



# Jony molekularne w pułapce Paula

Kraków 10.06.2016



**AARHUS UNIVERSITY**

Badania prowadzone na Uniwersytecie w Aarhus (Dania)

Łukasz Kłosowski

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Krajowe Laboratorium FAMO

# Pułapkowanie jonów – motywacja





## Nagroda Nobla 1989



Norman F.  
Ramsey



Hans G.  
Dehmelt



Wolfgang  
Paul

"for the invention of the separated oscillatory fields method and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks"

"for the development of the ion trap technique"

## Nagroda Nobla 2012



David J.  
Wineland

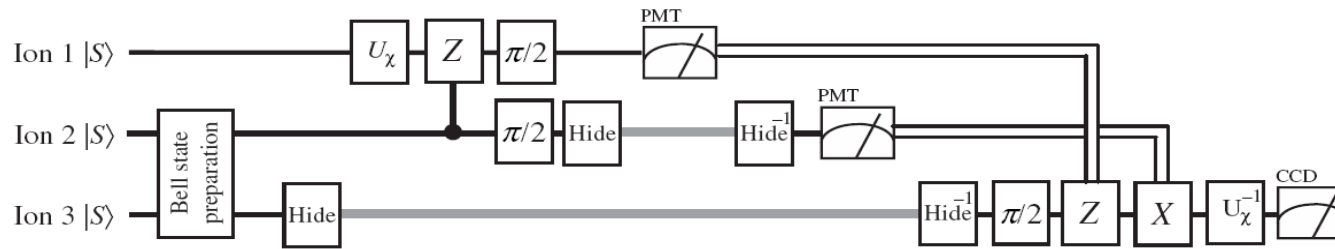


Serge  
Haroche

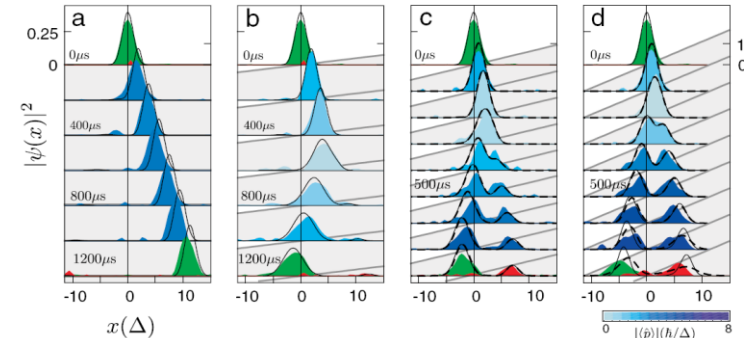
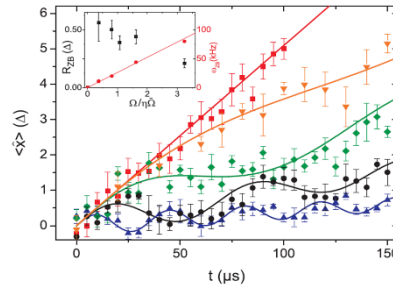
„for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems”

# Przykłady eksperymentów z jonami atomowymi w pułapkach

- Teleportacja kwantowa



- Symulacje kwantowe



- Jon jako atomowy wzorzec częstotliwości

## Observation of the $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ Clock Transition in $^{27}\text{Al}^+$

T. Rosenband,<sup>1,\*</sup> P. O. Schmidt,<sup>1,†</sup> D. B. Hume,<sup>1</sup> W. M. Itano,<sup>1</sup> T. M. Fortier,<sup>2</sup> J. E. Stalnaker,<sup>1</sup> K. Kim,<sup>1,‡</sup> S. A. Diddams,<sup>1</sup> J. C. J. Koelemeij,<sup>1,§</sup> J. C. Bergquist,<sup>1</sup> and D. J. Wineland<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305, USA

<sup>2</sup>P-23 Physics Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

(Received 6 March 2007; published 31 May 2007)

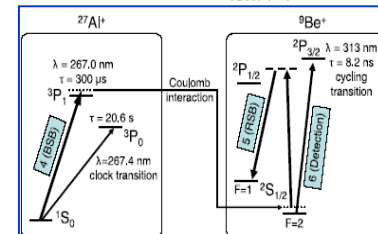


FIG. 1 (color online). Transfer of the  $^{27}\text{Al}^+$  clock state to  $^9\text{Be}^+$  for detection. Quantum state transfer proceeds according to numbers 4, 5, and 6 in shaded boxes, which denote corresponding steps in the text. Dotted lines denote the first vibrational excitation of the in-phase axial mode. The dashed line represents the virtual level of the  $^9\text{Be}^+$  stimulated Raman transition.

**Table 4.0-1**  
**The Mid-Level Quantum Computation Roadmap: Promise Criteria**

QC Approach	The DiVincenzo Criteria							
	Quantum Computation					[Grey Box]	QC Networkability	
	#1	#2	#3	#4	#5		#6	#7
NMR						[Grey Box]		
Trapped Ion						[Grey Box]		
Neutral Atom						[Grey Box]		
Cavity QED						[Grey Box]		
Optical						[Grey Box]		
Solid State						[Grey Box]		
Superconducting						[Grey Box]		
Unique Qubits	This field is so diverse that it is not feasible to label the criteria with "Promise" symbols.							

- Legend:
- = a potentially viable approach has achieved sufficient proof of principle
  - = a potentially viable approach has been proposed, but there has not been sufficient proof of principle
  - = no viable approach is known

The column numbers correspond to the following QC criteria:

- #1. A scalable physical system with well-characterized qubits.
- #2. The ability to initialize the state of the qubits to a simple fiducial state.
- #3. Long (relative) decoherence times, much longer than the gate-operation time.
- #4. A universal set of quantum gates.
- #5. A qubit-specific measurement capability.
- #6. The ability to interconvert stationary and flying qubits.
- #7. The ability to faithfully transmit flying qubits between specified locations.

Figure 4.1: Status of quantum computing approaches according to the ARDA roadmap (2004).

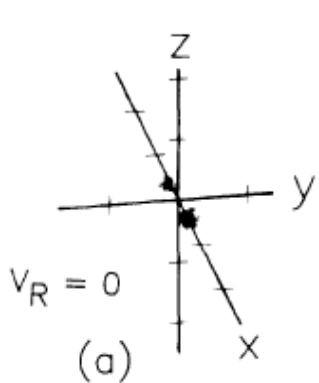
# Jony molekularne a jony atomowe

- Więcej parametrów może być kontrolowanych z zewnątrz (stany oscylacyjne i rotacyjne)
- Z drugiej strony – trudności doświadczalne związane bardziej złożoną strukturą energetyczną jonu
- Nowe możliwości zastosowań
- Nowe gałęzie badań:
  - Chemia pojedynczych atomów i cząsteczek,
  - Spektroskopia pojedynczych cząsteczek,
  - Nowe eksperymenty z antymaterią,
  - ...
- ...

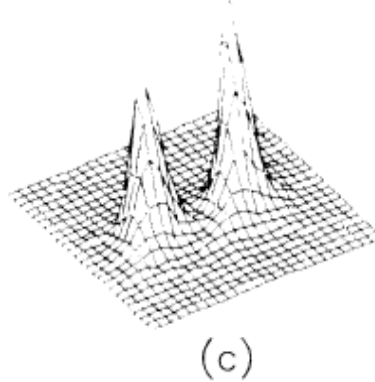
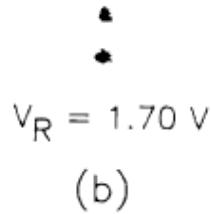
# Eksperymenty z jonami molekularnymi w pułapkach

- Jony badane przez różne grupy:  $\text{MgH}^+$ ,  $\text{BaCl}^+$ ,  $\text{BH}^+$ ,  $\text{OH}^+$ ,  $\text{FH}^+$ , anti- $\text{H}_2^-$  (w planach), .....
- Spektroskopia małych zespołów jonów i pojedynczych jonów
- Badania nad antymaterią (antywodór cząsteczkowy)
- Chemia pojedynczych atomów i cząsteczek
- Chłodzenie stanów wewnętrznych cząsteczki, spektroskopia tych stanów, potencjalne zastosowania schłodzonych jonów
- ...

# Pierwsza obserwacja jonu molekularnego



2 ions



We also observed clusters where an ion apparently occupied a normal cluster position but did not fluoresce. This “phantom ion,” which may have been  $^{199}\text{Hg}^+$ , or perhaps an impurity ion like  $\text{HgOH}^+$ , switched positions with  $^{198}\text{Hg}^+$  ions of the cluster if the cooling was weak.

3 ions



$V_R = 0$   
(d)



$V_R = 1.34 \text{ V}$   
(e)



$V_R = 1.69 \text{ V}$   
(f)

4 ions



$V_R = 0$   
(g)



$V_R = 1.59 \text{ V}$   
(h)

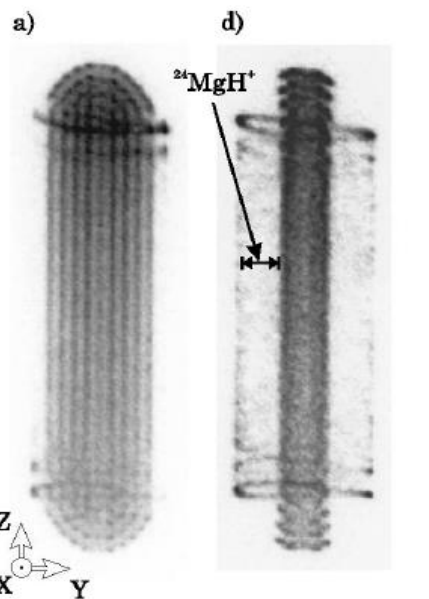


$V_R = 1.94 \text{ V}$   
(i)

D. Wineland *et al.* Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 2935-2938



# Produkcja jonów molekularnych w reakcjach z jonami atomowymi



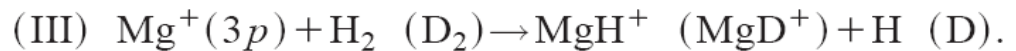
If the cooling lasers are switched off during the presence of the reacting gas, the  $\text{Mg}^+$  ions will be in the  $3s\ ^2S_{1/2}$  state, and only the following reaction (I) is energetically allowed [19,20]:



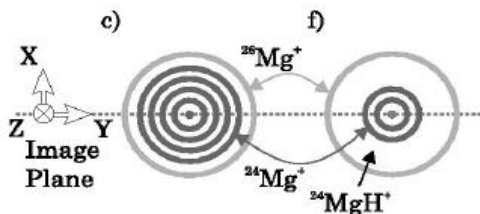
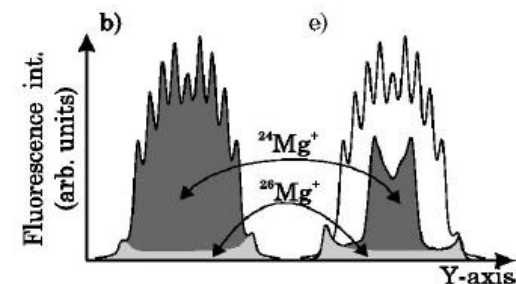
When the  $\text{Mg}^+$  ions are laser excited to the  $3p\ ^2P_{3/2}$  state, the following reactions are energetically possible [19–21]:



and

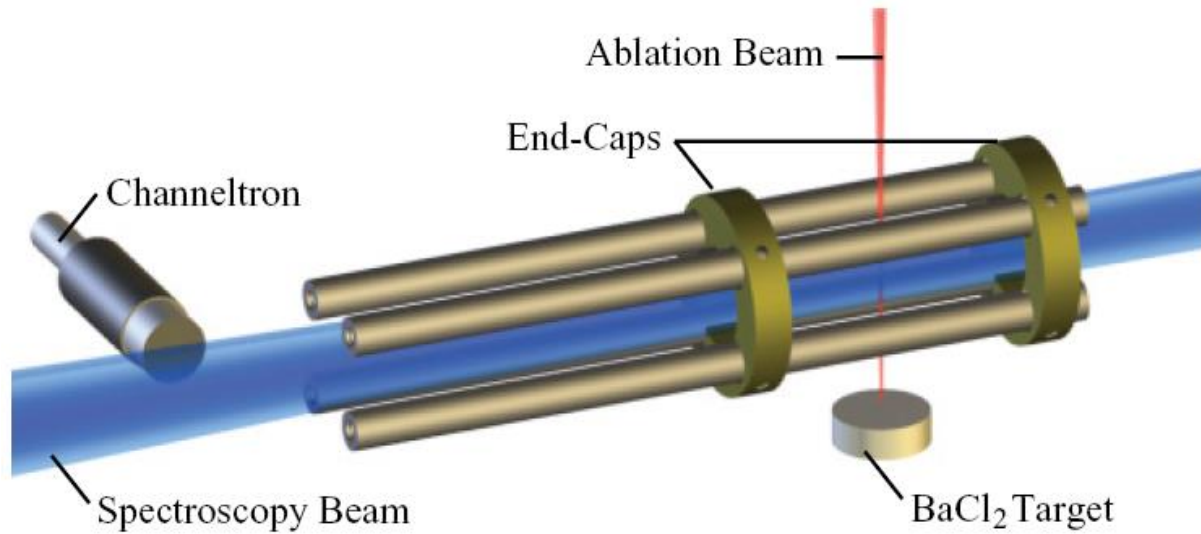


In reactions (II) and (III) the binding can in principle be achieved with the excess energy being carried away by an emitted photon. Since the trap potential depth is about 1 eV, practically all molecular ions formed by any of these reactions are expected to be trapped.



K. Molhave and M. Drewsen, Formation of translationally cold  $\text{MgH}^+$  and  $\text{MgD}^+$  molecules in an ion trap, *Phys. Rev. A* **62**, 011401(R) (2000)

# Produkcja jonów molekularnych metodą fotoablacji



A pressed, annealed target of  $\text{BaCl}_2$  mounted below the ion trap is ablated by a  $\sim 1$ -mJ, 10-ns pulse of 1064-nm laser radiation to create  $\text{BaCl}^+$  molecular ions, which are trapped via the technique presented in Ref. [15]. A sample of Yb is mounted alongside the  $\text{BaCl}_2$  target and is ablated to produce and trap  $\text{Yb}^+$  ions, which are used as a control (described later). A leak valve is used to insert up to  $10^{-3}$  mbar of He buffer gas into the chamber to enhance the trapping of high-energy ablated ions through sympathetic cooling. The spectroscopy beam is generated by a frequency-doubled pulsed dye laser (PDL), which is capable of photon energies up to  $49\,000\text{ cm}^{-1}$  with pulse energies of  $\sim 1$  mJ at a 10-Hz repetition rate.

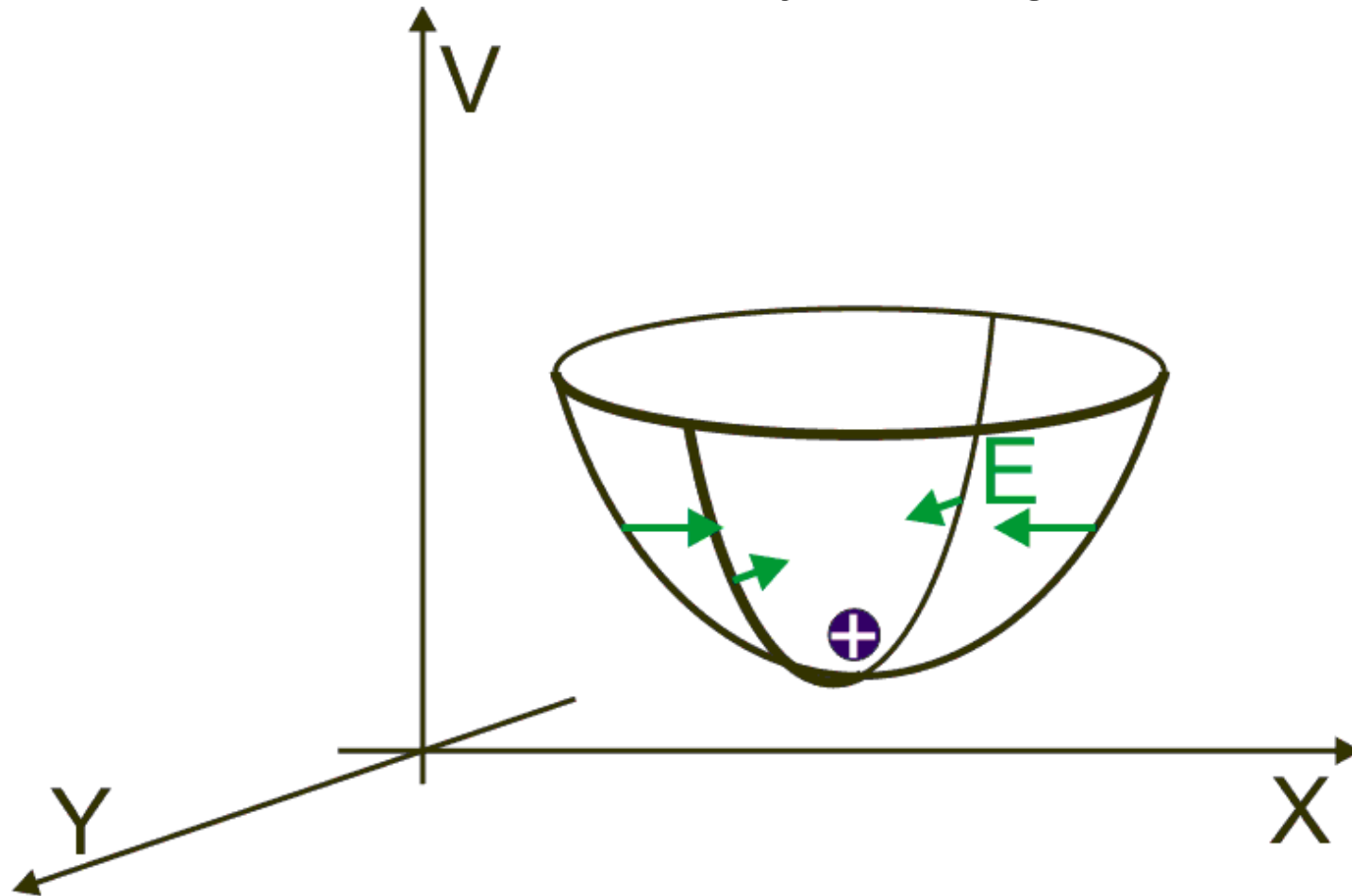
K. Chen et al.  
Molecular-ion trap-  
depletion spectroscopy of  
 $\text{BaCl}^+$ , *Phys. Rev. A* **83**,  
030501(R) (2011)

# Inne możliwości, dotychczas nie stosowane

- Bezpośrednia fotojonizacja cząsteczki, nie stosowana jeszcze w eksperymentach z pułapkami. Wymaga stosowania złożonych technik wielofotonowych lub promieniowania synchrotronowego.
- Zderzenia cząsteczek z cząstkami naładowanymi, np. elektronami. Dotychczas nie stosowane w eksperymentach z pułapkami. Planowane zastosowanie w eksperymencie w KL FAMO w Toruniu

Zasada działania pułapki Paula.

