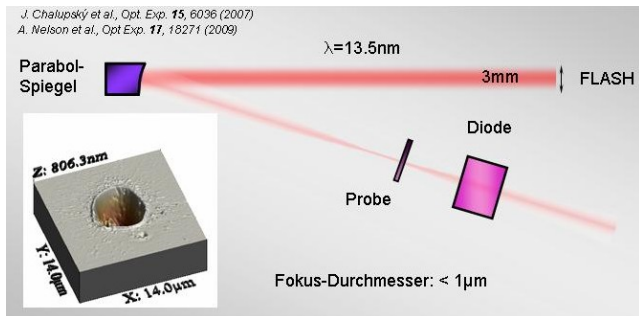


Nano(cluster)plasmen

- Neben der Rumpfniveauspektroskopie an Clustern bietet FLASH die Möglichkeit Cluster unter extremen Bedingungen im Feld eines intensiven Röntgenpulses zu studieren \rightarrow (Nano)Plasmaphysik
- Fokussierung des FEL-Lichtes erzeugt Intensitäten in der Größenordnung $\sim 10^{17} \text{ W/cm}^2$



- Aber warum ist das eigentlich so interessant ?

Nano(cluster)plasmen

- Plasma: der sogenannte 4. Aggregatzustand von Materie
- Im Plasma sind die Atome ionisiert; es gibt positiv geladene Ionen und quasifreie Elektronen
- 99% des sichtbaren Universums sind im Plasmazustand



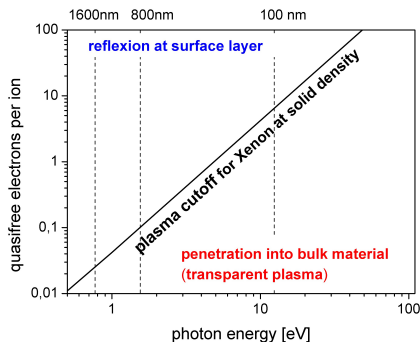
- Intensive Laserstrahlung insbesondere FLASH erlaubt diesen Materiezustand im Labor zu erzeugen und im Detail zu untersuchen

Nano(cluster)plasmen

- Eindringtiefe δ eines Laserfeldes ins Plasma:

$$\delta = \frac{c}{\omega_p} \quad \text{mit} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

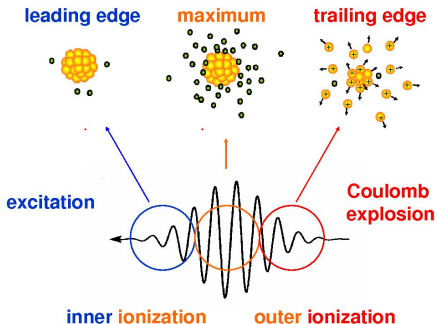
und numerisch $\delta = 5.31 \times 10^5 \frac{1}{\sqrt{n_e / \text{cm}^{-3}}} \text{ cm}.$



- FLASH erzeugt "homogene" Plasmen bei konstantem Volumen (*isochoric heating*)

Nano(cluster)plasmen

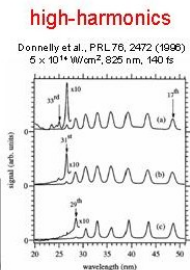
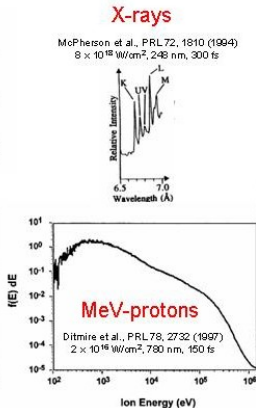
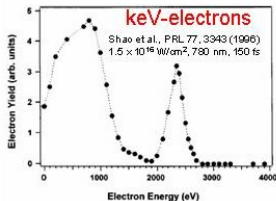
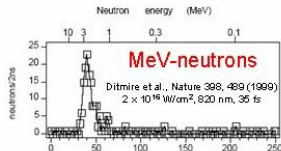
- Laser-Cluster Wechselwirkung verläuft in drei Phasen: (a) Energiedeposition, (b) Ionisation und (c) Desintegration



- Energetik und Dynamik hängen von den spezifischen Eigenschaften des Laserfeldes und der Cluster ab (Clustergröße, Laserintensität, Photonenenergie,...)

