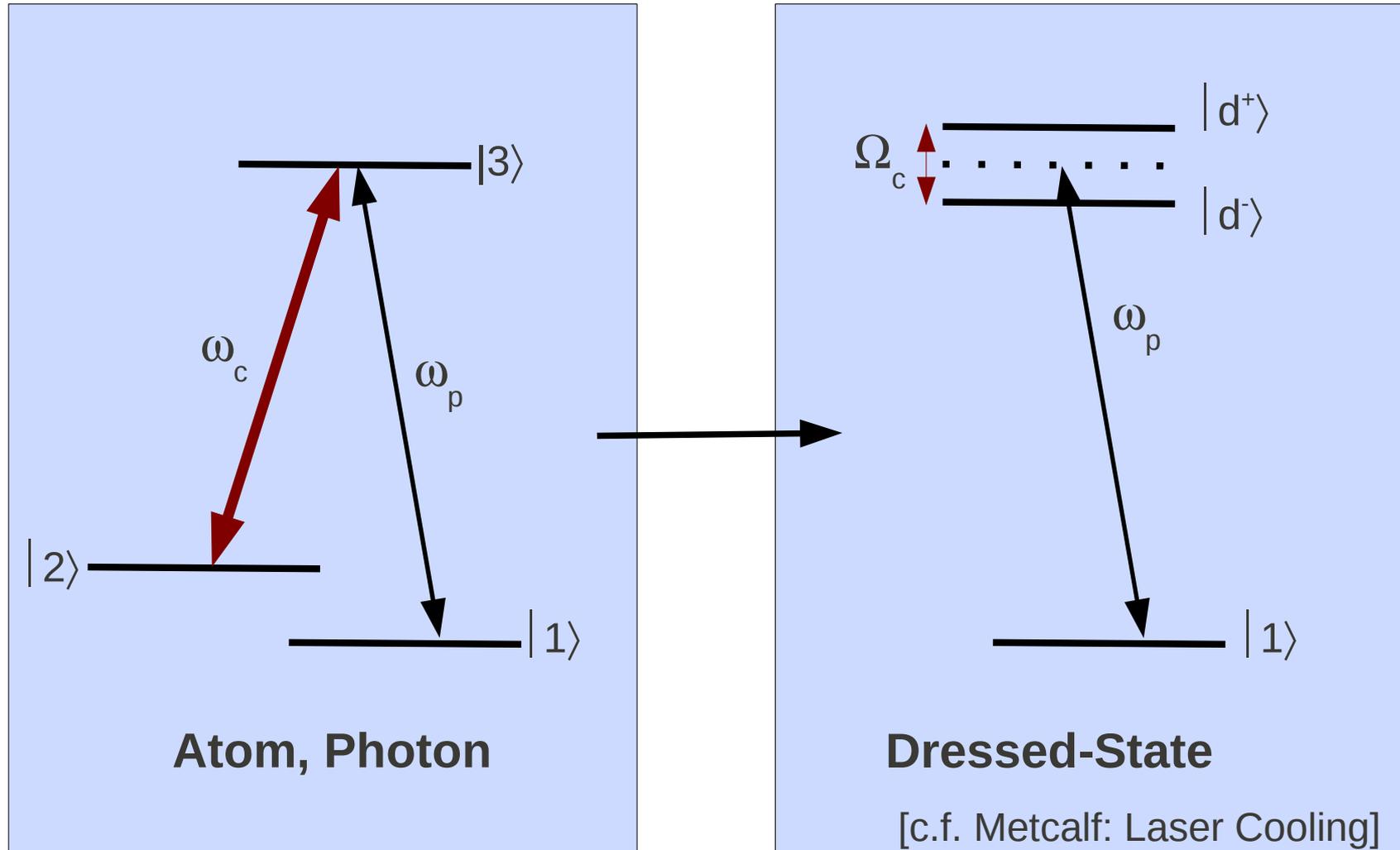
Leiter-Schema



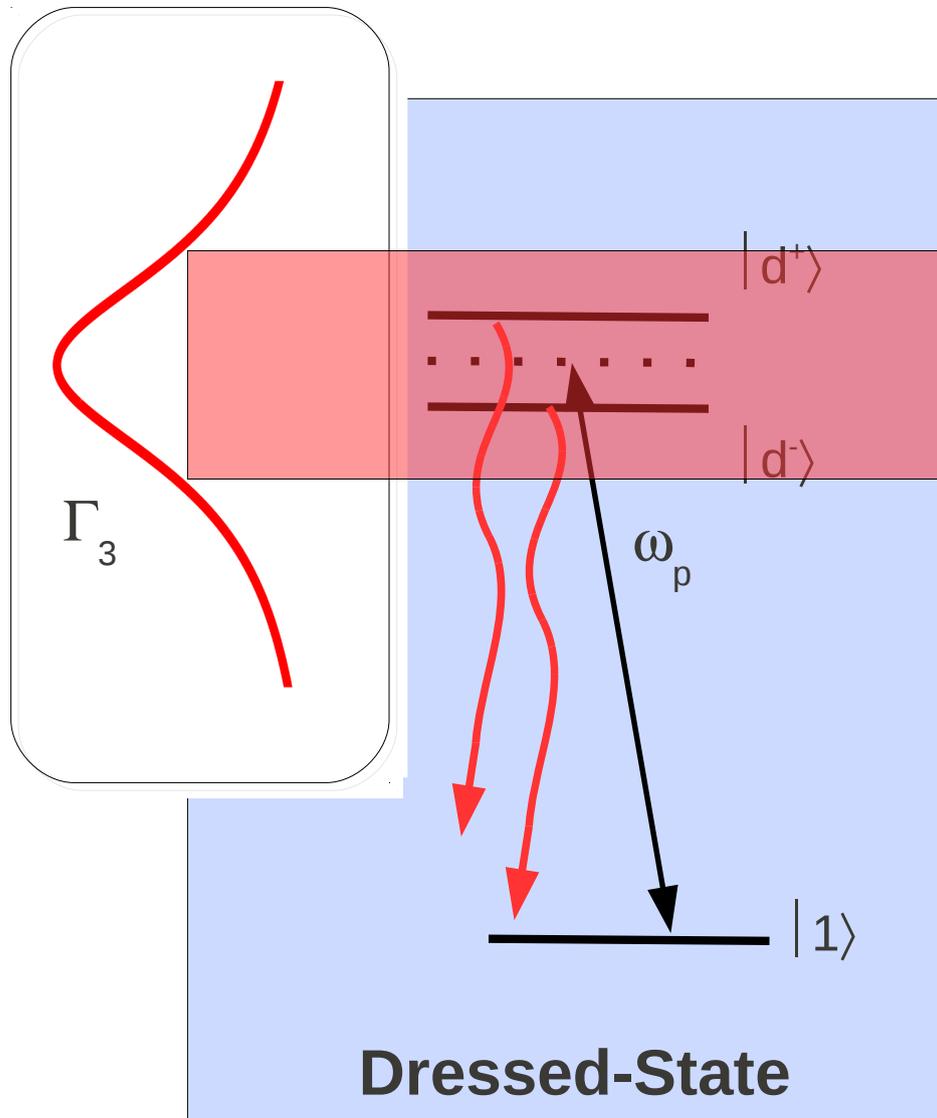
V -Schema

[aus: Fleischhauer et al. 2005]

Dressed States



Pfadinterferenz



- Anregung über $|d^+\rangle$ oder $|d^-\rangle$ äquivalent
- **Ununterscheidbarkeit**
 - **(destruktive) Interferenz** der Wahrscheinlichkeitsamplituden der Übergänge
 - **keine Streuung**

1. EIT: Boller-Experiment 1991