Czy możliwe jest zastosowanie pułapki elektrostatycznej?

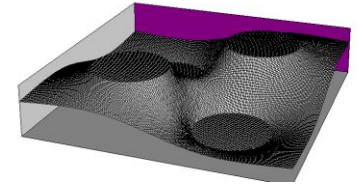


# Możliwe sposoby pułapkowania jonów

- Pułapki elektrostatyczne dla jonów o względnie wysokich energiach
  - Wnęka zbudowana z dwóch zwierciadeł elektrostatycznych
  - Pułapka Kingdona (kondensator cylindryczny z jonami poruszającymi się wokół wewnętrznej elektrody)
- Pułapki z polem magnetycznym
  - Pułapka Penninga
- Zastosowanie zmiennych pól elektrycznych (pułapki typu Paula)

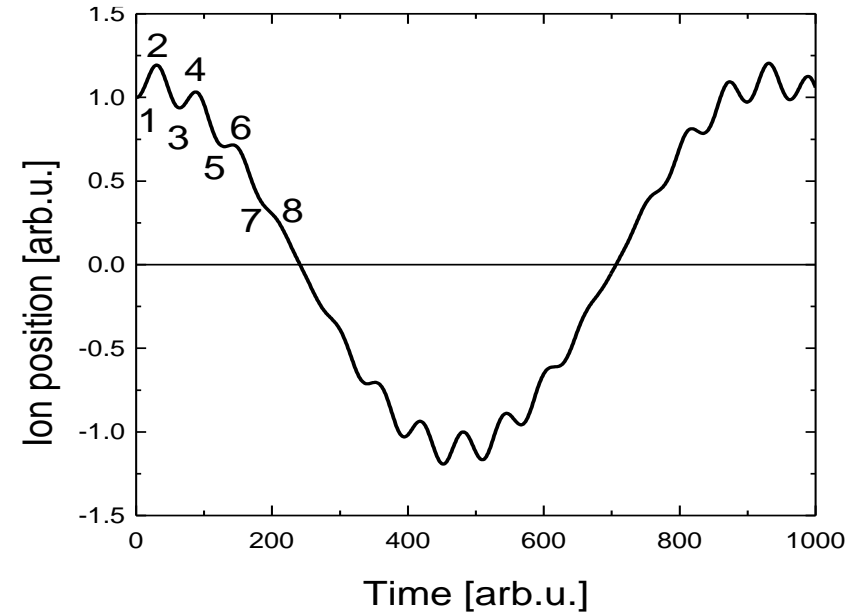
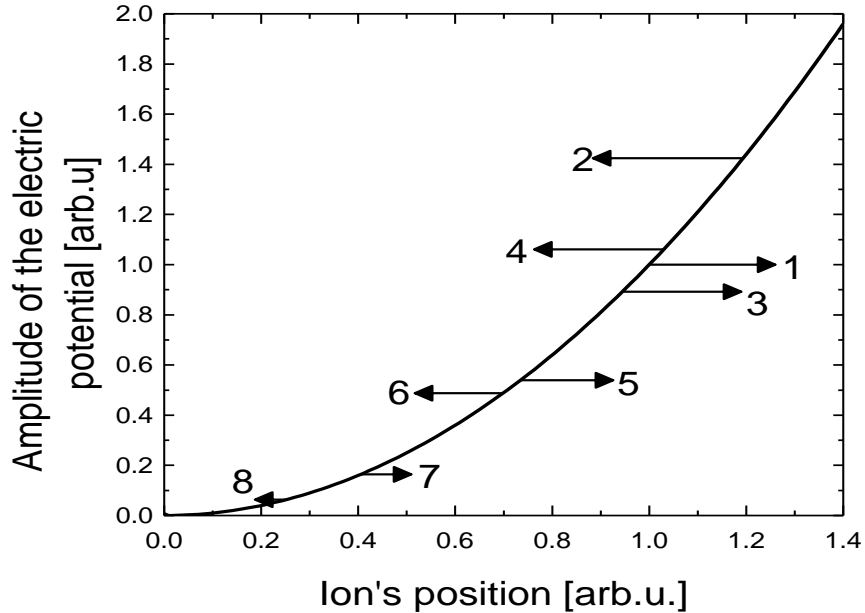
# Jon w zmiennym polu elektrycznym

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_0(x, y, z) \cdot \cos \Omega t$$



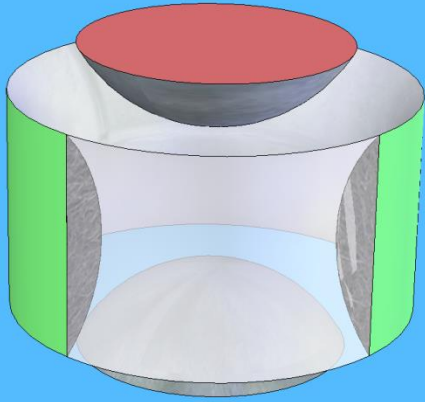
Przykład:  $E_x(x) = k \cdot x \cdot \cos \Omega t$

$$\ddot{x} = \frac{Q}{M} \cdot k \cdot x \cdot \cos \Omega t$$

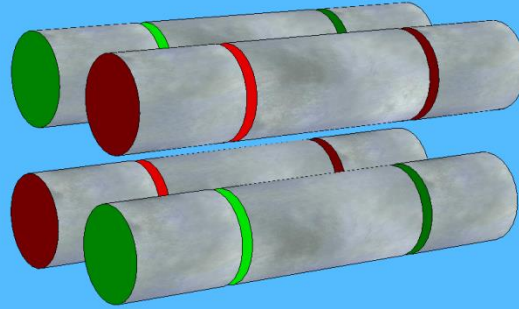


$$V_{eff}(x, y, z) = \frac{Q}{4M} \frac{\mathbf{E}_0^2(x, y, z)}{\Omega^2} + V_{stat}(x, y, z)$$

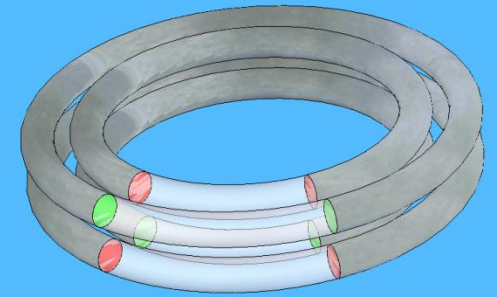
# Pułapki typu Paula



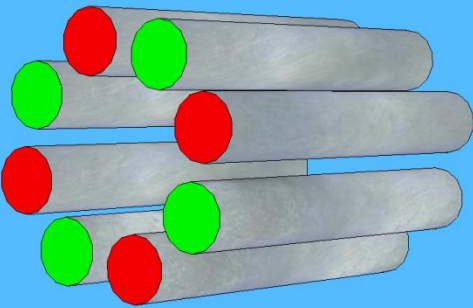
Klasyczna pułapka  
Paula (kwadrupol 3D)



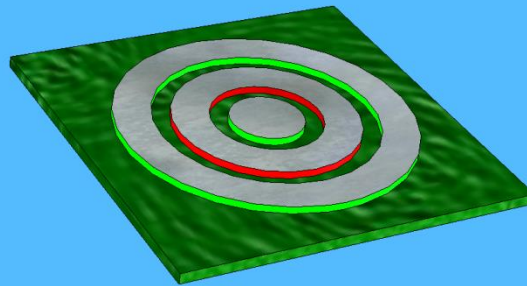
Liniowa pułapka  
segmentowa



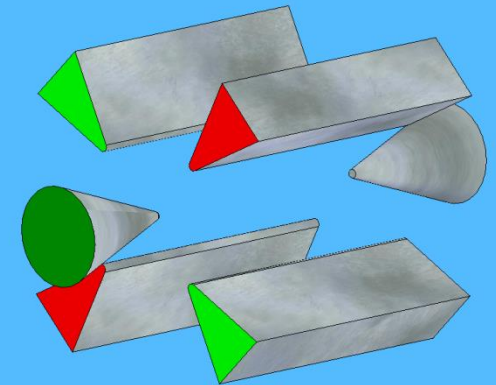
Pułapka pierścieniowa



Układy wyższego  
rzędu (np. oktupol)

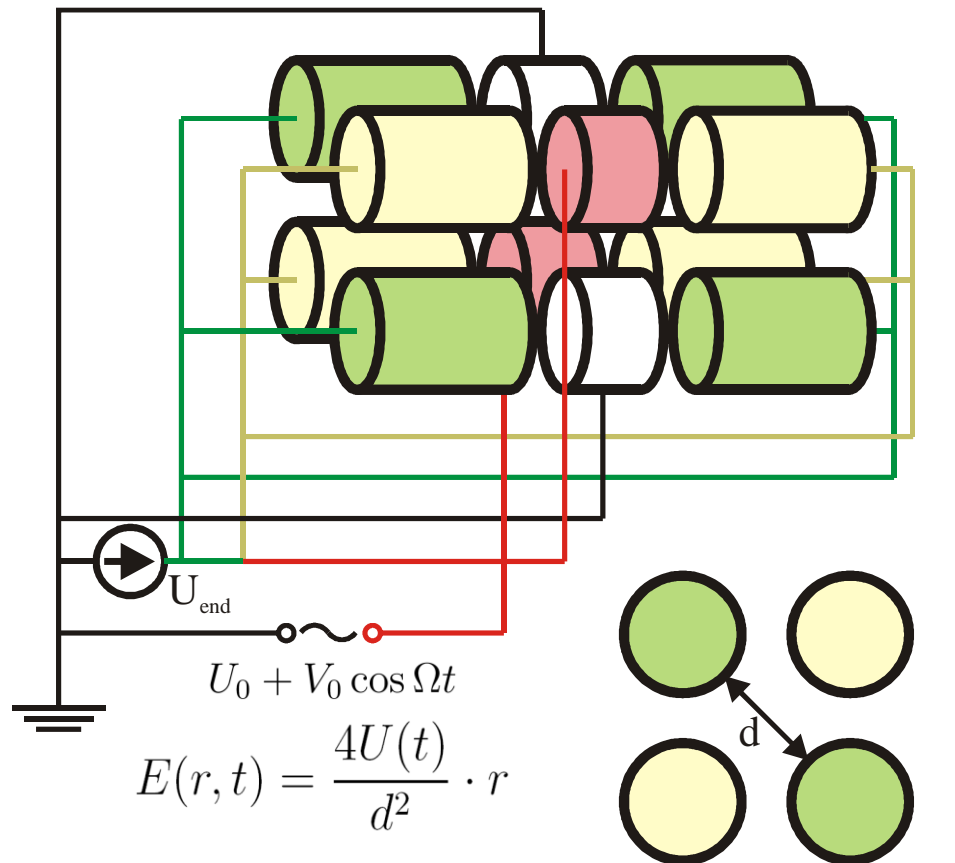
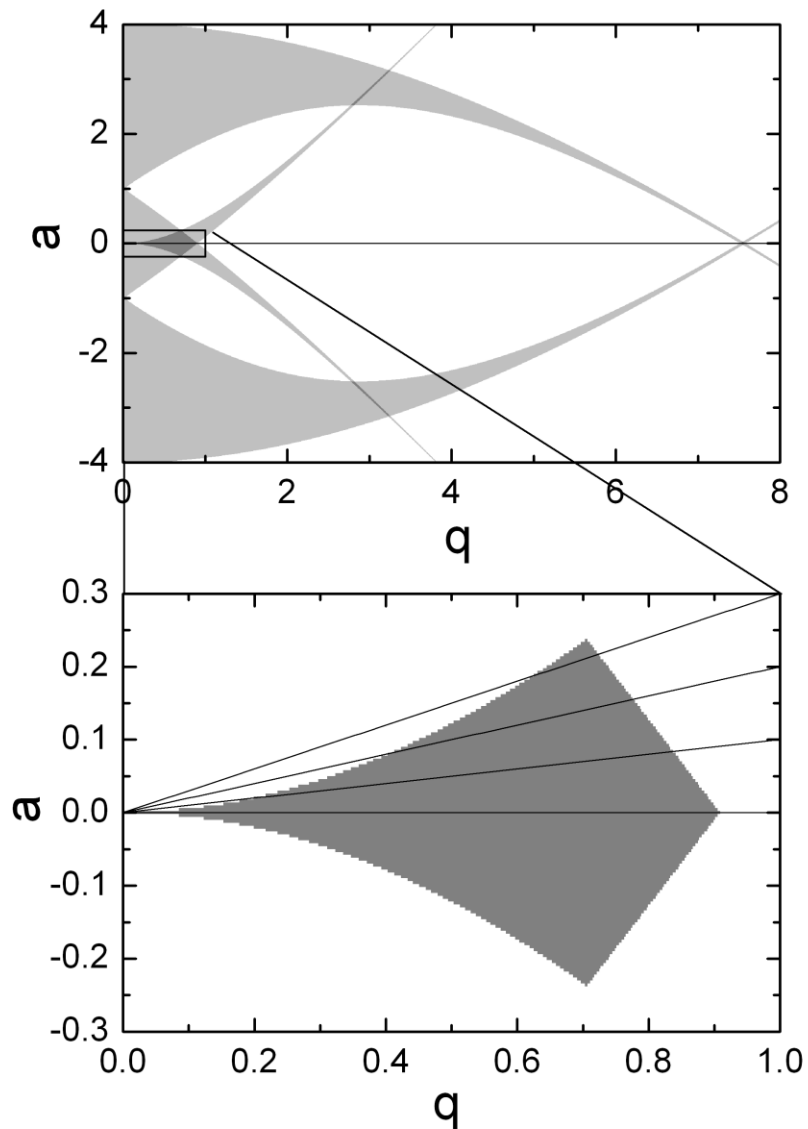


Pułapka planarna  
(płytką drukowaną)