Nano(cluster)plasmen

- Frage: Warum sind Cluster in starken Laserfeldern interessant ?



Antwort: Es lassen sich hochenergetische Teilchen erzeugen !

Physik in starken Laserfeldern

- Wie stark sind schwache Felder oder wie schwach sind starke Felder ?
- Atomare Einheit der elektrischen Feldstärke E_0 :

$$E_{0,C} = \frac{e_0}{4\pi\epsilon_0 a_0^2} \approx 5.1 \times 10^9 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \quad (1)$$

(Coulombfeld im H-atom im Abstand a_0 , Bohrscher Radius)

- Elektrische Feldamplitude eines Laserpulses der Intensität I :

$$E_{0,L} = \sqrt{\frac{2I}{\epsilon_0 c}} \quad (2)$$

- Für ein Wasserstoffatom im Grundzustand ist ein Laserfeld stark wenn: $E_{0,L} \geq E_{0,C}$

$$\text{Daraus folgt: } I \geq 3.5 \times 10^{16} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \quad (3)$$

Physik in starken Laserfeldern

- Beschreibung der atomaren Wechselwirkung im Allgemeinen in der *single active electron (SAE) Näherung*
- Neben dem Ionisationspotential I_p und der Photonenenergie $\hbar\omega$ spielt das ponderomotive Potential U_p eine wesentliche Rolle bei der Charakterisierung der induzierten Prozesse.

$$U_p = \frac{e_0^2}{2m_e\epsilon_0 c \omega^2} I \propto \lambda^2 I \quad (4)$$

und numerisch $U_p = 9.34 \times 10^{-20} (\lambda/\text{nm})^2 I / (\text{W cm}^{-2}) \text{ eV}$

- Die räumliche Charakterisierung der Stärke des Laserfeldes erfolgt durch die Amplitude der Elektronenbewegung

$$x_0 = \frac{e_0 E_{0,L}}{m_e \omega^2} \quad (5)$$

und numerisch $x_0 = 1.36 \times 10^{-7} (\lambda/\text{nm})^2 \sqrt{I / (10^{12} \text{ W cm}^{-2})} \text{ nm}$

Physik in starken Laserfeldern

- Ist eine Lösung der Schrödingergleichung (Atom+Laserfeld) im Rahmen der Störungstheorie möglich ?
- Mittels des Keldysh Parameter γ lässt sich störungstheoretische Multi-Photonen-Ionisation ($\gamma \gg 1$) von nicht-störungstheoretischer Tunnel-Ionisation ($\gamma \leq 1$) unterscheiden.

$$\gamma = \sqrt{\frac{I_p}{2U_p}} = \sqrt{\frac{I_p \epsilon_0 m_e c \omega^2}{e^2 I}} \propto \frac{t_{ZR}}{T} \quad (6)$$

und numerisch
$$\gamma = 2.31 \times 10^9 \sqrt{\frac{I_p / \text{eV}}{(I / \text{W cm}^{-2}) (\lambda / \text{nm})^2}}$$

- γ ist proportional dem Verhältnis von Tunnelzeit t_{ZR} des Elektrons durch die Laser-induzierte Potentialbarriere und der Laserperiode $T = 2\pi/\omega$.

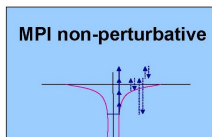
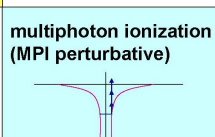
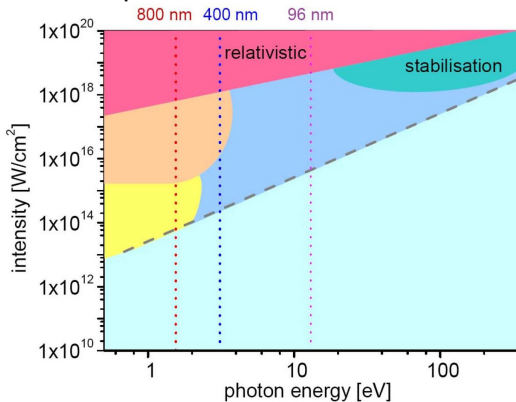
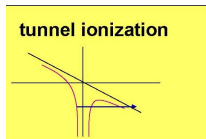
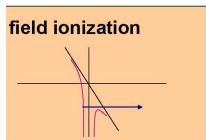
Physik in starken Laserfeldern