2. Theorie der EIT

- 3-Niveau-Schemata
- Anschauliche Erklärung
- **Zustandspopulation und Suszeptibilität**
- **Pulspropagation**

3. Langsames Licht: Hau-Experiment 1999

4. Zusammenfassung

2. Theorie: Dressed States

EIT/ Langsames Licht

Licht-Atom Wechselwirkungshamiltonian:

(semikl., RWA, keine Dissipation, rotierendes System

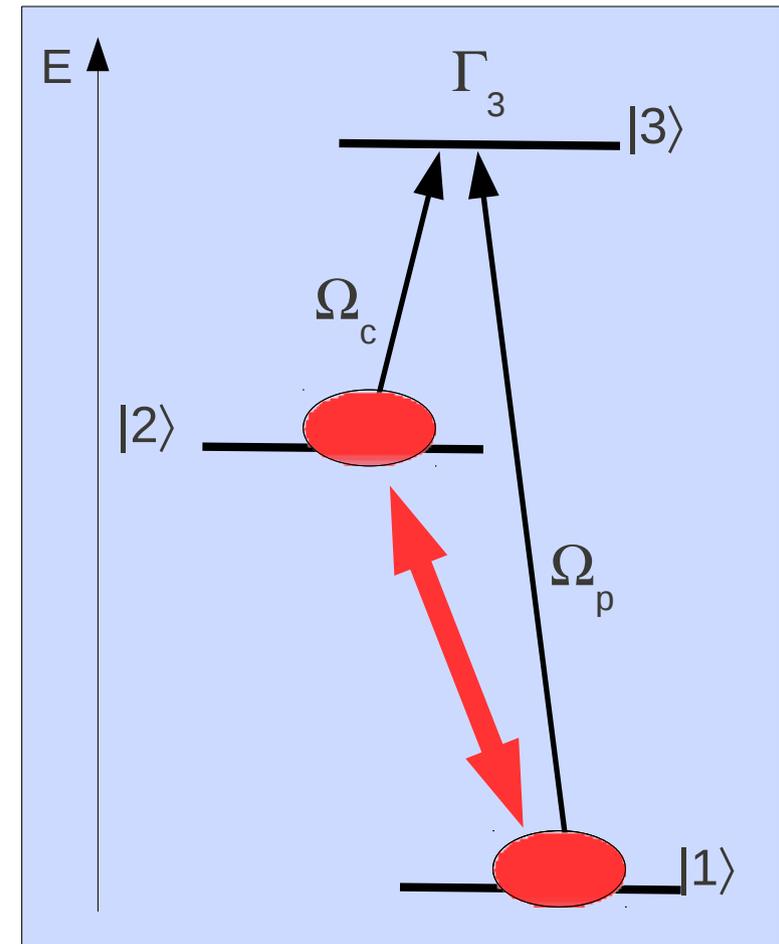
2-Photonen-Resonanz)