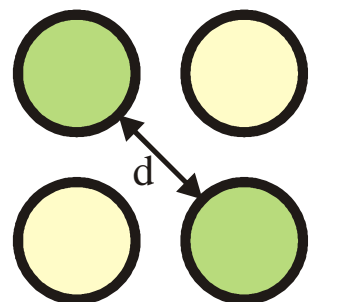
Pułapka o elektrodach  
ostrzowych

# Diagram stabilności pułapki



$$V_{eff} = \frac{Q}{4M} \frac{\mathbf{E}_0^2}{\Omega^2} + V_{stat}$$

$$V_{eff} = \frac{M}{Q} \Omega^2 \left[ q^2 \pm \frac{1}{2} a \right] r^2$$



$$a = 4 \frac{QU_0}{Md^2\Omega^2}$$

$$q = 2 \frac{QV_0}{Md^2\Omega^2}$$



# Eksperyment w Aarhus

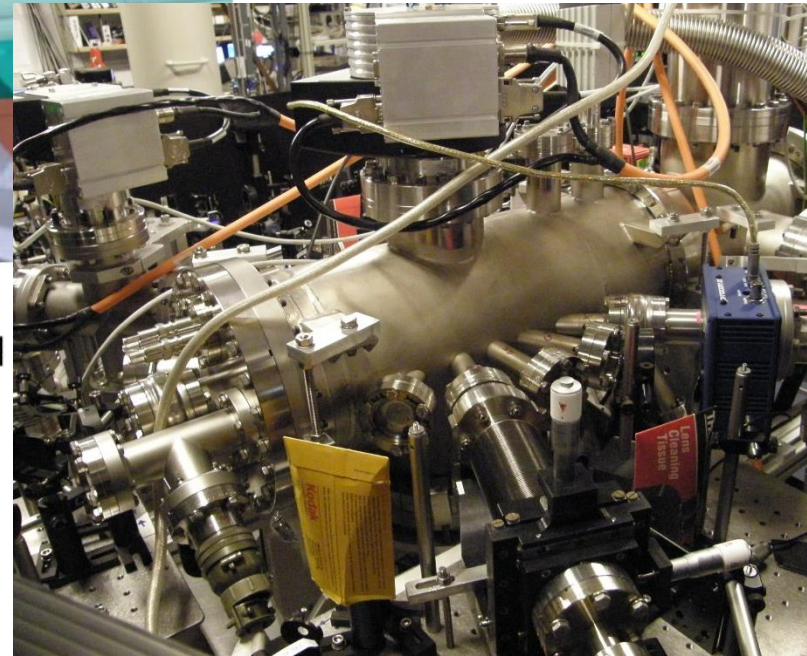
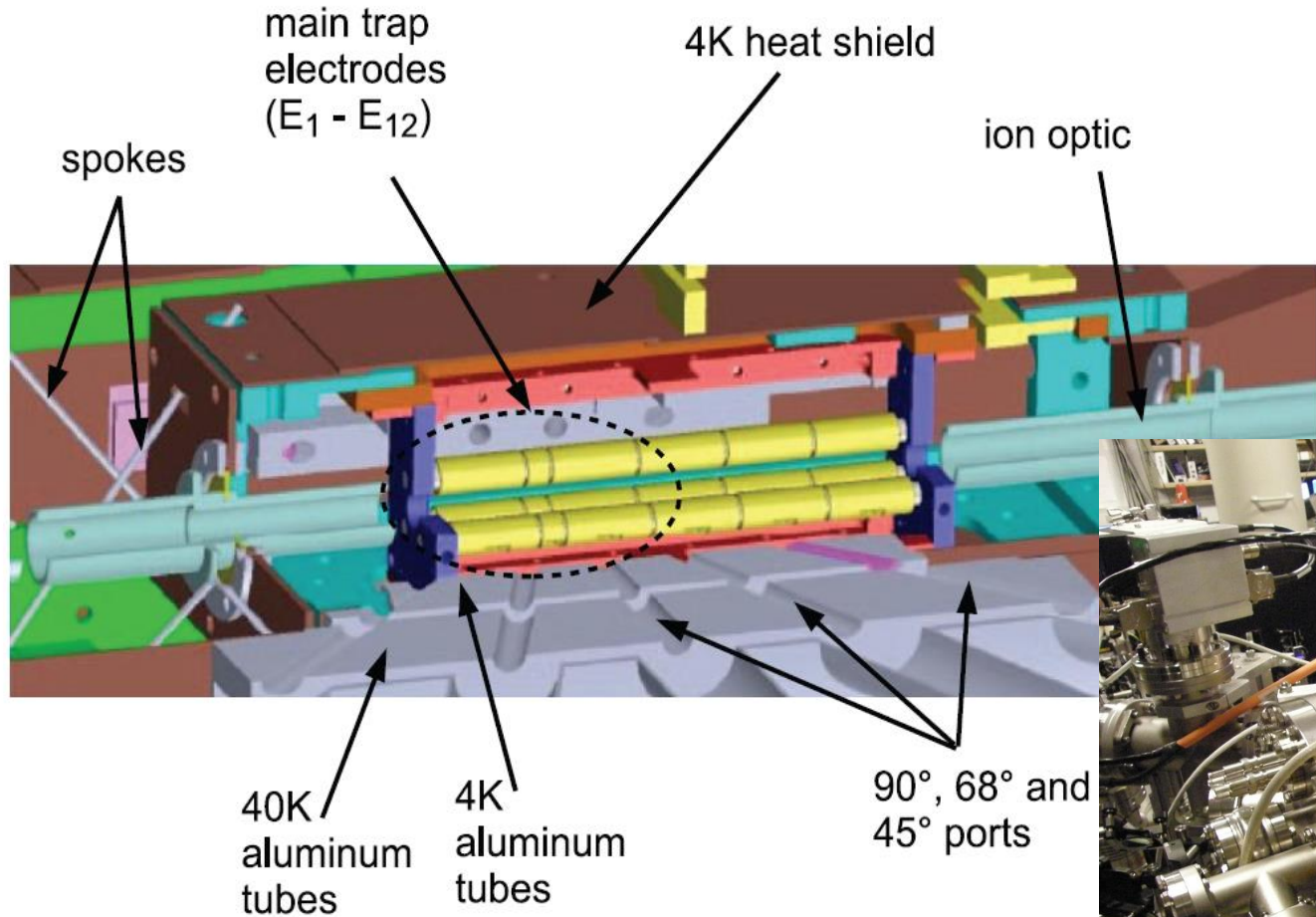
## Cryogenic Paul Trap Experiment (CryPTE<sub>x</sub>)

Typowe ustawienia:

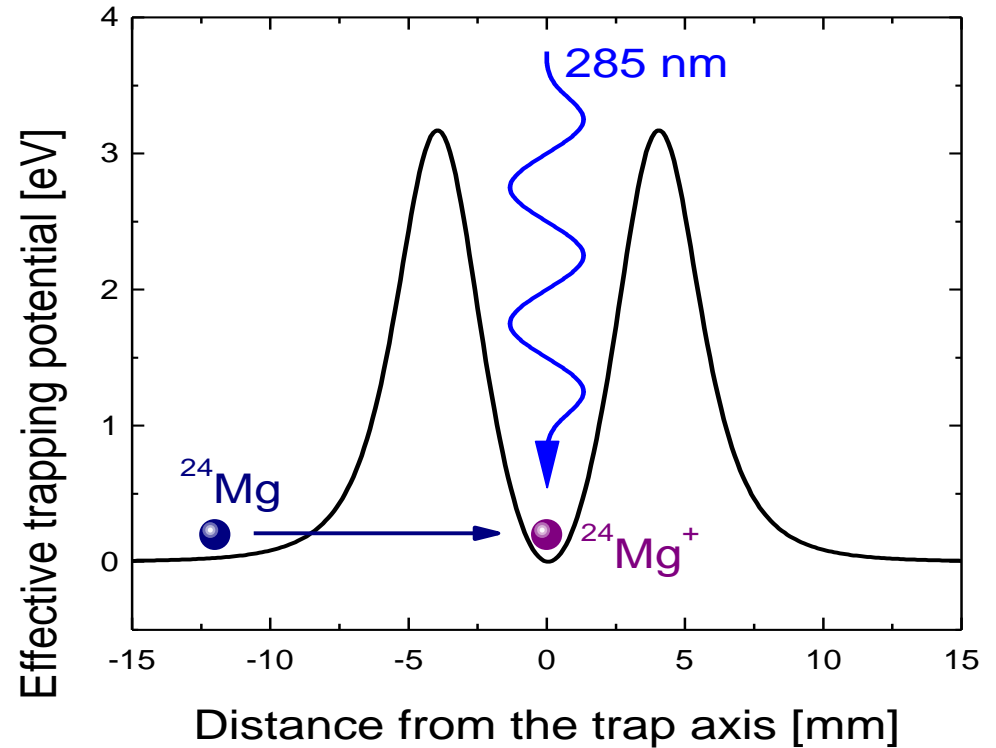
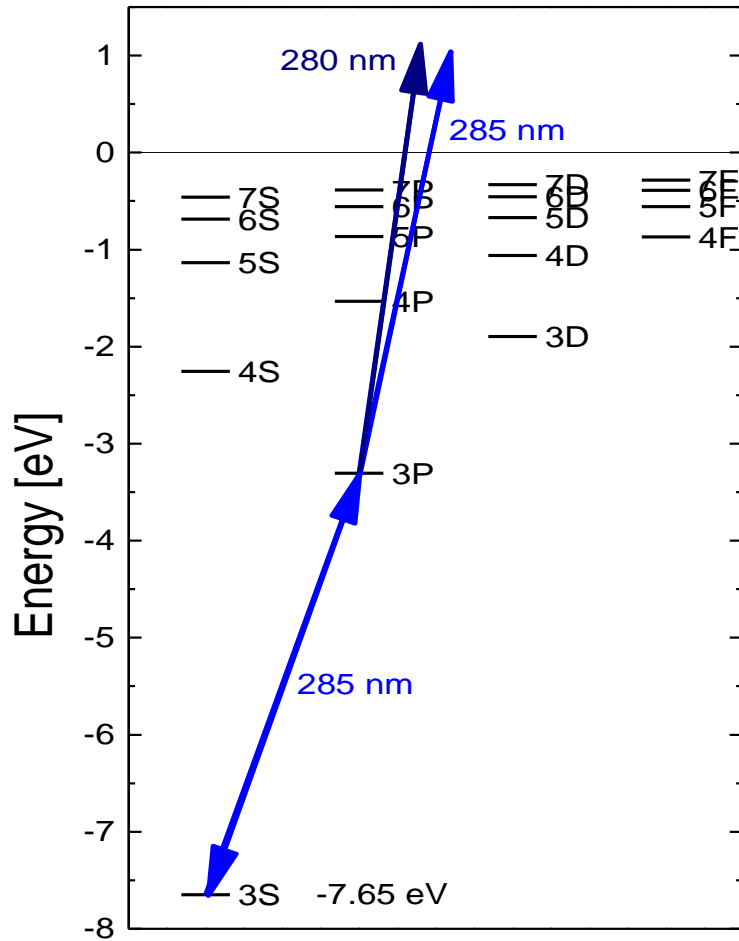
$$f = 4 \text{ MHz}$$

$$V_0 = 240 \text{ V (pp)}$$

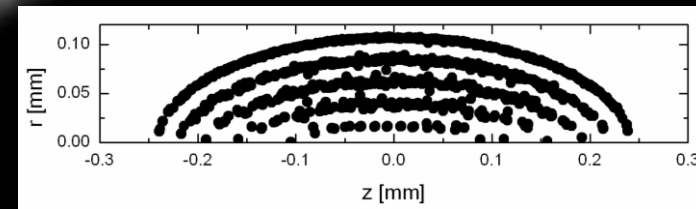
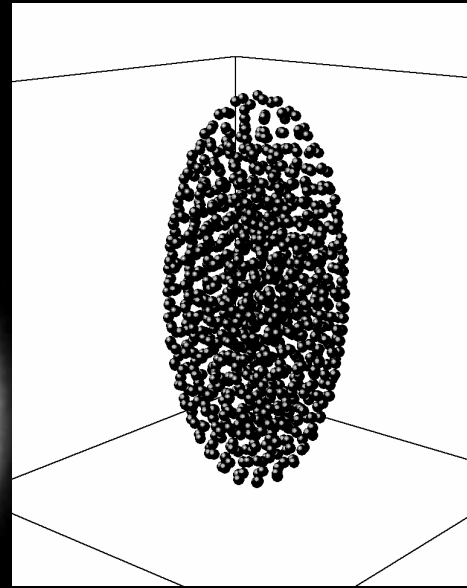
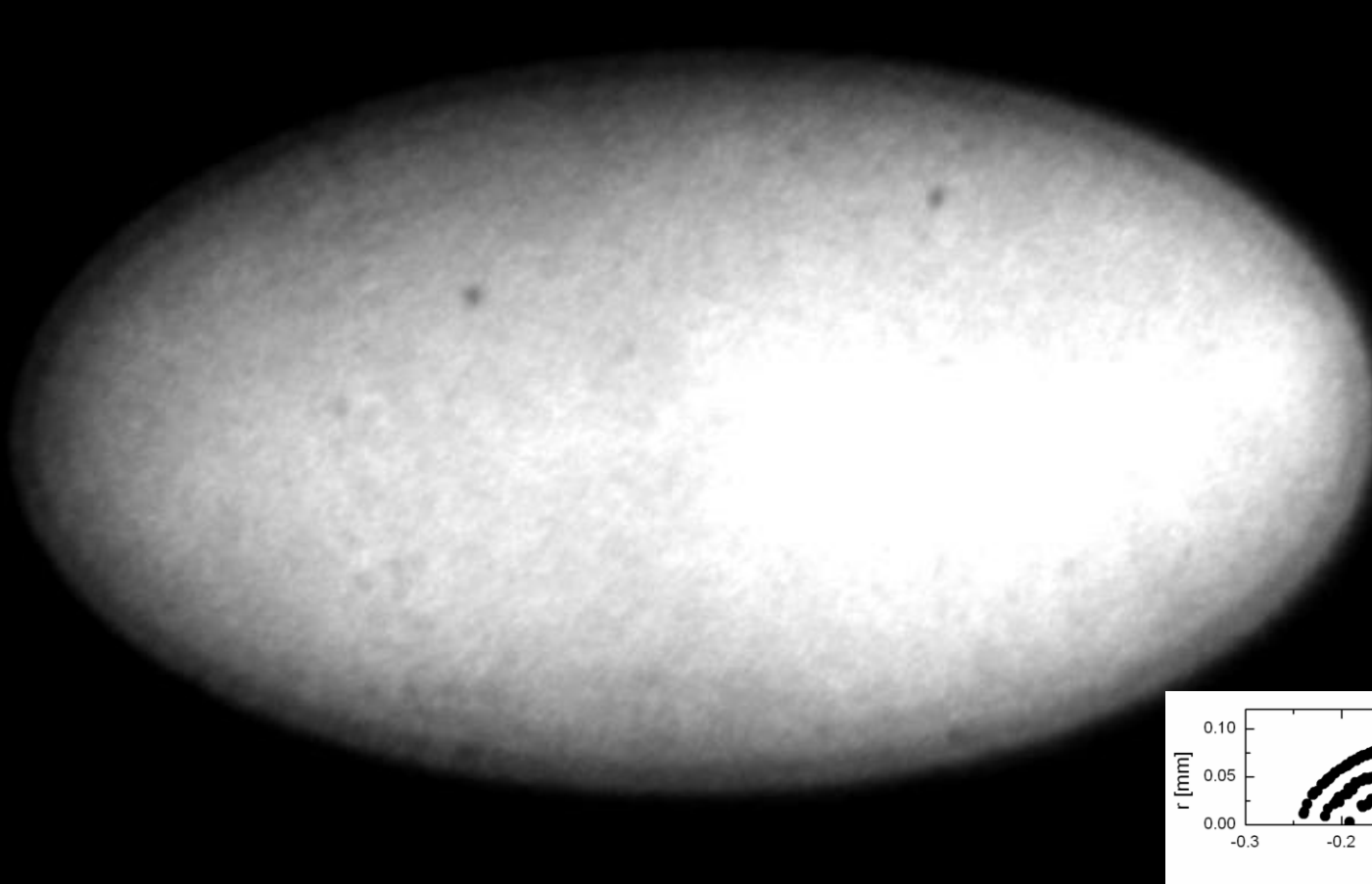
$$V_{\text{end}} = 5 \text{ V}$$



# Wytwarzanie jonów atomowych $\text{Mg}^+$



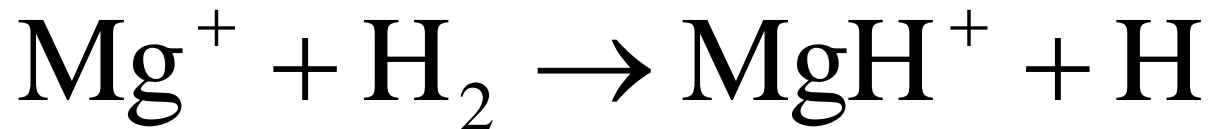
# Chłodzenie translacyjne i krystalizacja



Jony  $\text{Mg}^+$  są chłodzone dopplerowsko za pomocą wiązek lasera 280 nm na przejściu  $3s^2S_{1/2} - 3p^2P_{3/2}$ .

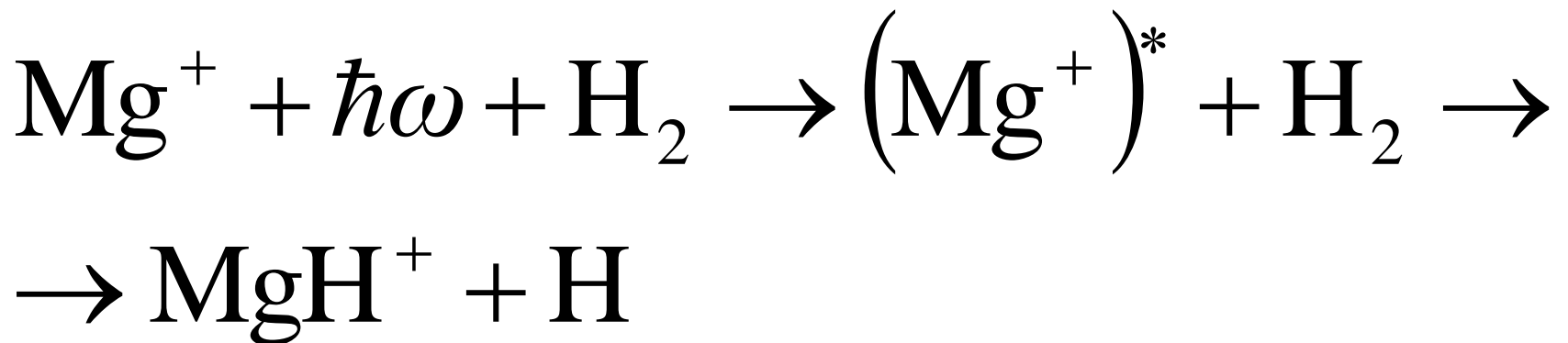
Fluorescencja 280 nm jest rejestrowana za pomocą kamery CCD wyposażonej we wzmacniacz obrazu z płytką mikrokanałową.