- Keldysh Parameter γ , *Quiver-Amplitude* x_0 und ponderomotives Potential U_p für verschiedene Laserwellenlängen und Intensitäten

Wellenlänge		Intensität		
		$10^{14} \text{ W cm}^{-2}$	$10^{16} \text{ W cm}^{-2}$	$10^{18} \text{ W cm}^{-2}$
$\lambda = 780 \text{ nm}$	γ	1.55	0.15	0.015
	U_p	5.67eV	567eV	56.7keV
	x_0	8.28Å	82.8Å	828Å
$\lambda = 100 \text{ nm}$	γ	12.1	1.21	0.121
	U_p	93meV	9.3eV	932eV
	x_0	0.136Å	1.36Å	13.6Å
$\lambda = 3.5 \text{ nm}$	γ	345	34.5	3.45
	U_p	0.1meV	0.01eV	1.1eV
	x_0	0.0002Å	0.002Å	0.02

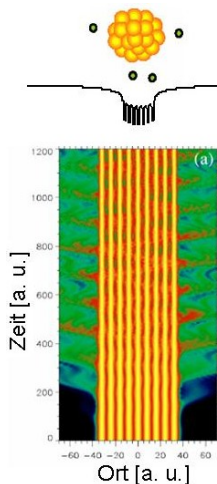
Physik in starken Laserfeldern

- Fundamentale Ionisationsprozesse in Atomen



Clusterphysik in starken optischen Laserfeldern

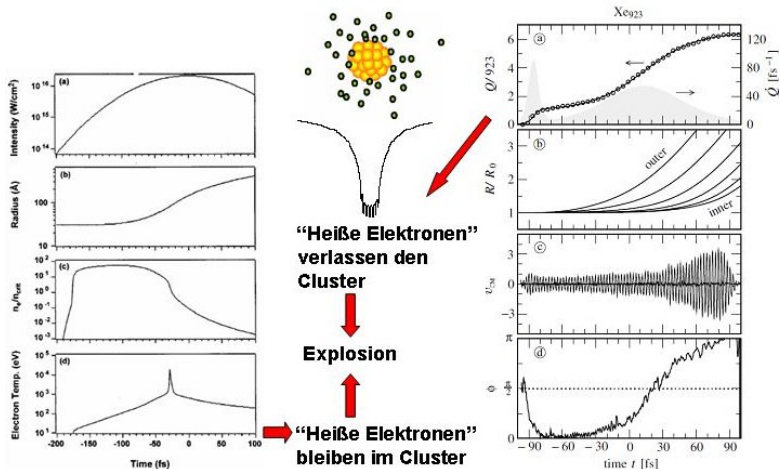
- Ionisation in der Anstiegsflanke des Laserpulses durch:



- **Innere und äußere Feldionisation**
 → *ionization ignition* als Effekt der kombinierten Felder (Laser + Cluster)
 PRA 55, 1182 (1997)
- **Kohärente Elektronenbewegung**
 → Stoßionisation der Elektronen
 JPB 27, 4391 (1994)
 → *Dynamical ionization ignition*
 berücksichtigt zusätzlich die zeitabhängige Elektronenverteilung
 PRA 68, 033201 (2003)

Clusterphysik in starken optischen Laserfeldern

- Absorption durch inelastische Stöße (*inverse Bremsstrahlung*)
 Nanoplasma ($N > 10^4$) gedämpfter Oszillator ($N < 10^3$)
 PRA 57, 369 (1998) PRL 91, 223401 (2003)



Clusterphysik in starken optischen Laserfeldern

- Dynamik der Clusterexpansion

Elektronendruck (hydrodynamisch)

Heiße Elektronen expandieren
und ziehen die Ionen mit

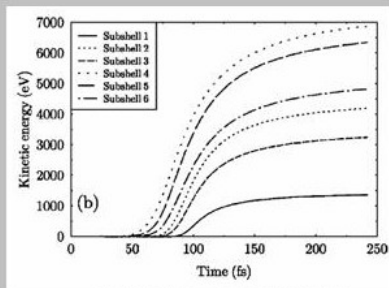
$$P_H = n_e k T_e \propto Q$$

- Cluster Explosion verläuft schrittweise
- Ionen in äußeren Schalen werden früher ionisiert und effizienter beschleunigt