$$H_{\text{WW}} = -\hbar/2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Omega_p \\ 0 & 0 & \Omega_c \\ \Omega_p & \Omega_c & 0 \end{pmatrix}$$

Eigenzustand zur Energie $\lambda_0 = 0$:

$$|a_0\rangle = \frac{1}{N} (\Omega_c |1\rangle - \Omega_p |2\rangle) \quad N = \sqrt{\Omega_c^2 + \Omega_p^2}$$

→ kein Anteil von $|3\rangle$ → „**Dunkelzustand**“



Allgemeiner: Antwort des Systems auf **Lichtfeld**:

Dielektrische Suszeptibilität $\chi = \epsilon - 1$

$$P(\omega) = \epsilon_0 \chi(\omega) E(\omega)$$

(mit der Polarisation des Mediums P und der Permittivität ϵ)

Wie erhält man den Zusammenhang zwischen der **Zustandspopulation des Mediums** und P ?

Allgemeiner: Antwort des Systems auf **Lichtfeld**:

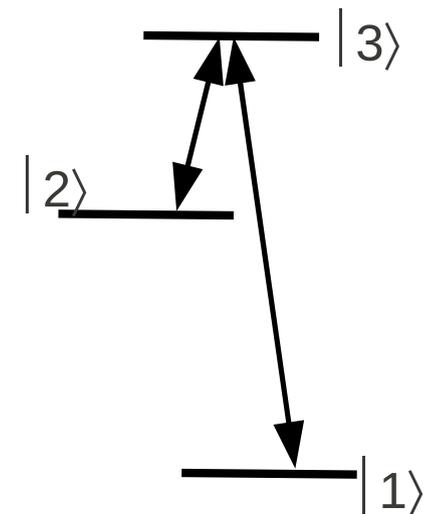
Dielektrische Suszeptibilität $\chi = \epsilon - 1$

$$P(\omega) = \epsilon_0 \chi(\omega) E(\omega) = \sum_i \langle e r_i \rangle / V = f(\rho_{23}, \rho_{13}, E) \quad \rho_{ij} = \langle i | \rho | j \rangle$$

(mit der Polarisation des Mediums P , der Permittivität ϵ und den Dichtematrixelementen ρ_{ij})

Wie erhält man den Zusammenhang zwischen der **Zustandspopulation des Mediums** und P ?

- via ρ_{ij} Verknüpfung mit Eigenzuständen von H_{ww}
(vgl. optische Bloch-Gl.)



- Einsetzen der ρ_{ij} (aus Diagonalisierung von H_{WW})
- Berücksichtigung von Zerfall von $|3\rangle$:

$$\chi_{\text{EIT}}^{(1)}(\Delta) = \frac{|\mu_{13}|^2 \rho}{\epsilon_0 \hbar} \left[\frac{4\Delta (|\Omega_c|^2 - 4\Delta^2)}{||\Omega_c|^2 - 4\Delta^2 + i2\Gamma_3\Delta|^2} + i \frac{8\Delta^2 \Gamma_3}{||\Omega_c|^2 - 4\Delta^2 + i2\Gamma_3\Delta|^2} \right]$$

Definitionen:

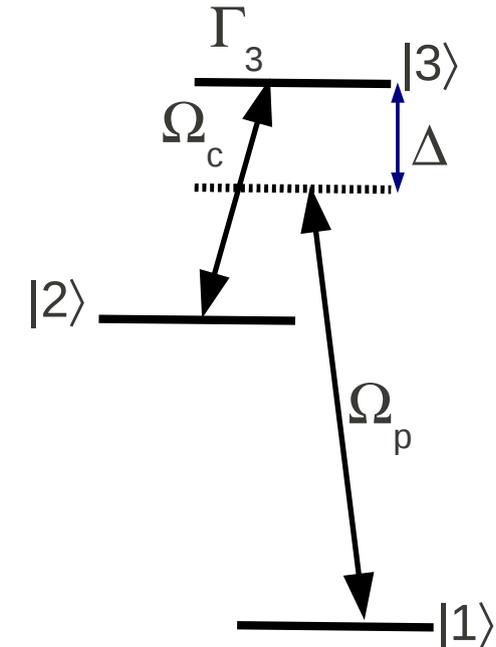
Δ = Probe-Verstimmung

ρ = Dichte des Mediums

μ_{13} = Dipolmatrixelement zwischen $|1\rangle$ und $|3\rangle$

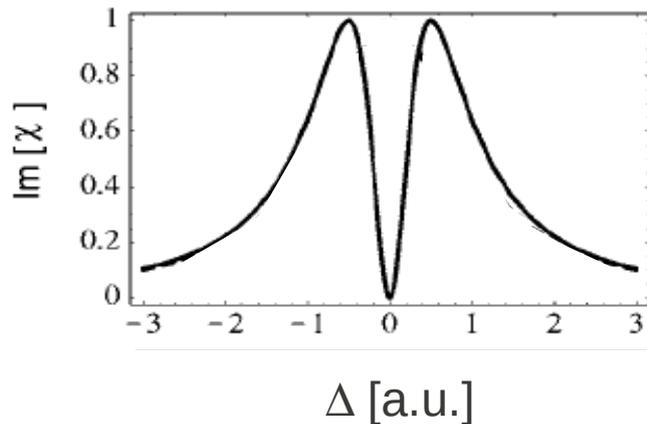
Γ_3 = Gesamtzerfallsrate aus $|3\rangle$

Vernachlässigt: **Dephasierung** von $|1\rangle$ und $|2\rangle$



Seminar: Atom trifft Photon

$$\chi_{EIT}^{(1)}(\Delta) \propto \left[\frac{4\Delta(|\Omega_c|^2 - 4\Delta^2)}{|\Omega_c|^2 - 4\Delta^2 + i2\Gamma_3\Delta} + i \frac{8\Delta^2\Gamma_3}{|\Omega_c|^2 - 4\Delta^2 + i2\Gamma_3\Delta} \right]$$

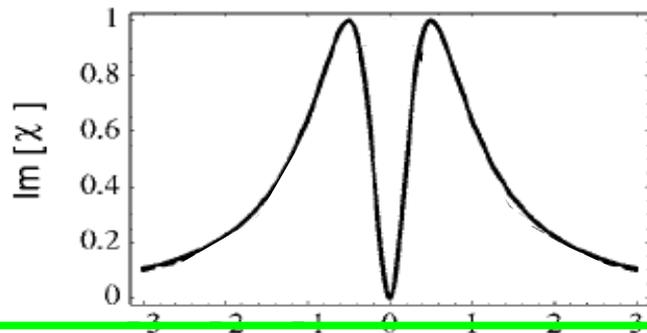


- **EIT – Fenster** in $\text{Im}[\chi]$
(vgl. Boller-Experiment)

- $\sim \frac{8\Delta^2\Gamma_3}{|\Omega_c|^4} + O(\Delta^4)$

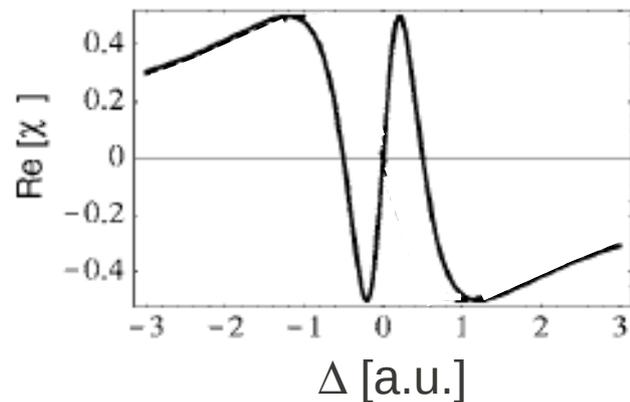
[nach: Fleischhauer et al. 2005]

$$\chi_{EIT}^{(1)}(\Delta) \propto \left[\frac{4\Delta(|\Omega_c|^2 - 4\Delta^2)}{|\Omega_c|^2 - 4\Delta^2 + i2\Gamma_3\Delta} + i \frac{8\Delta^2\Gamma_3}{|\Omega_c|^2 - 4\Delta^2 + i2\Gamma_3\Delta} \right]$$



- **EIT – Fenster** in $\text{Im}[\chi]$
(vgl. Boller-Experiment)