# Wytwarzanie jonów $\text{MgH}^+$ w procesie fotoasocjacji

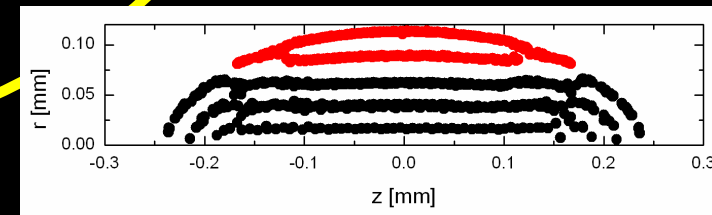
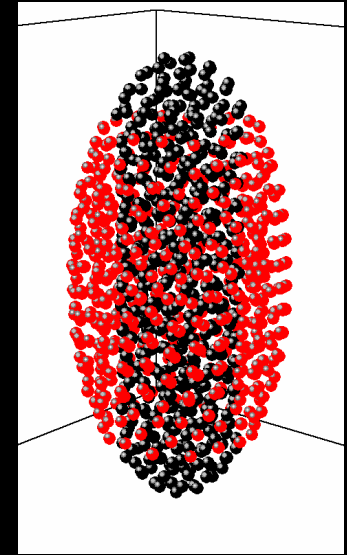
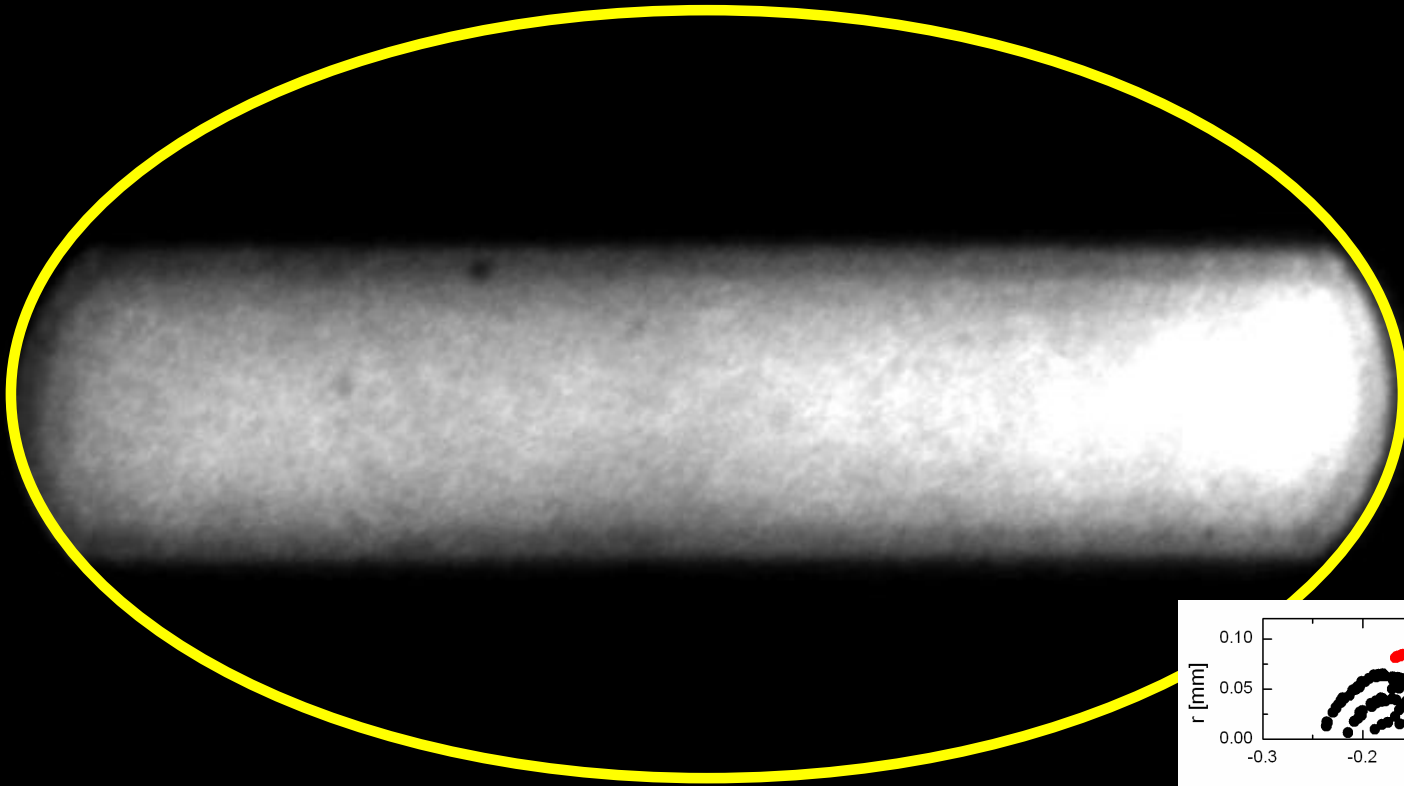


Reakcja jest energetycznie wzbroniona, brakuje około 2.5 eV.

Energia wzbudzenia jonu  $\text{Mg}^+$  do stanu  $3p^2P_{3/2}$  wynosi 4.43 eV. Reakcja jest więc możliwa jeżeli jon  $\text{Mg}^+$  znajduje się w stanie wzbudzonym.



# Chłodzenie pośrednie i formowanie kryształu z dwoma rodzajami jonów

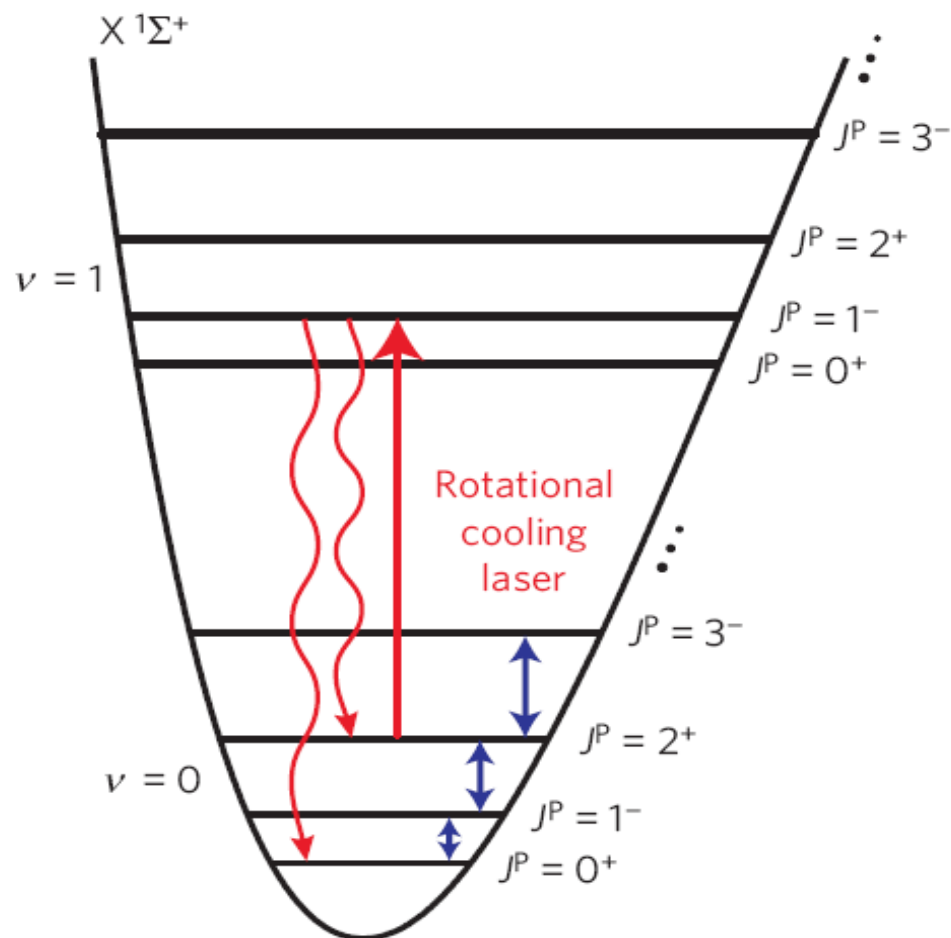


$$V_{eff}(x, y, z) = \frac{q}{4m} \frac{\vec{E}_0^2(x, y, z)}{\Omega^2} + V_{stat}(x, y, z)$$

Stała oscylacyjna  $\text{MgH}^+$  wynosi około 200 meV. Nawet w temperaturze pokojowej nie obserwuje się wzbudzeń oscylacyjnych.

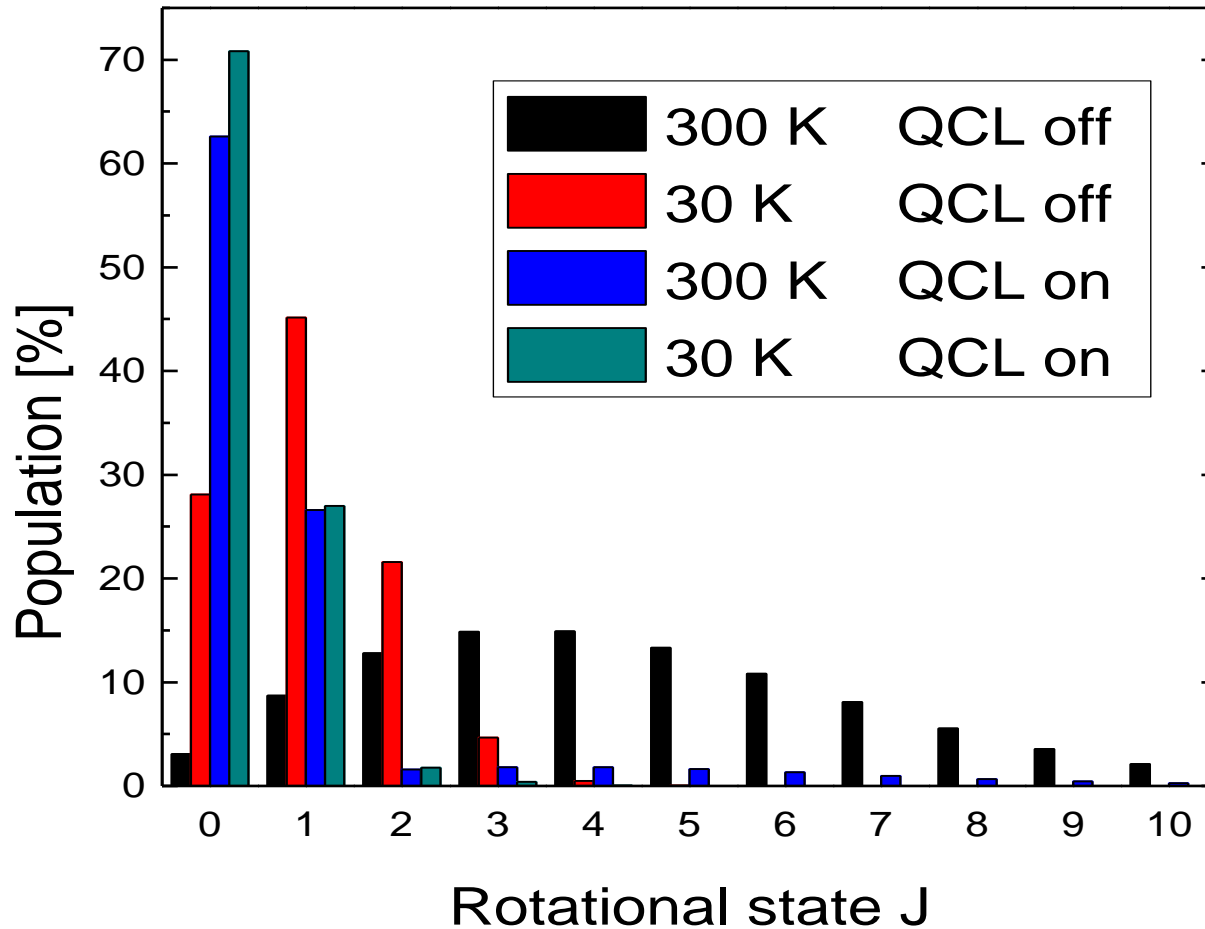
# Przejścia między stanami rotacyjnymi

- Zderzenia z drobinami gazu
- Oddziaływanie z promieniowaniem cieplnym elementów aparatury
- Oddziaływanie z promieniowaniem laserowym 6215 nm

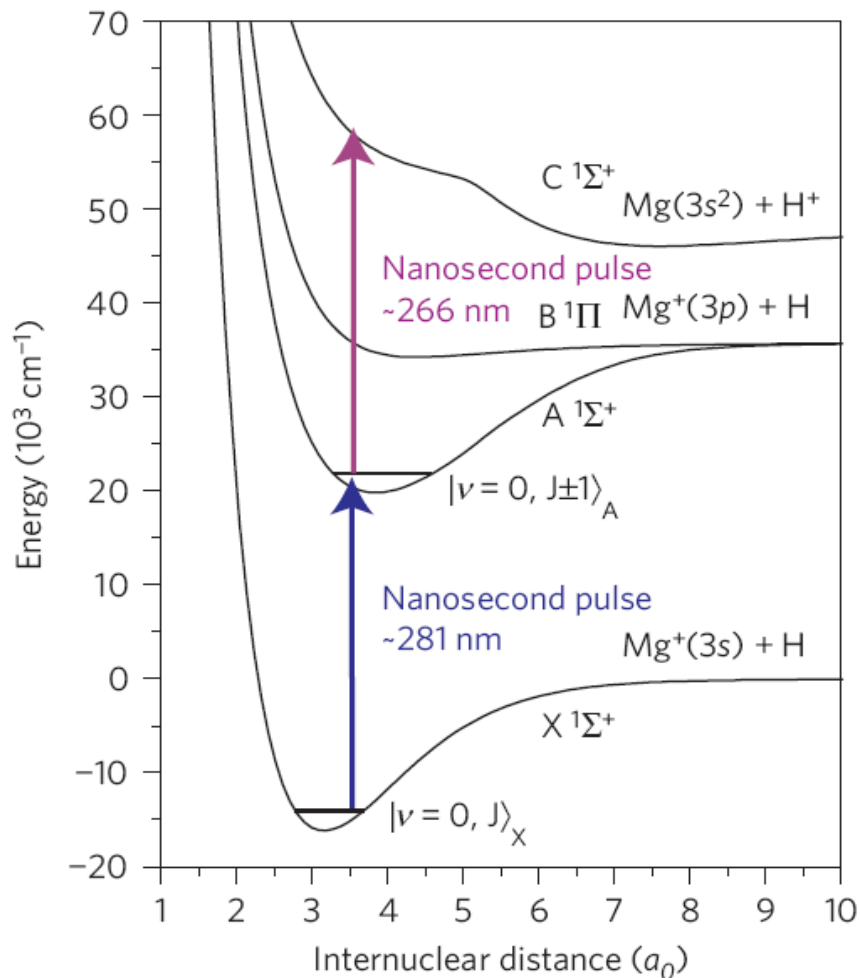


P. Staantum, K. Højbjerg, P. Skyt, A. Hansen, M. Drewsen, *Nature Physics* **6** (2010) 271-274

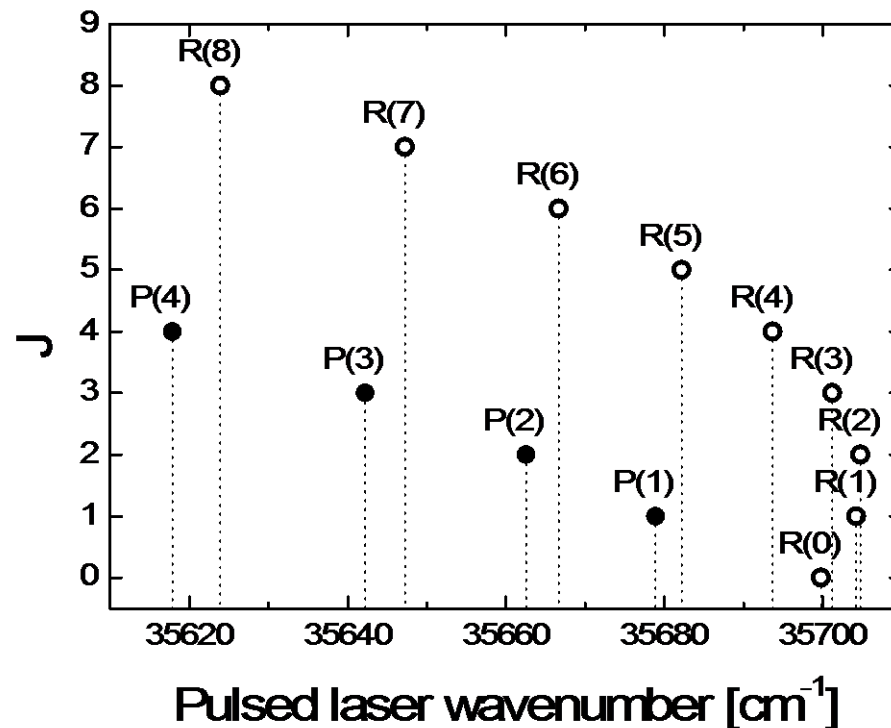
# Wydajność metod optycznych i stosowania środowiska kriogenicznego



# Resonance Enhanced Multi-Photon Dissociation (REMPD)

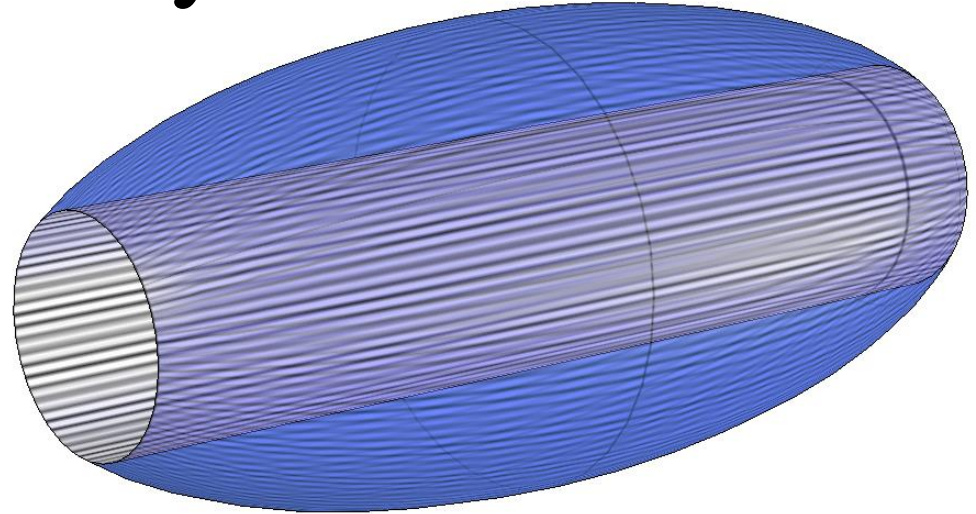
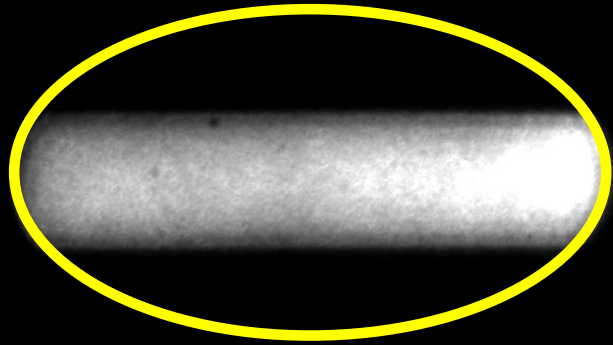


Impulsy powtarzane z częstotliwością 10 Hz. Trzykrotne impulsy (ze względu na skończoną wydajność).