Coulombdruck

Abstoßung hochgeladener Elektronen

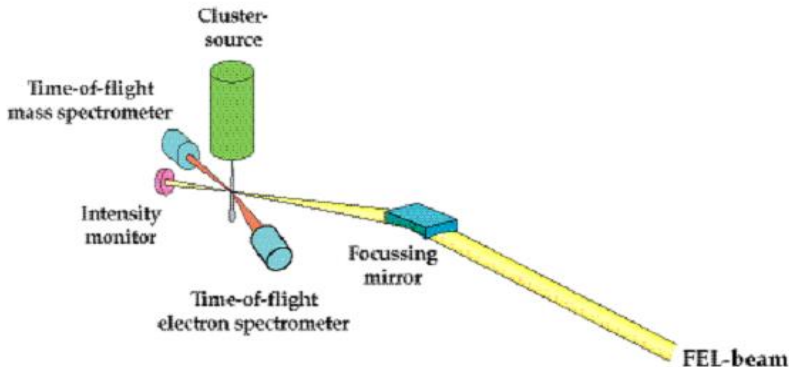
$$P_C = Q^2 e_0^2 / (8\pi r^4) \propto Q^2$$



PRL 72, 1810 (1994)

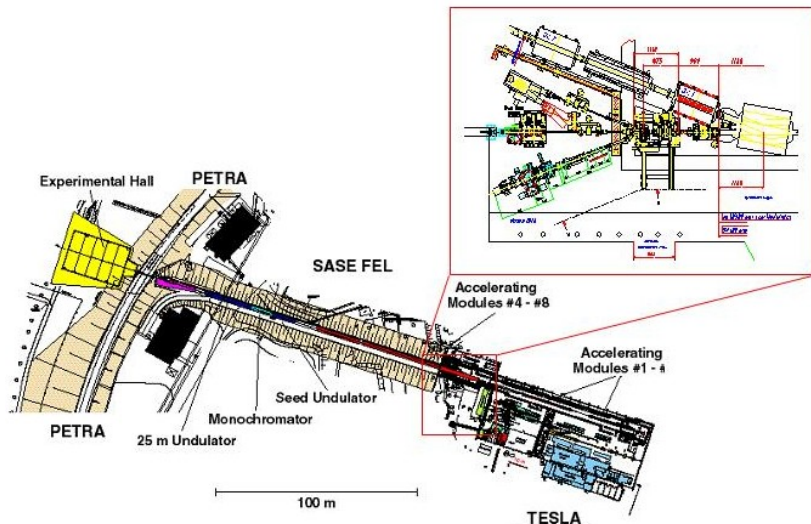
Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen

- Welche Modelle der Laser-Cluster Wechselwirkung aus dem optischen Spektralbereich lassen sich übertragen ?
- Gibt es "neue Physik" bei kurzen Laserwellenlängen ?
- Antwort: FEL-Clusterexperimente 2002-2009 !
($\lambda=100, 32$ und 13.5 nm)



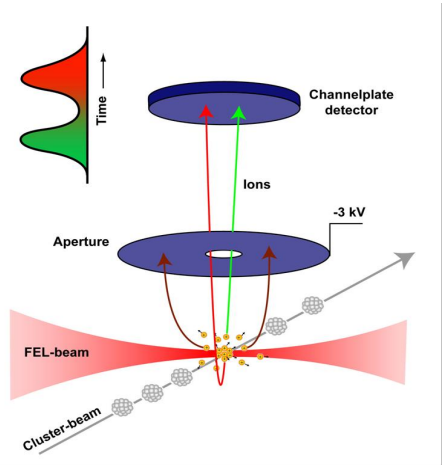
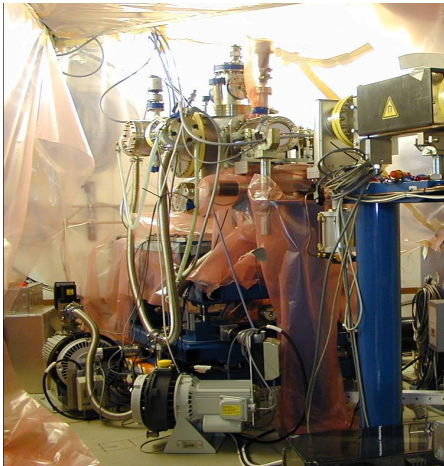
Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)