- $\sim \frac{8\Delta^2\Gamma_3}{|\Omega_c|^4} + O(\Delta^4)$



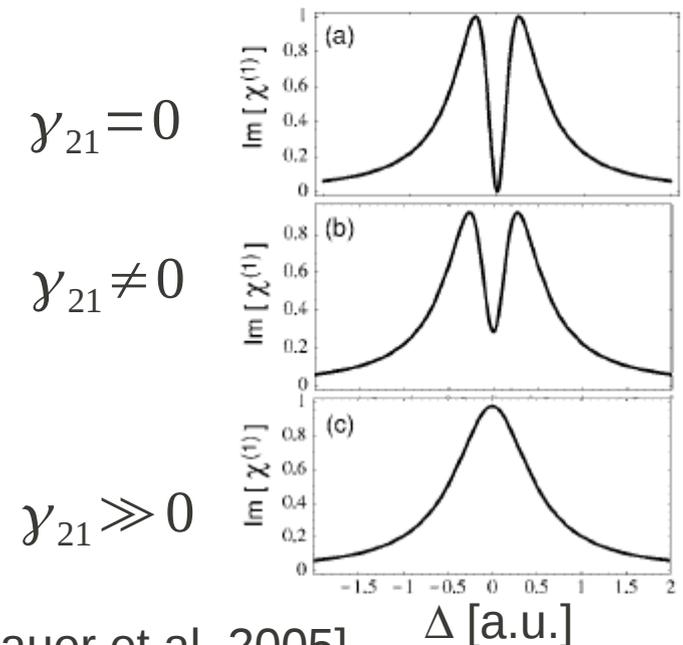
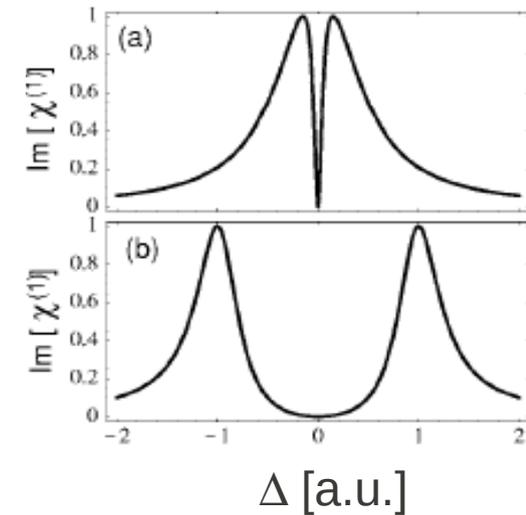
- **Starke lineare Dispersion** in $\text{Re}[\chi]$ ohne Absorption!

- $\sim \frac{2\Gamma_3\Delta}{|\Omega_c|^2} + O(\Delta^2)$

[nach: Fleischhauer et al. 2005]

2. Theorie: Grenzen für EIT

- Control Laser zu stark
→ Verlust der Ununterscheidbarkeit
→ „Autler-Townes Splitting“
- **Dephasierung** des Zustandes $|2\rangle$,
Verlust der Kohärenz durch:
 - Endliche **Lebensdauer**
 - **Stöße** mit Wand, untereinander
 - **Phasenfluktuationen** des Control-Lasers
(Linienverbreiterung)

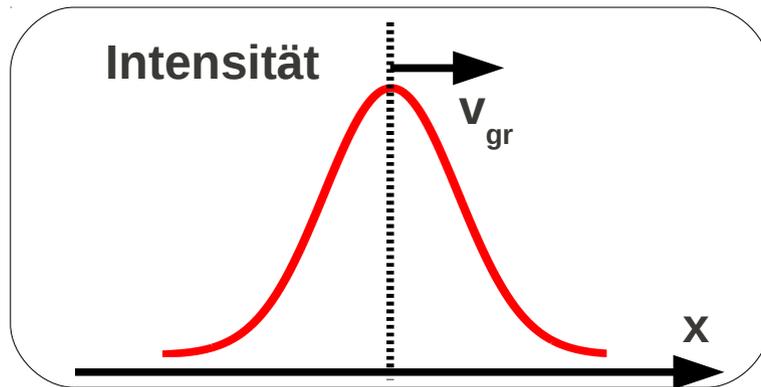


[aus: Fleischhauer et al. 2005]

Gruppengeschwindigkeit

$$v_{gr} = \left. \frac{d\omega_p}{dk_p} \right|_{[\Delta=0]} = \frac{c}{n + \omega_p (dn/d\omega_p)}$$

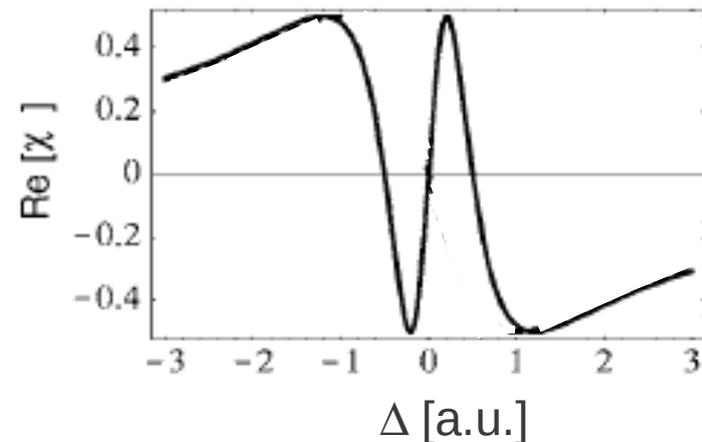
$$(n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{1 + \chi})$$



Realteil der Suszeptibilität:

$$\approx \frac{\hbar c \epsilon_0}{2\omega_p V} \frac{|\Omega_c|^2}{\rho |\mu_{13}|^2}$$