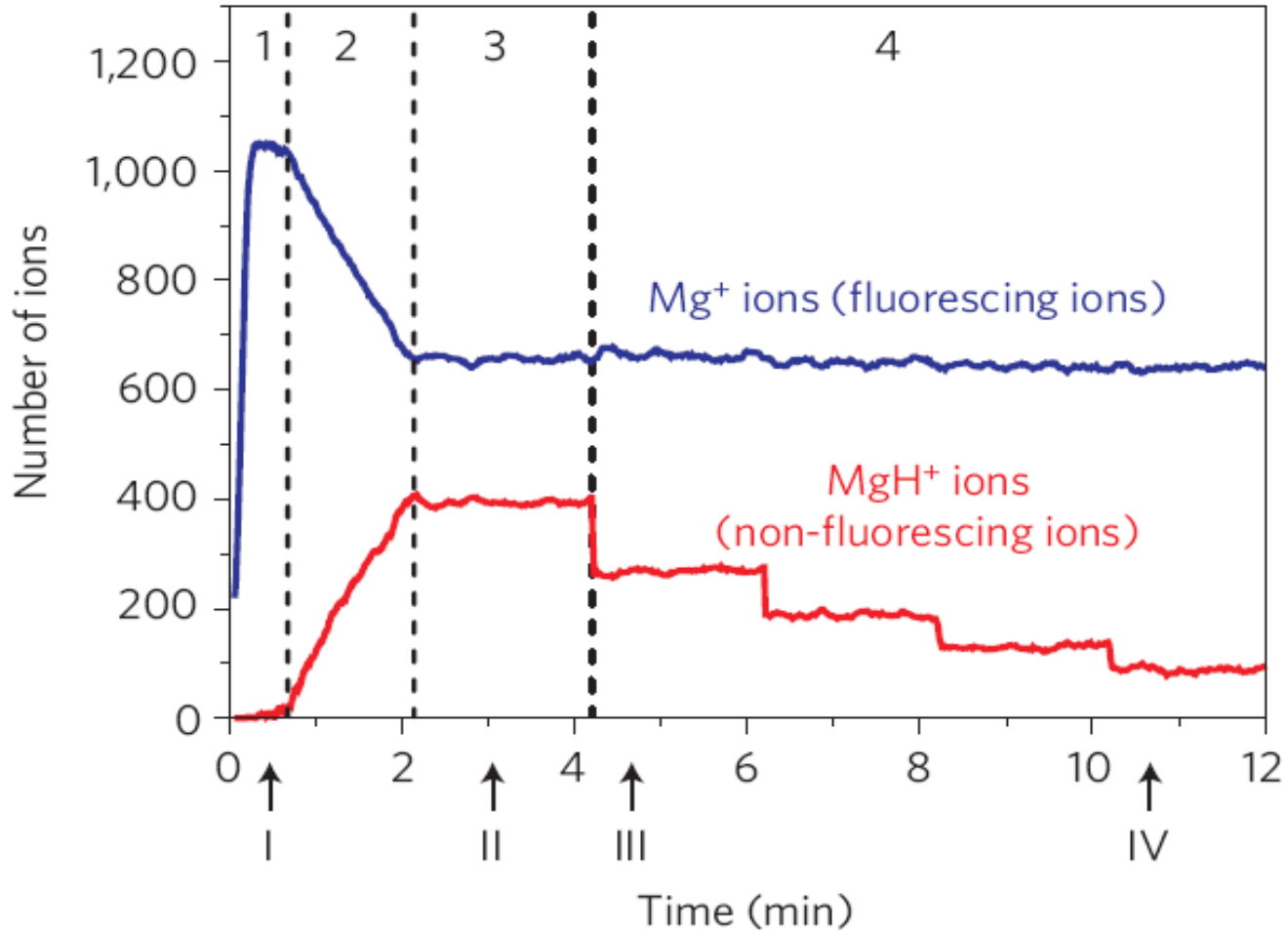
# Pomiar ubytku jonów molekularnych $\text{MgH}^+$ w kryształach



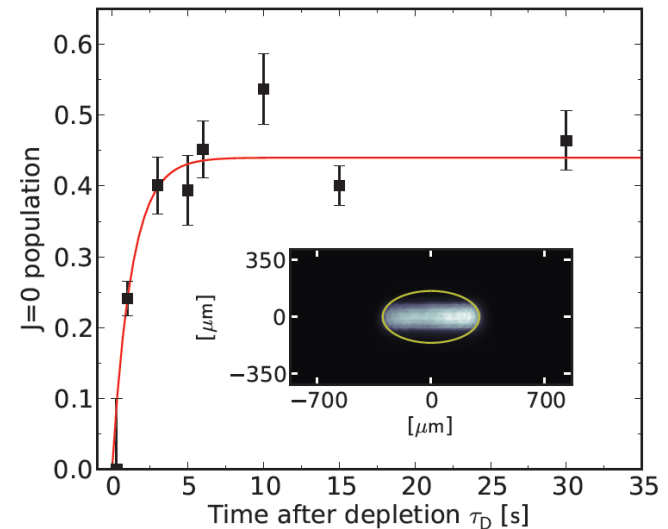
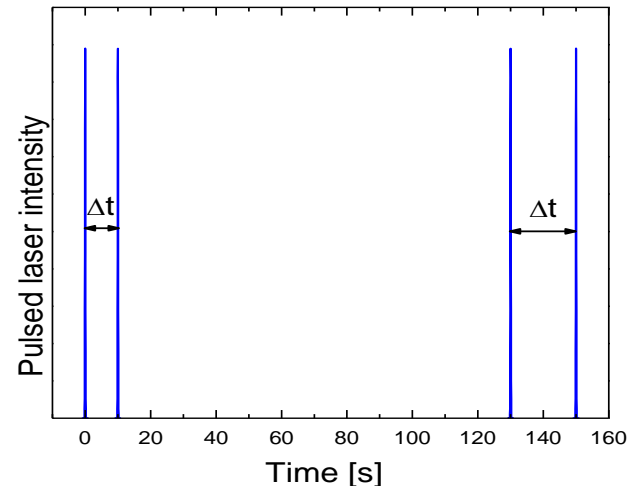
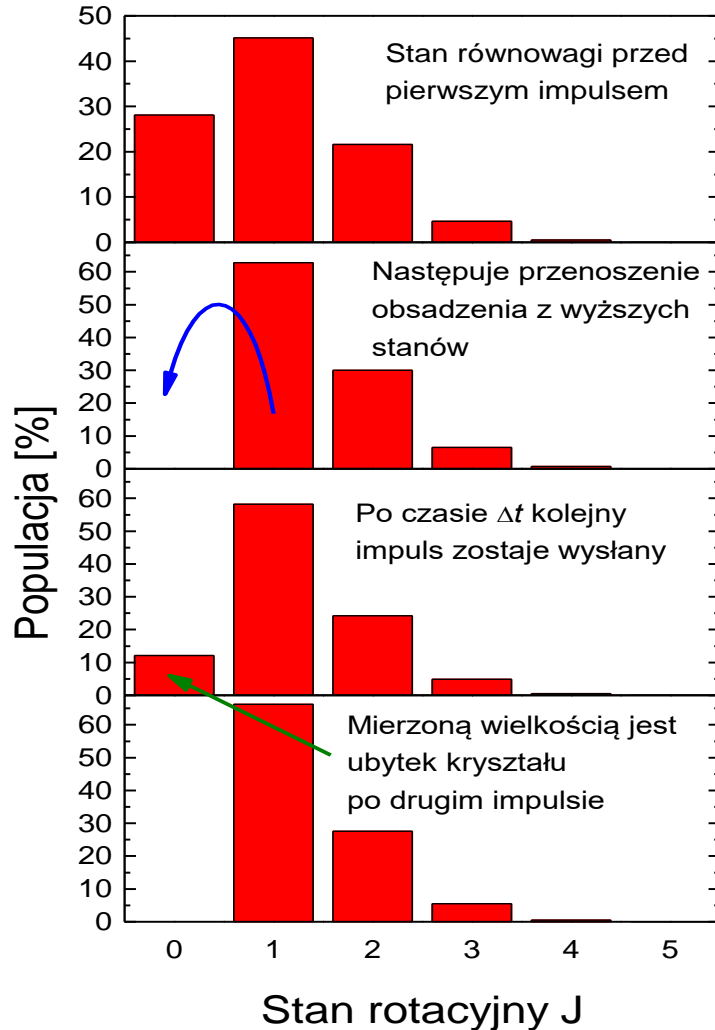
Ze zdjęcia odczytywana jest objętość ciemnej części kryształu. Obsadzenie stanu  $J$  jest mierzone poprzez obserwację ubytku tej objętości:

$$Drop = \frac{V_{before} - V_{after}}{V_{before}}$$

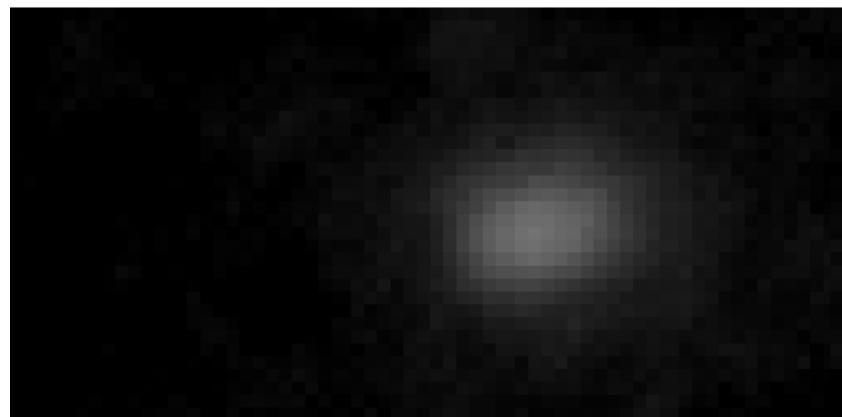
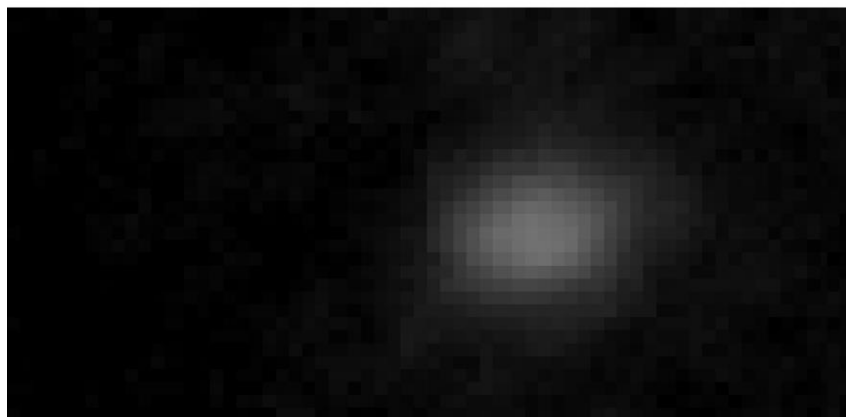
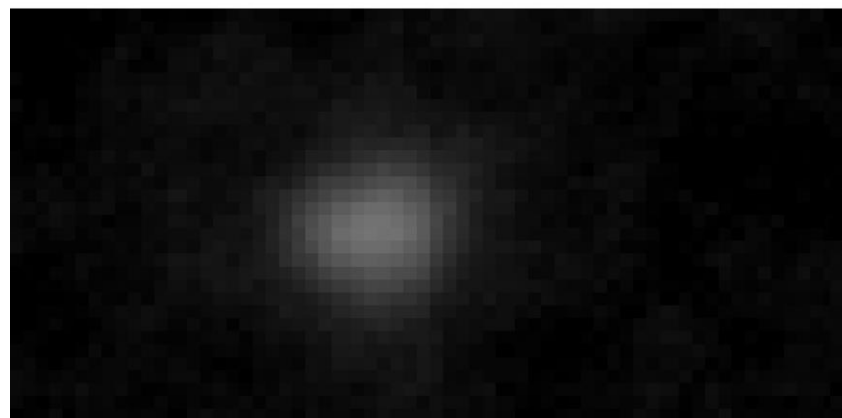
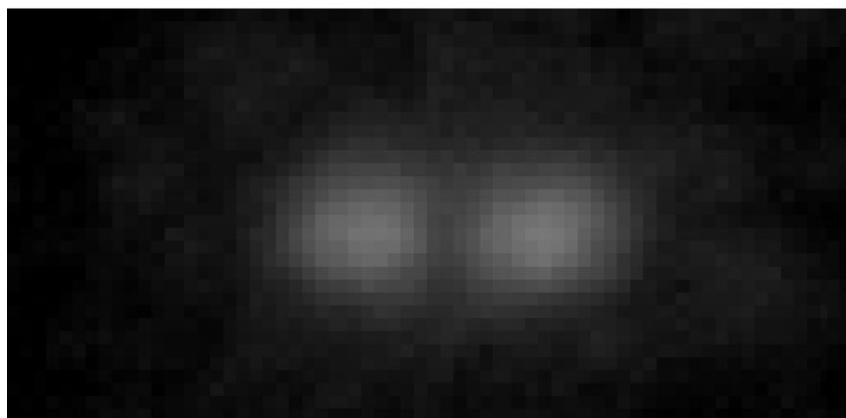
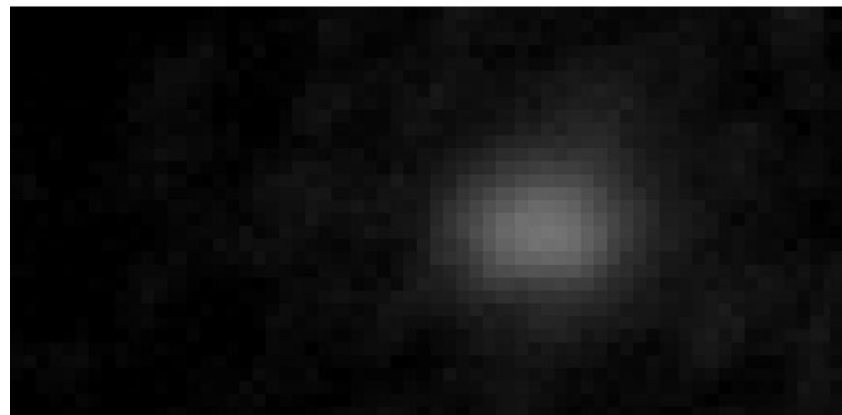
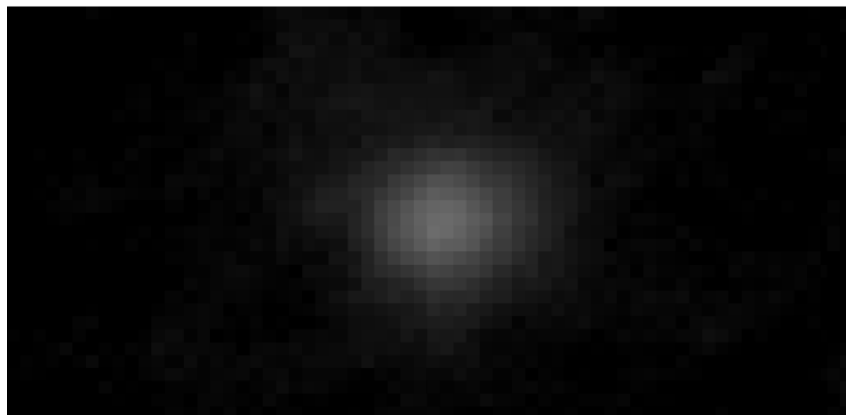
# Badanie stanu równowagi – procedura pomiarowa



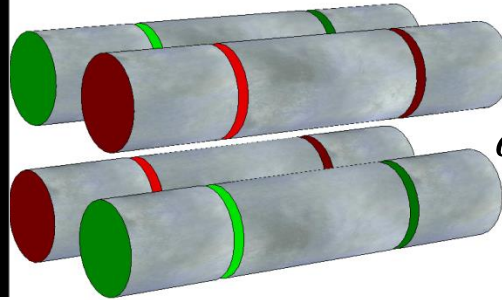
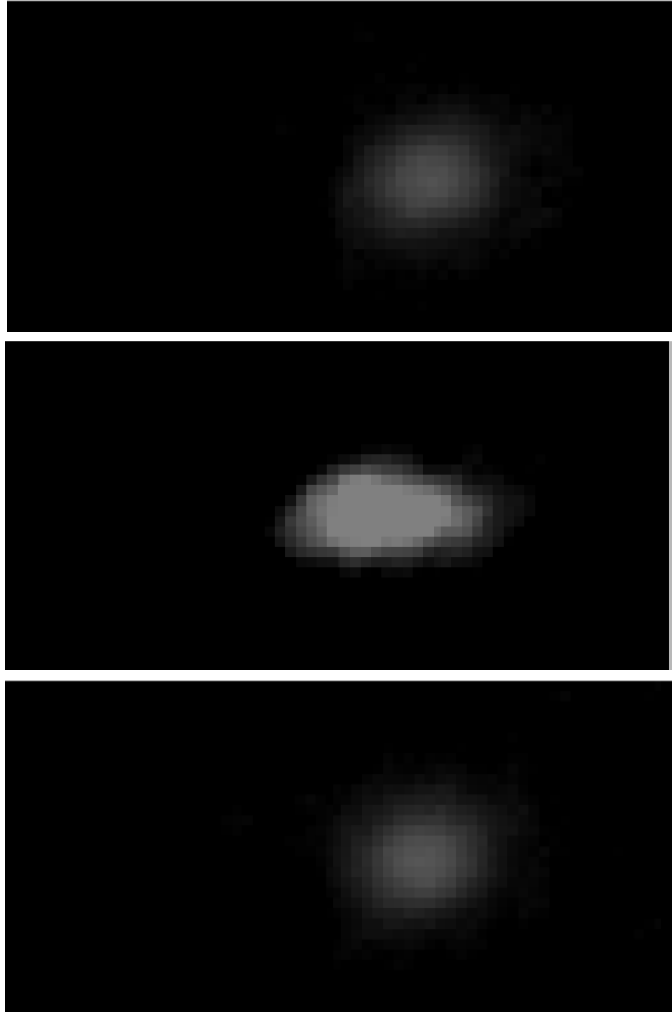
# Badanie dynamiki osiągnięcia stanu równowagi