- Experiment im FLASH-Tunnel 2002

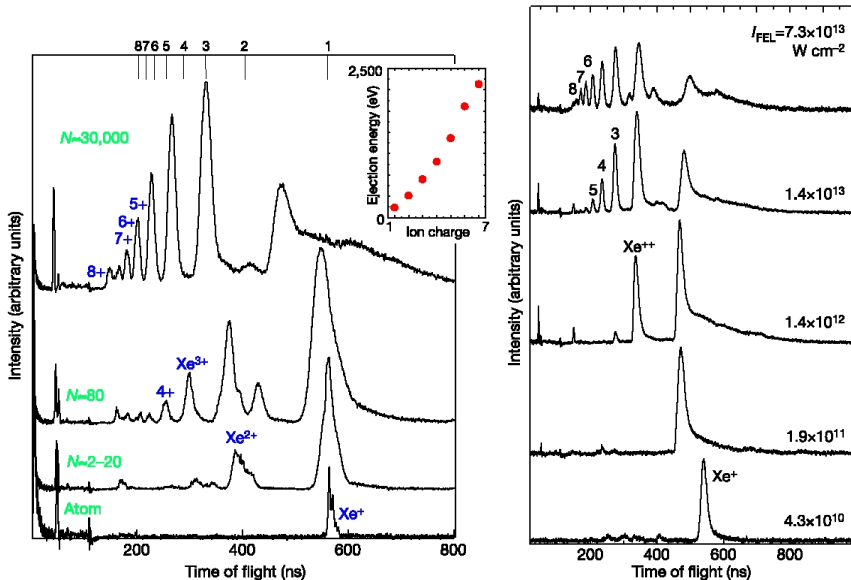


Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)

- Experimenteller Aufbau und Ionendetektor

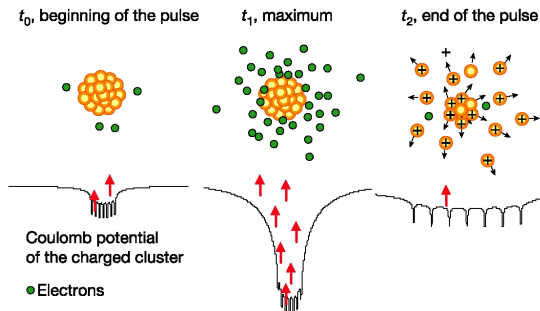


Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)



Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)

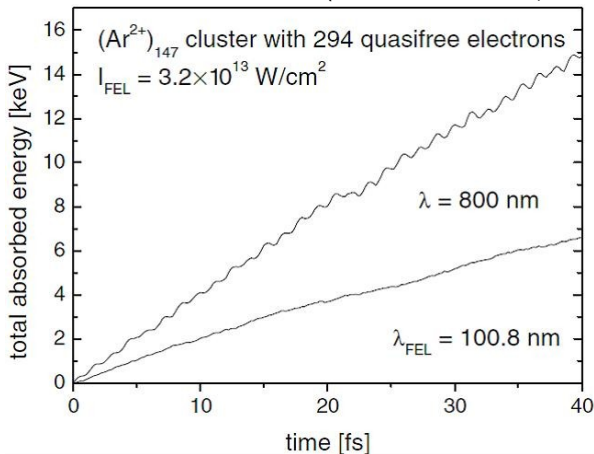
- Cluster wird durch FEL Photonen in einer Coulombexplosion vollständig zerstört (Nature 420, 482 (2002))
- mittlere Ladung pro Atom: $\bar{z} = 3$
- hohe kinetische Energien der Ionen (keV)
- mittlere Absorption pro Atom: $\bar{E} = 550\text{eV}$ (≈ 43 FEL Photonen)



- Was ist der Absorptions- und Ionisationsmechanismus ?

Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)

- "Standard" *inverse Bremsstrahlung* erklärt nicht exp. Ergebnisse
Absorption ist Faktor 10 zu klein ! (PRL 92, 143401 (2004))



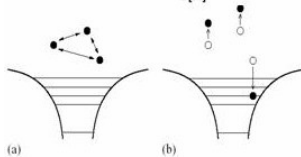
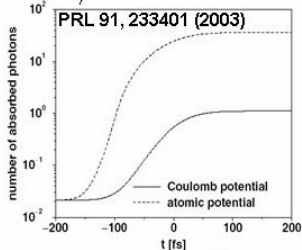
- Was ist der Absorptions- und Ionisationsmechanismus ?

Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)

- Absorptionsmodelle der letzten Jahre:

“Inverse Bremsstrahlung” mit realistischem Atompotential

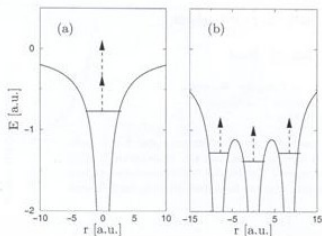
$$V_i(r) = -\frac{1}{r} \{i + [Z-i] \exp(-\alpha r)\} \exp(-r/\lambda_D)$$



Absenkung der Potentialbarriere durch Nachbarionen

PRL 93, 043402 (2004)

→ innere Ionization bis Xe^{7+}



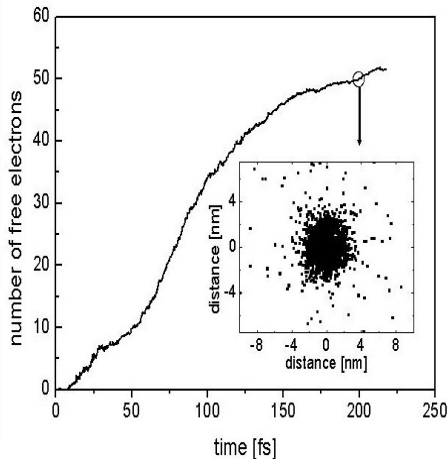
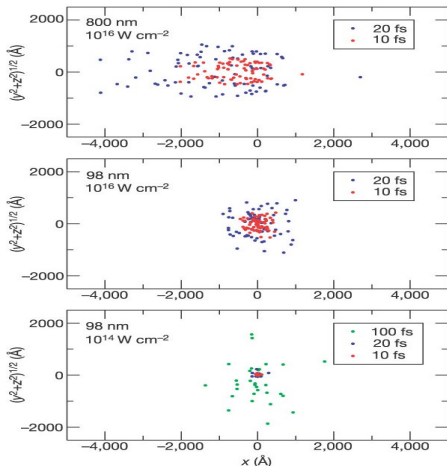
Vielteilchen Rekombination

J. Phys. B 38, 3029 (2005)

→ **Absorption durch Rydberg-Zustände**

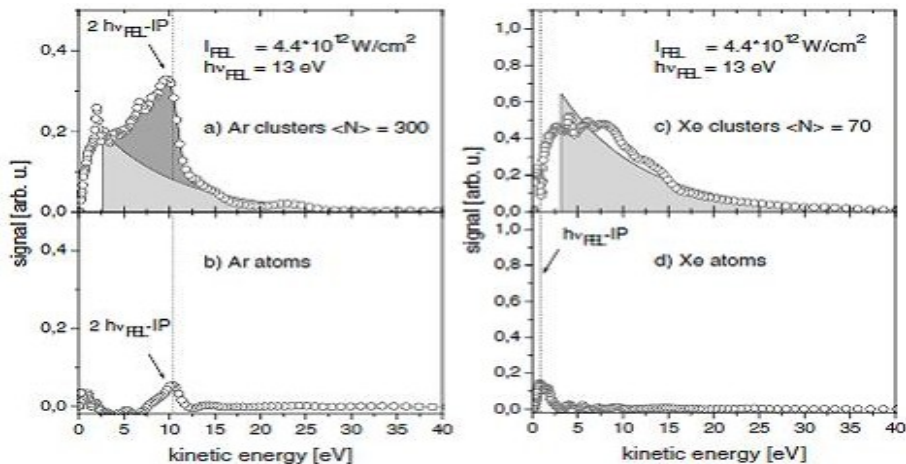
Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)

- Ionisation: thermo-elektronische Emission (PRL 95, 063402 (2005))
verzögert, isotrop,