Langsames Licht



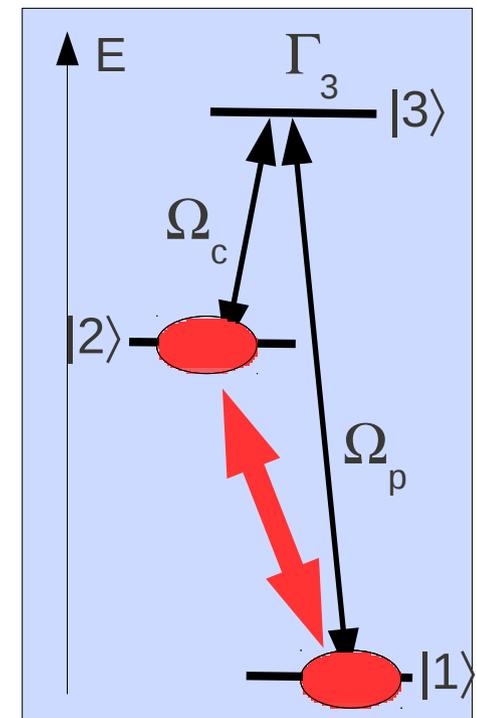
[nach: Fleischhauer et al. 2005]

2. Theorie: Anmerkungen

- kein vollständiges Stoppen möglich

$$v_{gr} \approx \frac{\hbar c \epsilon_0}{2 \omega_p V} \frac{|\Omega_c|^2}{\rho |\mu_{13}|^2}$$

- erfordert $\Omega_c = 0 \rightarrow$ verschwindende Transparenz
- Ausweg: zeitlich geändertes Ω_c
- **Abnahme des Lichtfeldes** mit Abnahme von v_{gr}
 \rightarrow Polariton/ Spin Anregung ($v_{gr} = 0$)
- **Formstabilität des Pulses** auf 2-Photonen-Resonanz
- **Kohärenter Prozess** \rightarrow Dephasierung schädlich (γ_{12})



Kohärenz zwischen
 $|1\rangle$ und $|2\rangle$

3. Langsames Licht

Experimentelle Realisationen:

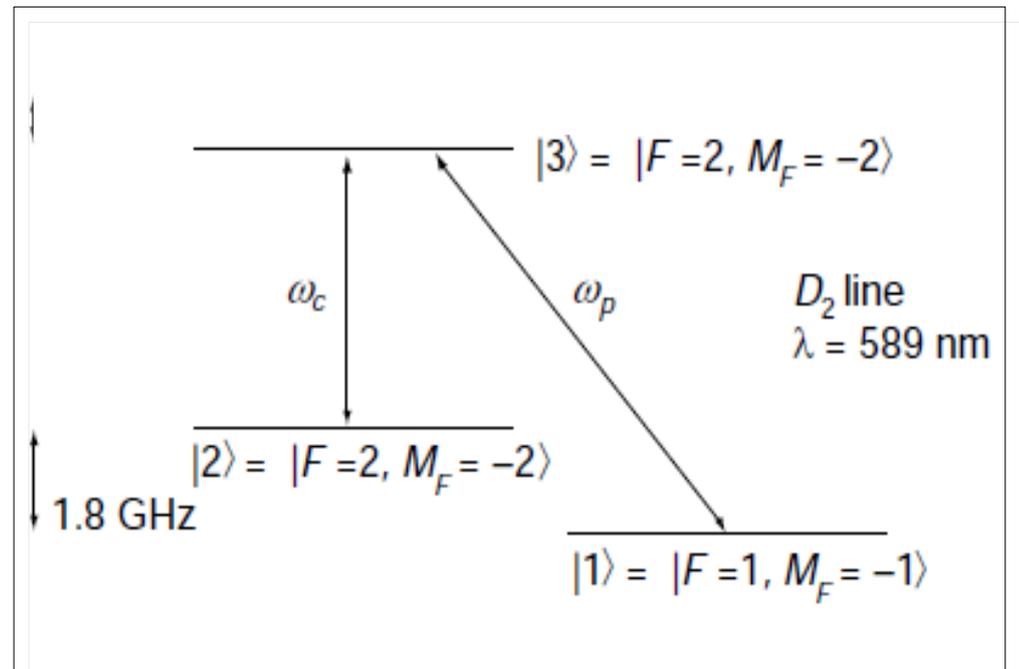
- Harris, in Blei-Dampf (1995): $v_{gr} = 1.81 * 10^6 m/s$
- Schmidt et al (1996): $v_{gr} = 1.50 * 10^5 m/s$
- Hau et al (1999): $v_{gr} = 17m/s$



[Nature 1999]

System:

- ultrakaltes Na – BEC:
 - hohe Dichte
 - geringe Dephasierung
 - keine Dopplerverbreiterung
- 3-Niveau System (D_2 -Linie)
- Schwacher Controlstrahl, gepulster Probe