# Eksperyment z pojedynczym jonem



# Rezonansowy pomiar masy jonu molekularnego

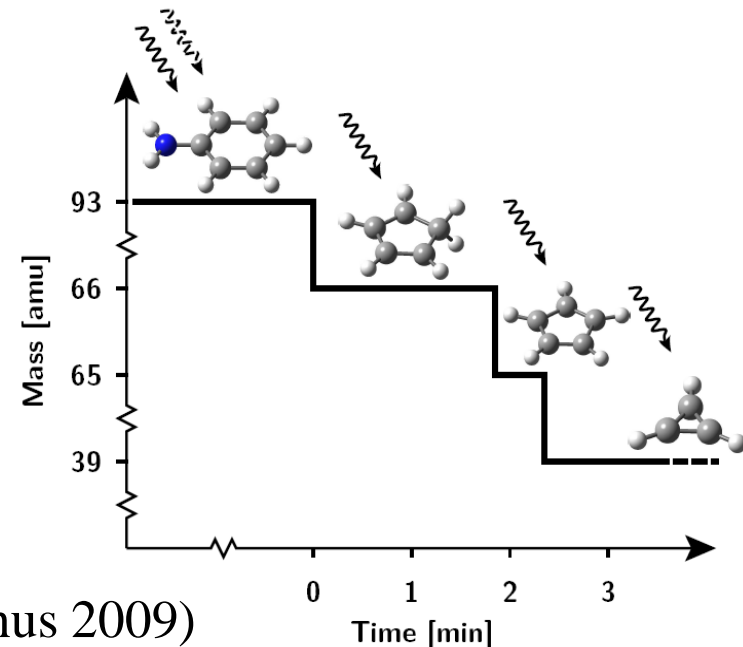


$$\omega^2 = \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} - \sqrt{1 - \frac{m_1}{m_2} + \left( \frac{m_1}{m_2} \right)^2} \right) \cdot \omega_1^2$$

Przykładane jest dodatkowe napięcie przemienne do jednej strony pułapki:

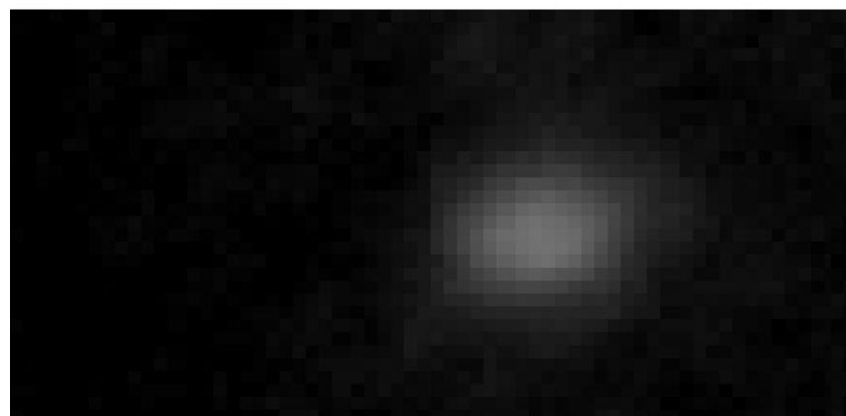
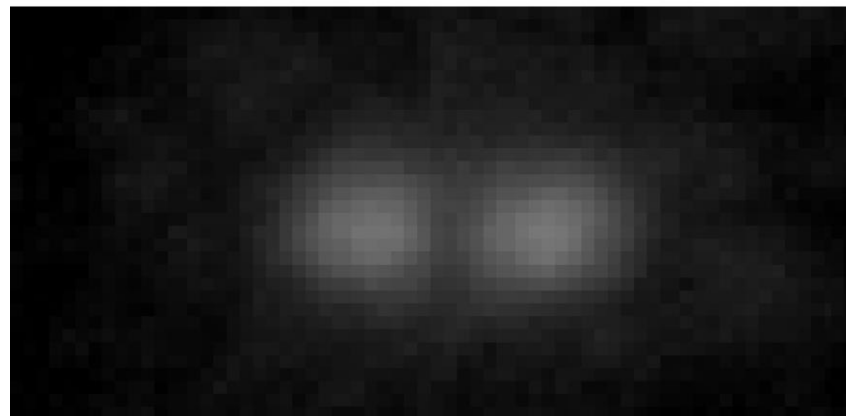
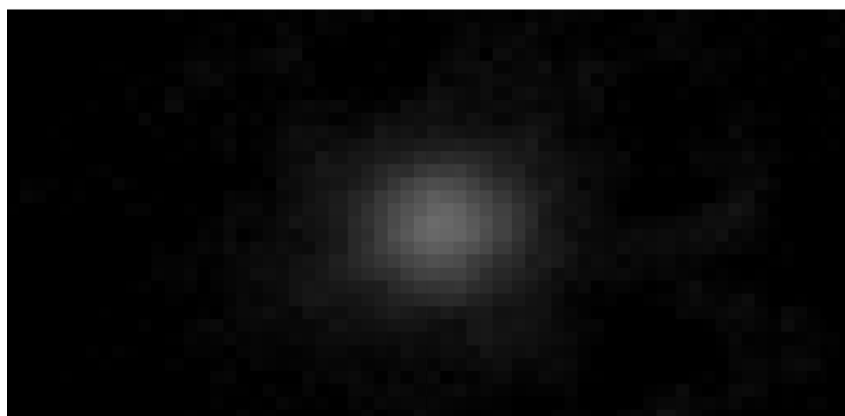
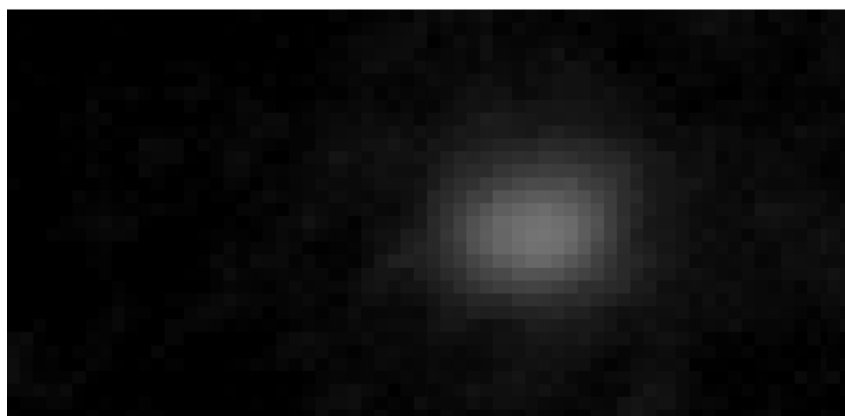
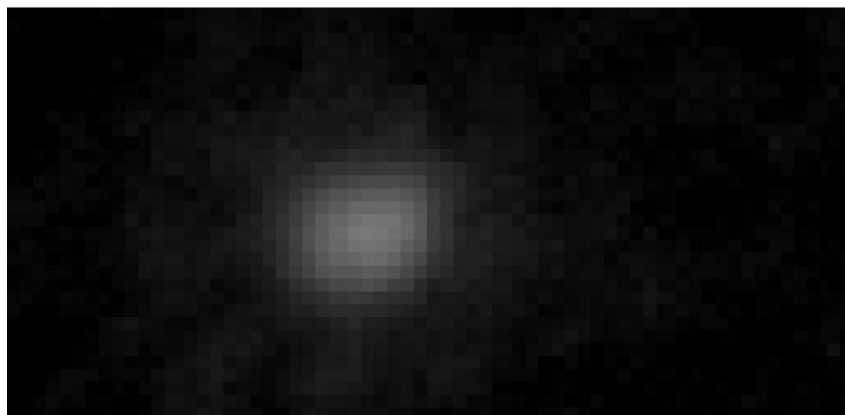
$$V_0 = 100 \text{ mV}$$

$$f = 30 \text{ kHz}$$

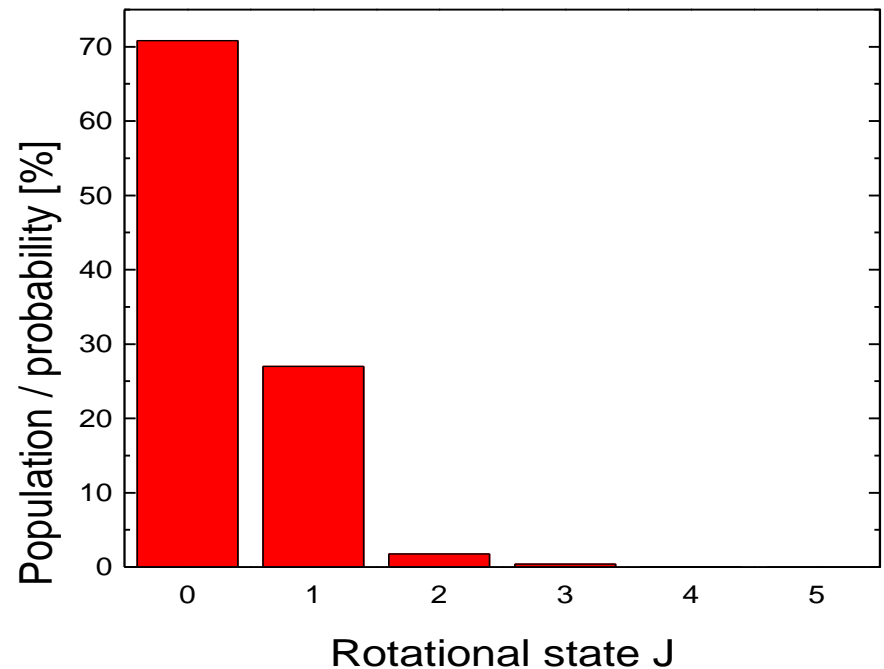
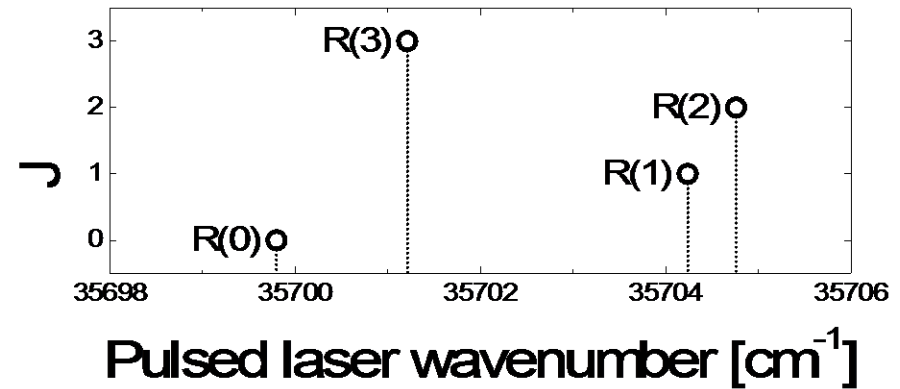
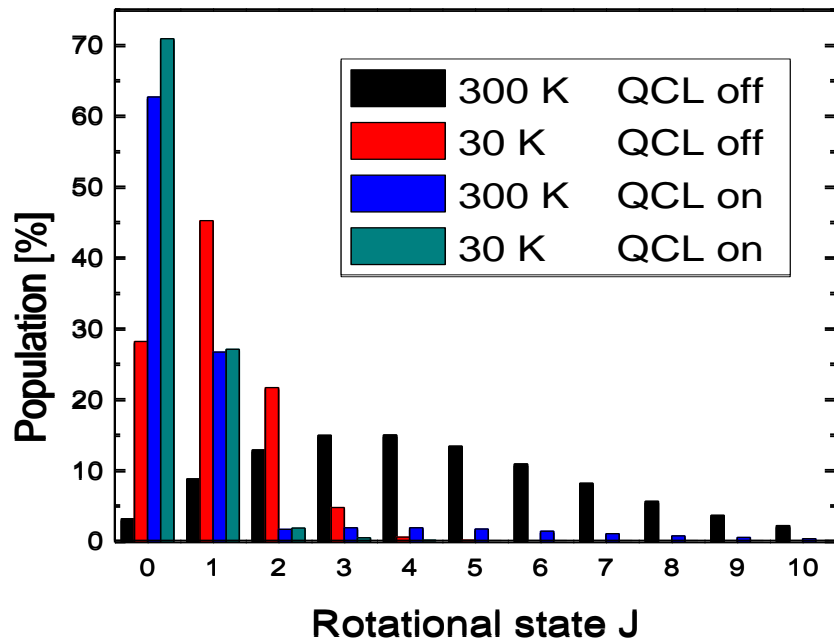


Przykład innego zastosowania: sekwencyjna fotodysocjacja, (K. Højbjerg, PhD thesis, Aarhus 2009)

# Badanie prawdopodobieństw obsadzeń stanów rotacyjnych

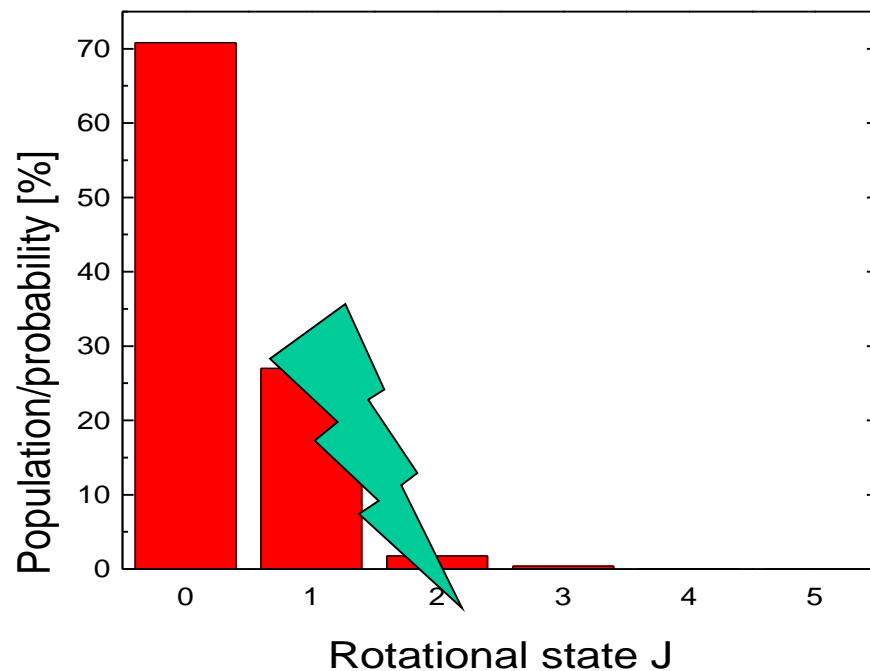
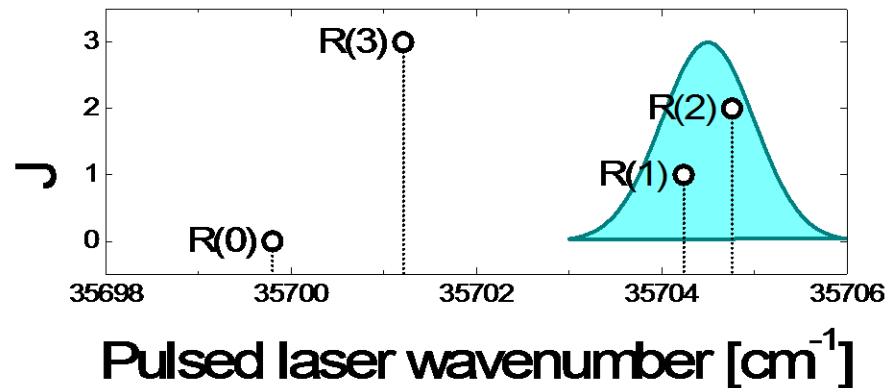
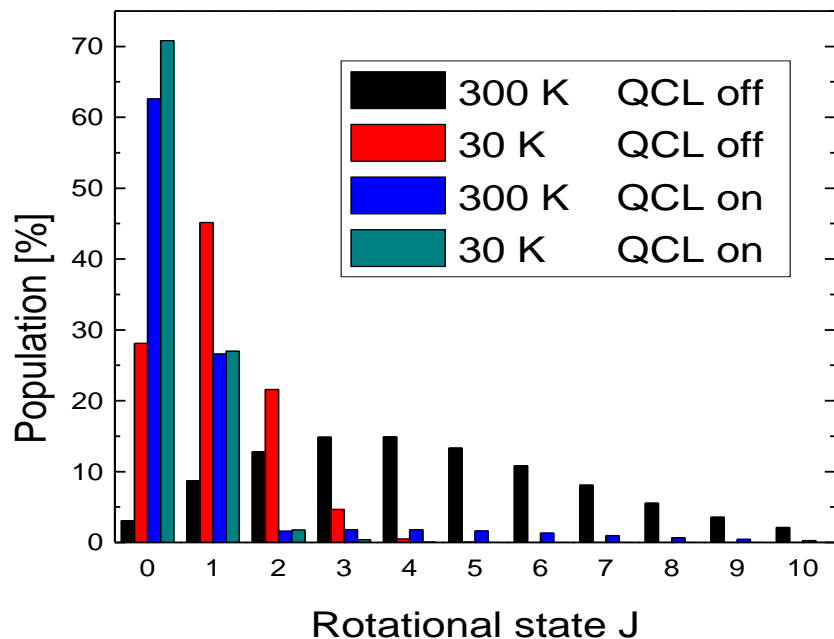