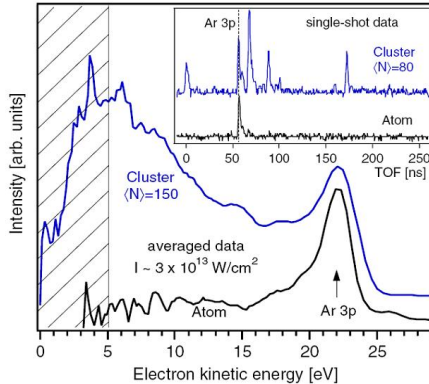
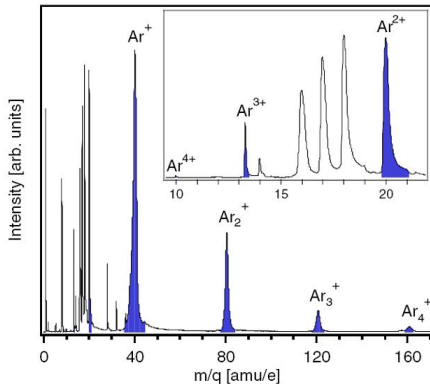
Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (100nm)

- Ionisation: thermo-elektronische Emission (PRL 95, 063402 (2005))
verzögert, isotrop, thermalisiert und niederenergetisch



Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (32nm)

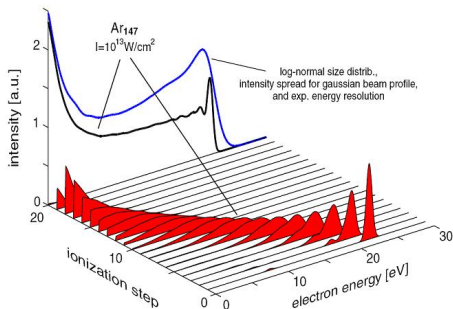
- Ionen- und Elektronenspektren von Ar_{150} -Clustern @ $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$



- $E_{kin}(q)$ ist klein , $q_{max} = 4$ und Erzeugung großer Fragmente
 \Rightarrow geringe Absorption !
- einzelne 1-Photon Photoabsorptionsprozesse

Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (32nm)

- Simulation der Photoelektronenspektren:



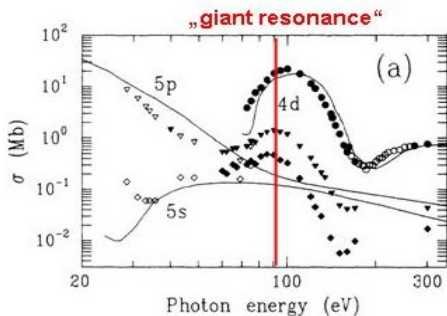
$$E_k = h\nu - I_p - \frac{e_0^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i \neq j} \frac{q_i}{r_{ij}} \quad (7)$$

- kein Heizen des Plasmas durch inverse Bremsstrahlung !
PRL 100, 133401 (2008)

Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (13nm)

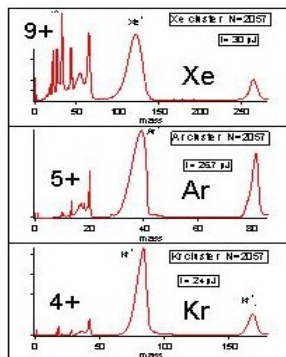
- Anregung von internen Elektronenschalen

Elektronische Struktur von Xenon



- Wirkungsquerschnitt für die Photoionisation ist stark erhöht!

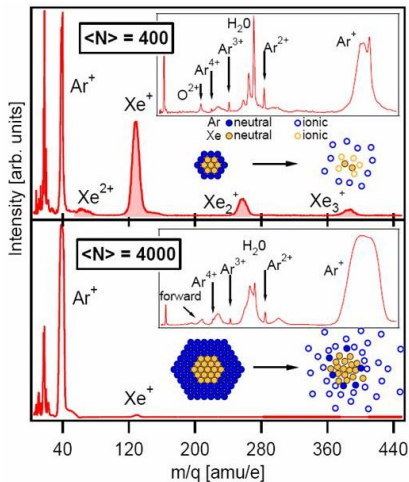
Elementabhängigkeit



Querschnitte: Xe > 25 Mb
 @ 90eV Kr ~ 0.5 Mb
 Ar ~ 0.2 Mb

Clusterphysik mit intensiven XUV FEL-Pulsen (13nm)

- Anregung von dotierten (*core-shell*) Clustern



- Ionisation des eingelagerten Clusters wird unterdrückt !