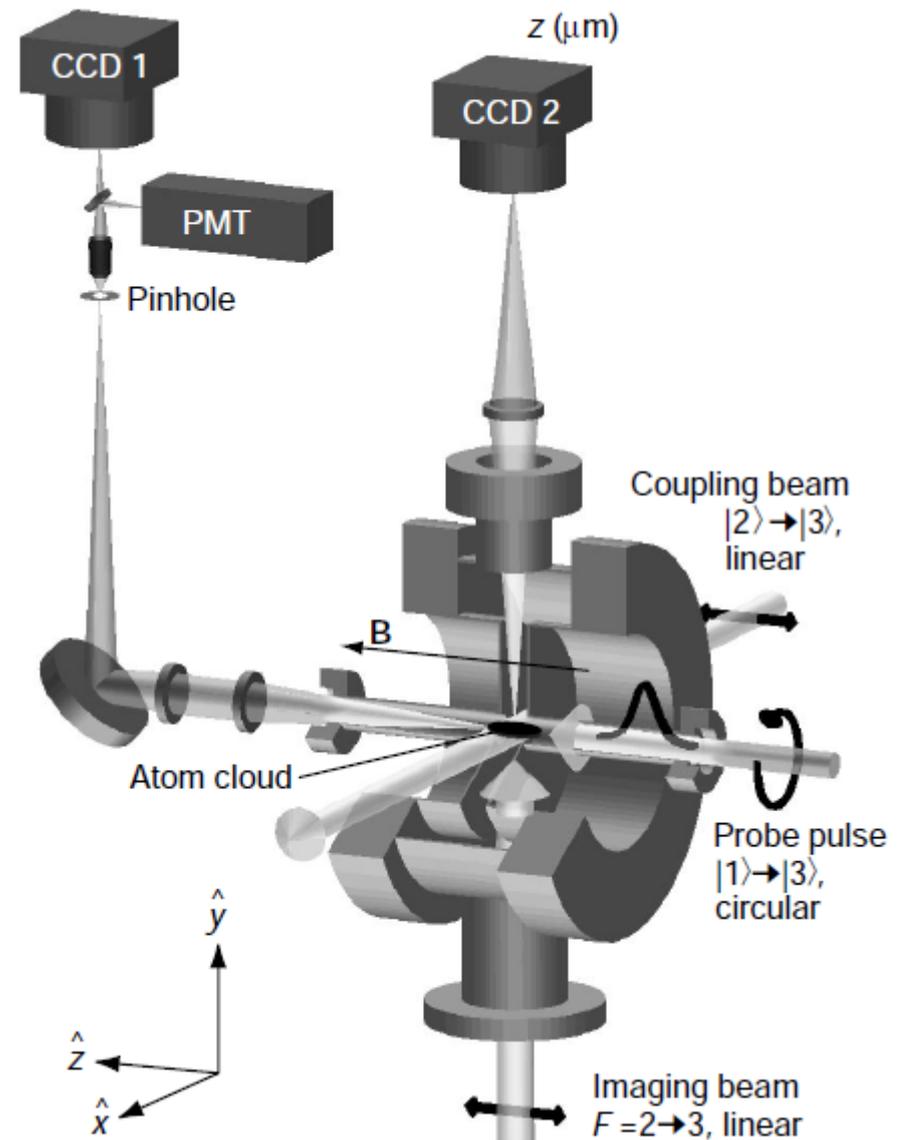


[nach: Hau et al 1999]