# Ostateczny cel – wszystkie jony w stanie podstawowym



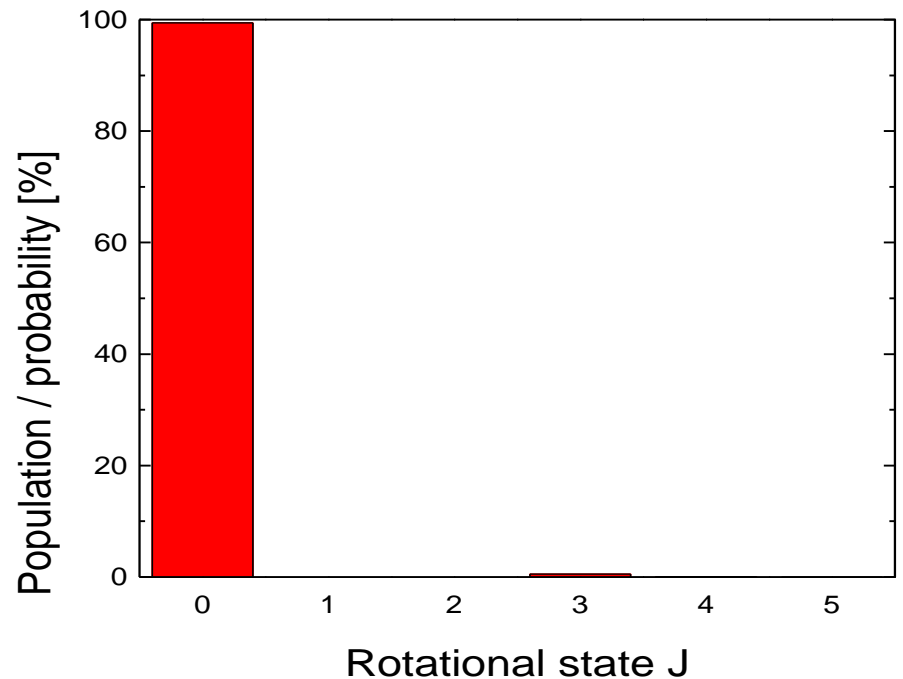
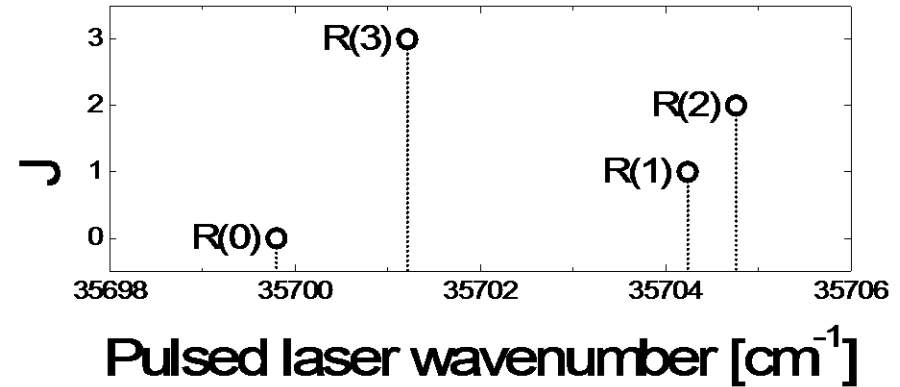
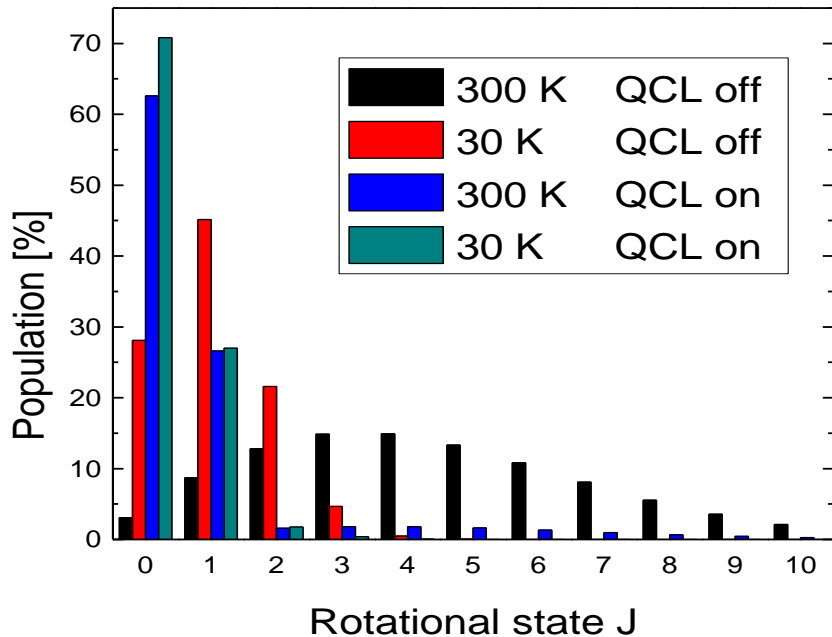
# Ostateczny cel – wszystkie jony w stanie podstawowym

## w stanie podstawowym





# Ostateczny cel – wszystkie jony w stanie podstawowym



# Chłodzenie gazem buforowym

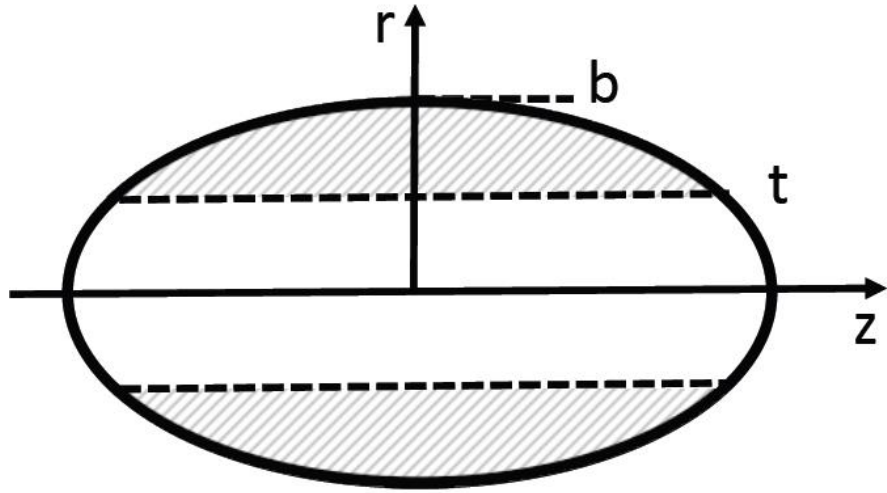
- Chłodzenie optyczne może okazać się niemożliwe dla wielu rodzajów jonów (bardziej złożona struktura, molekuły niepolarne)
- Szukamy bardziej uniwersalnego sposobu chłodzenia
- Jako gaz buforowy najwygodniejszy do zastosowania jest hel – niska temperatura skraplania, wysokie energie wzbudzenia i jonizacji
- Udało się schłodzić jony  $\text{MgH}^+$  do temperatury poniżej 8 K, co jest najniższą dotychczas uzyskana temperaturą dla ruchu rotacyjnego jonów molekularnych
- Eksperyment opisano w publikacji: A. K. Hansen, O. O. Versolato, Ł. Kłosowski, S. B. Christensen, A. Gingell, M. Schwarz, A. Windberger, J. Ullrich, J. R. Crespo Lopez-Urrutia, M. Drewsen, *Nature* **508** (03.04.2014) 76-79



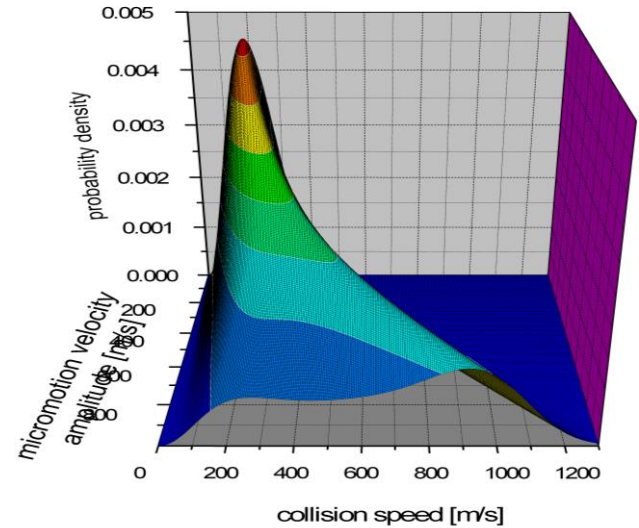
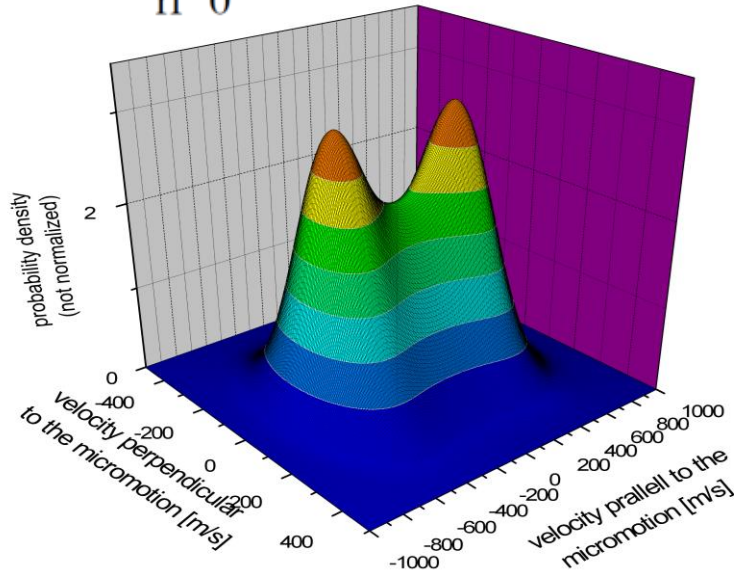
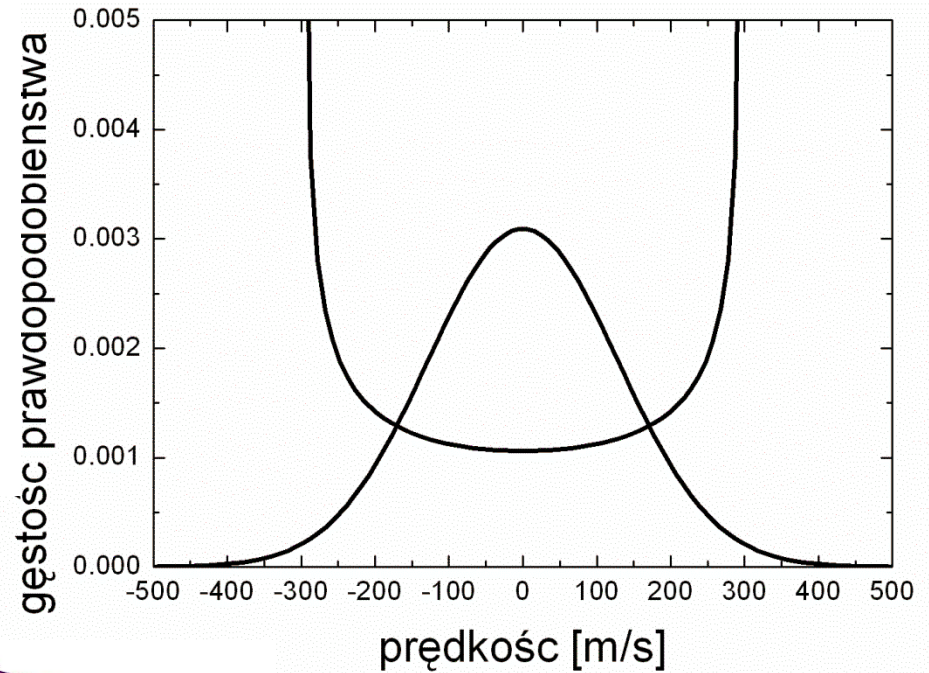
# Podstawowe pytania

- Jaka jest średnia energia zderzeń atom-jon w pułapce?
- Jaki jest rozkład statystyczny tej energii?
- Jak energia zderzenia zależy od warunków eksperymentu?
- Jak rozkład energii zderzeń wpływa na rozkład statystyczny stanów rotacyjnych jonu?
- Czy możliwa jest kontrola temperatury spułapkowanych jonów?

# Statystyczny rozkład prędkości zderzeń



$$E_{\text{avg}} = \frac{(2b^2 + 3t^2)}{20} \frac{e^2 U_{\text{rf}}^2}{\omega_{\text{rf}}^2 r_0^4 m}$$



# Średnia energia (temperatura) zderzenia jon-atom

W układzie środka masy: 
$$T_{coll} = \frac{25}{25 + 4} T_{He} + \frac{2}{3k_B} \frac{4}{(25 + 4)} E_{avg}$$

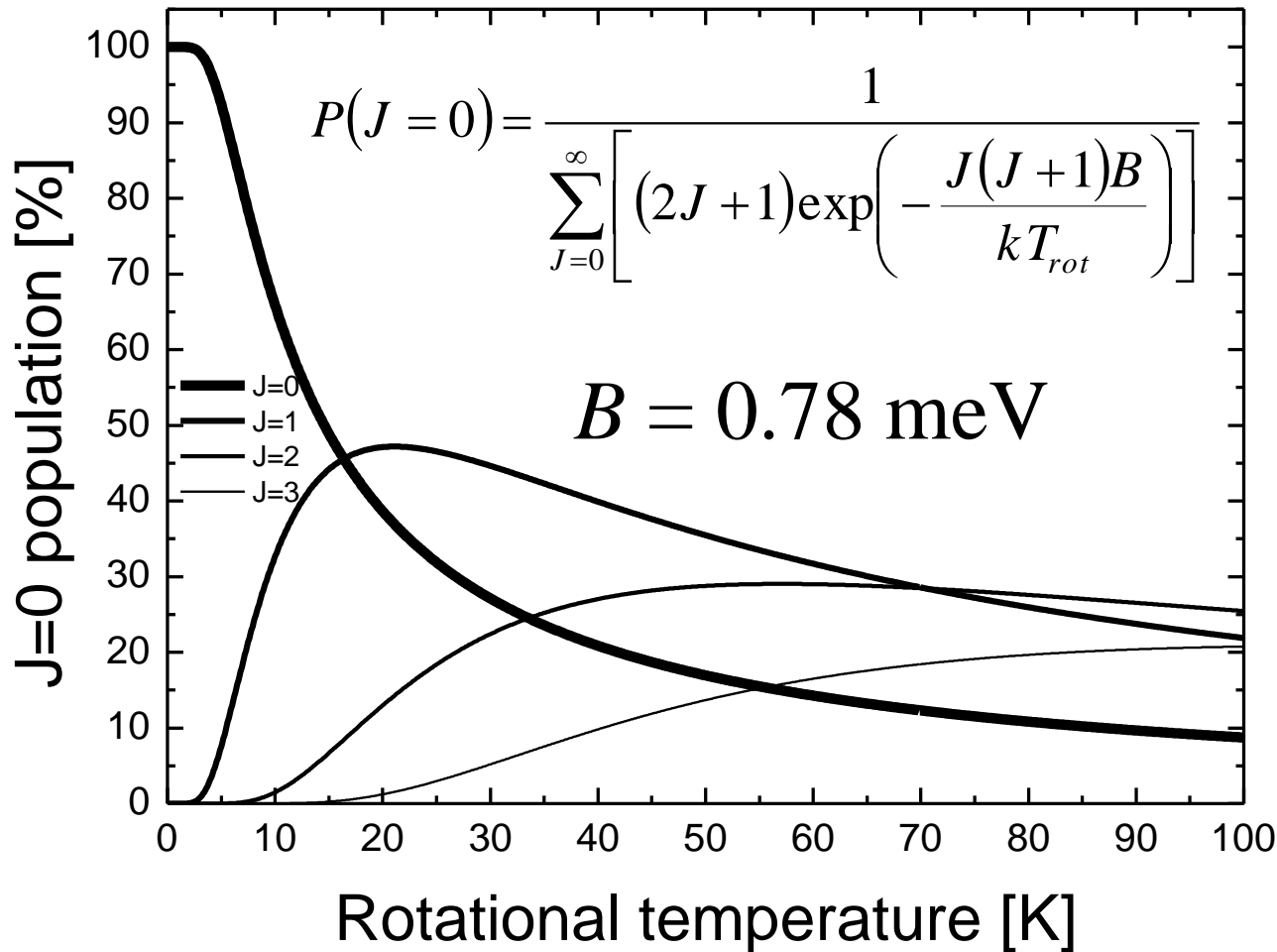
$$E_{avg} = \frac{(2b^2 + 3t^2)}{20} \frac{e^2 U_{rf}^2}{\omega_{rf}^2 r_0^4 m}$$

Fundamentalne pytania:

Jaka jest zależność między  $T_{coll}$  a  $T_{rot}$ ?  $T_{coll} = T_{rot}$  ?

Jaki jest rozkład obsadzeń stanów rotacyjnych przy nieboltzmannowskim rozkładzie energii zderzeń?