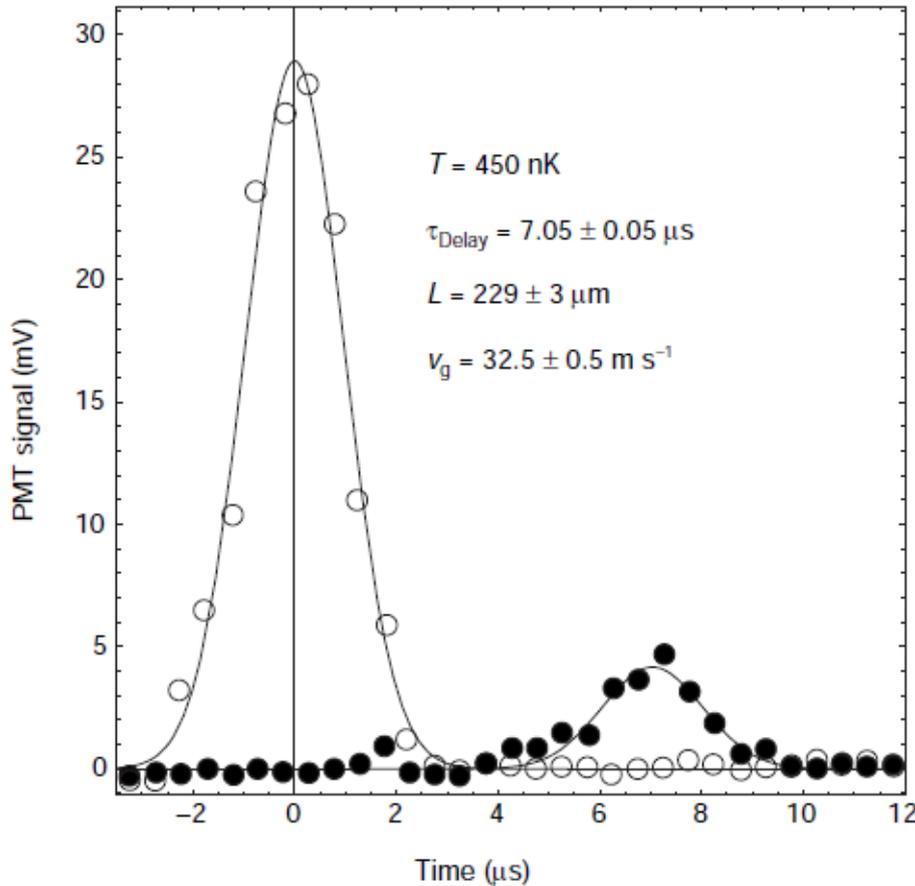
3. Langsames Licht: Hau-Experiment

System:

- ultrakaltes Na – BEC:
 - hohe Dichte
 - geringe Dephasierung
 - keine Dopplerverbreiterung
- 3-Niveau System (D_2 -Linie)
- Schwacher Controlstrahl, gepulster Probe



3. Langsames Licht: Hau-Experiment



[aus: Hau et al 1999]

$$\tau_{\text{delay}} = 7.05 \mu\text{s}$$

$$L = 229 \mu\text{m (Länge des BEC)}$$

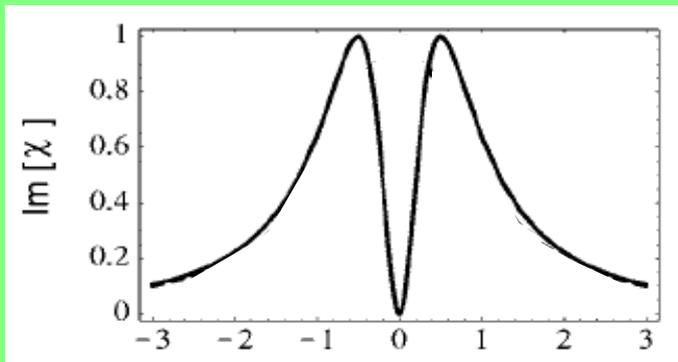
$$\rightarrow v_{\text{gr}} = 32.5 \text{ m/s}$$

**Light speed reduction
to 17 metres per second
in an ultracold atomic gas**

Lene Vestergaard Hau^{*†}, S. E. Harris[‡], Zachary Dutton^{*†}
& Cyrus H. Behroozi^{*§}

- Wo: **3-Niveau-Systeme, optisch dichte** (gasförmige) Medien
- Was: Materie-induzierte Licht-Licht WW
- Wie: Quantenmechanische **Interferenz** in Atom-Licht-WW $\rightarrow \chi$

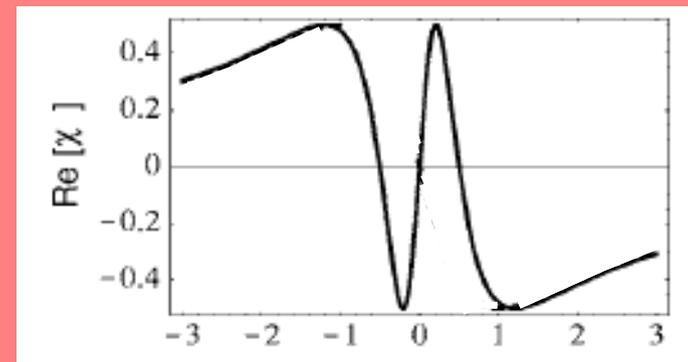
Im(χ)



Δ [a.u.]

- **Transmissionsfenster**
- Anwendung:
Optischer Transistor, NLO

Re(χ)



Δ [a.u.]

- **Lineare Dispersion**
- Verlangsamung von Licht
Anwendung: **Lichtspeicher**

- Fleischhauer, Imamoglu, Marangos: Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media; Rev. Mod. Phys. Vol. 77, No. 2 (2005)
- Harris, S.E.: Electromagnetically Induced Transparency: Physics Today 50, p.36-42 (1997)
- Bollinger, Imamoglu, Harris: Observation of Electromagnetically Induced Transparency: Phys. Rev. Lett. Vol. 66, 20, 1991
- Hau, Harris, Dutton, Behroozi: Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas; Nature Vol. 397, p.594-598 (1999)
- Metcalf, van der Straten: Laser Cooling and Trapping; Springer New York, 1999
- Bild Kontinuumserzeugung:
<http://www.imperial.ac.uk/research/photronics/research/topics/femto/groupmilestones.html> (03.07.2011)