# Pomiar temperatury ruchu obrotowego jonu poprzez badanie populacji stanów rotacyjnych



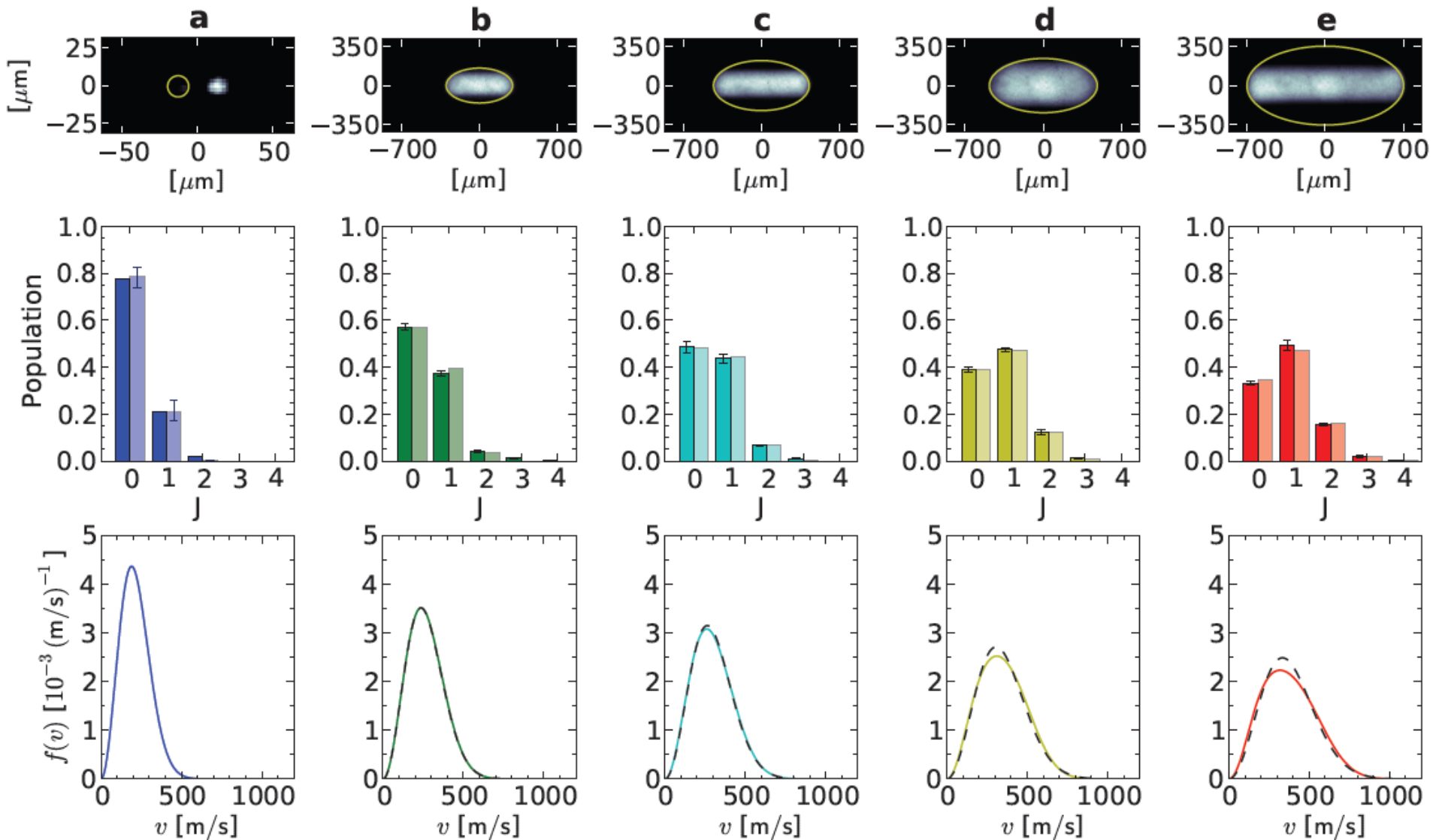
$$P(J=0) = \frac{1}{\sum_{J=0}^{\infty} \left[ (2J+1) \exp\left(-\frac{J(J+1)B}{kT_{rot}}\right) \right]}$$

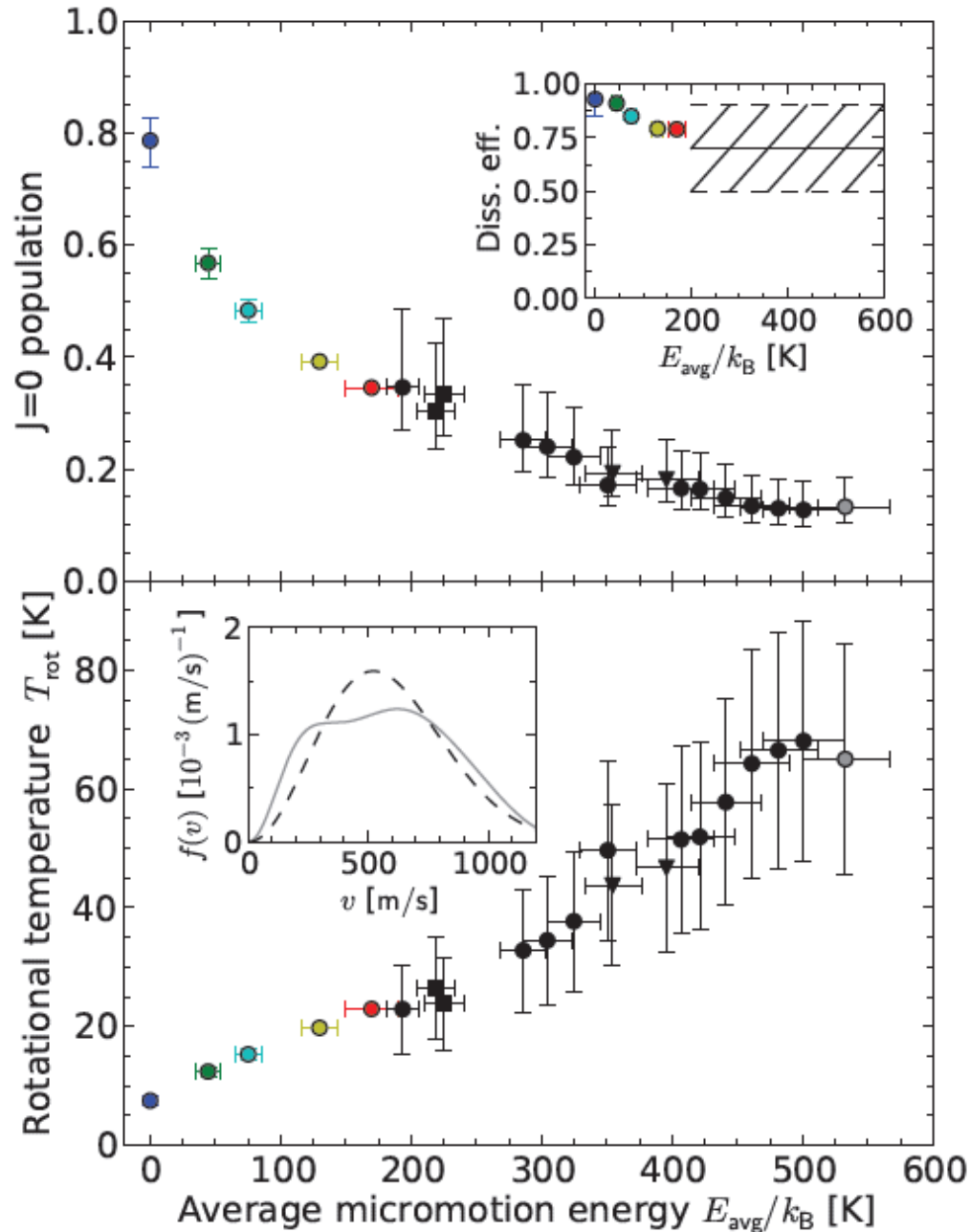
$$P(J=1) = \frac{3 \exp\left(-\frac{2B}{kT_{rot}}\right)}{\sum_{J=0}^{\infty} \left[ (2J+1) \exp\left(-\frac{J(J+1)B}{kT_{rot}}\right) \right]}$$

$$P(J=2) = \frac{5 \exp\left(-\frac{6B}{kT_{rot}}\right)}{\sum_{J=0}^{\infty} \left[ (2J+1) \exp\left(-\frac{J(J+1)B}{kT_{rot}}\right) \right]}$$

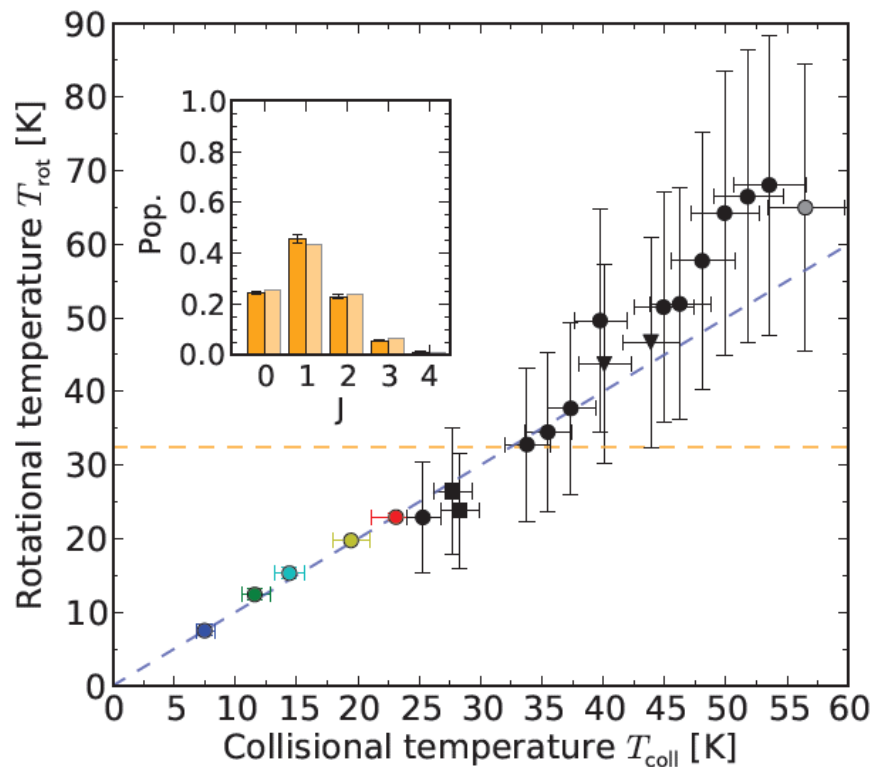
$$P(J=3) = \frac{7 \exp\left(-\frac{12B}{kT_{rot}}\right)}{\sum_{J=0}^{\infty} \left[ (2J+1) \exp\left(-\frac{J(J+1)B}{kT_{rot}}\right) \right]}$$

# Obserwowane stany rotacyjne w zależności od geometrii kryształu





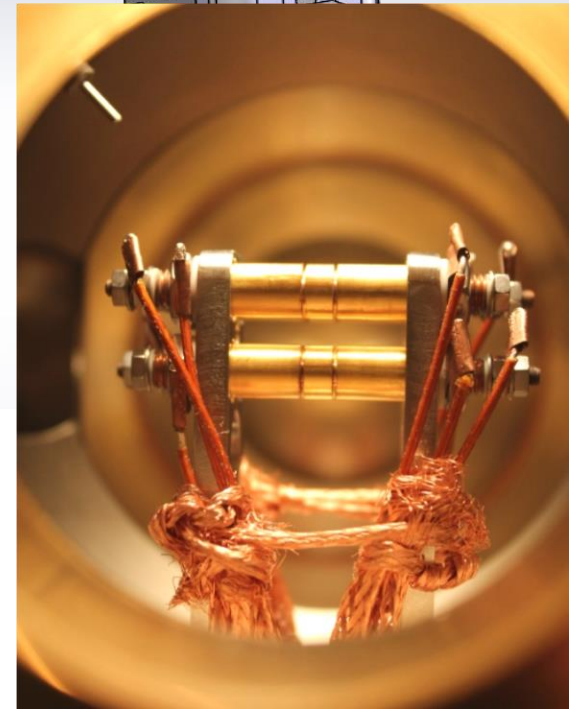
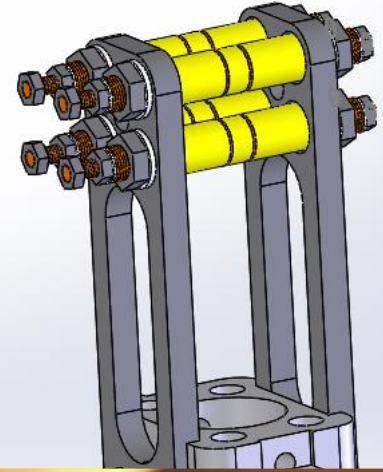
$$T_{coll} = \frac{25}{29} T_{He} + \frac{8}{87 k_B} E_{avg}$$



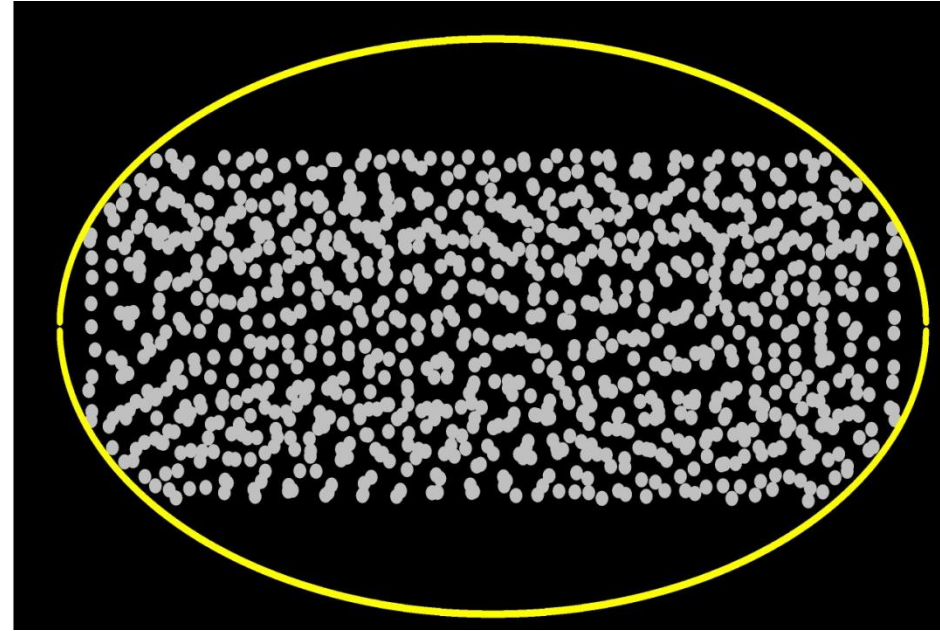
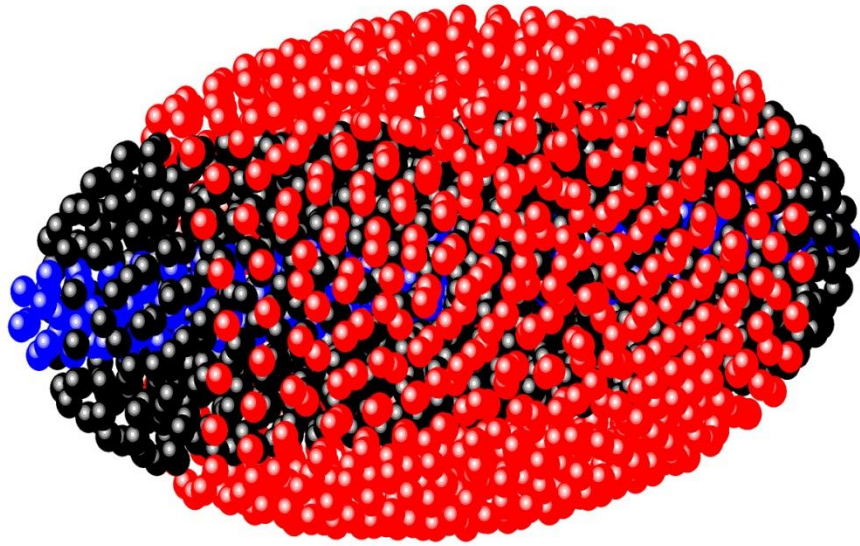


# Eksperyment w KL FAMO w Toruniu

- Jony molekularne chłodzone translacyjnie za pośrednictwem jonów wapnia (masa 40 lub 44)
- Szeroki wybór jonów molekularnych (masy z zakresu od 20 do 100), zaczynając od  $\text{CO}_2^+$  (masa 44)
- Jonizacja w zderzeniach z elektronami
- Grant NCN na lata 2015-2018
- **Poszukiwani doktoranci !!!**

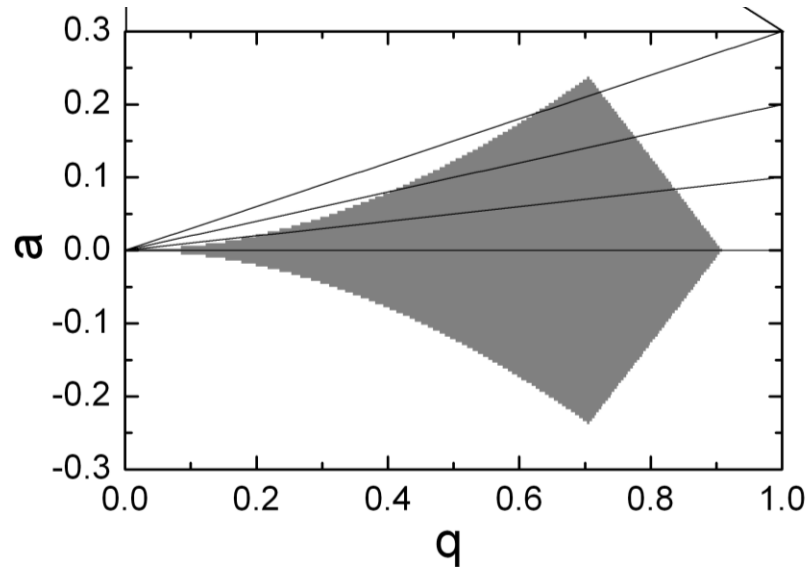


# Kryształ wieloskładnikowy



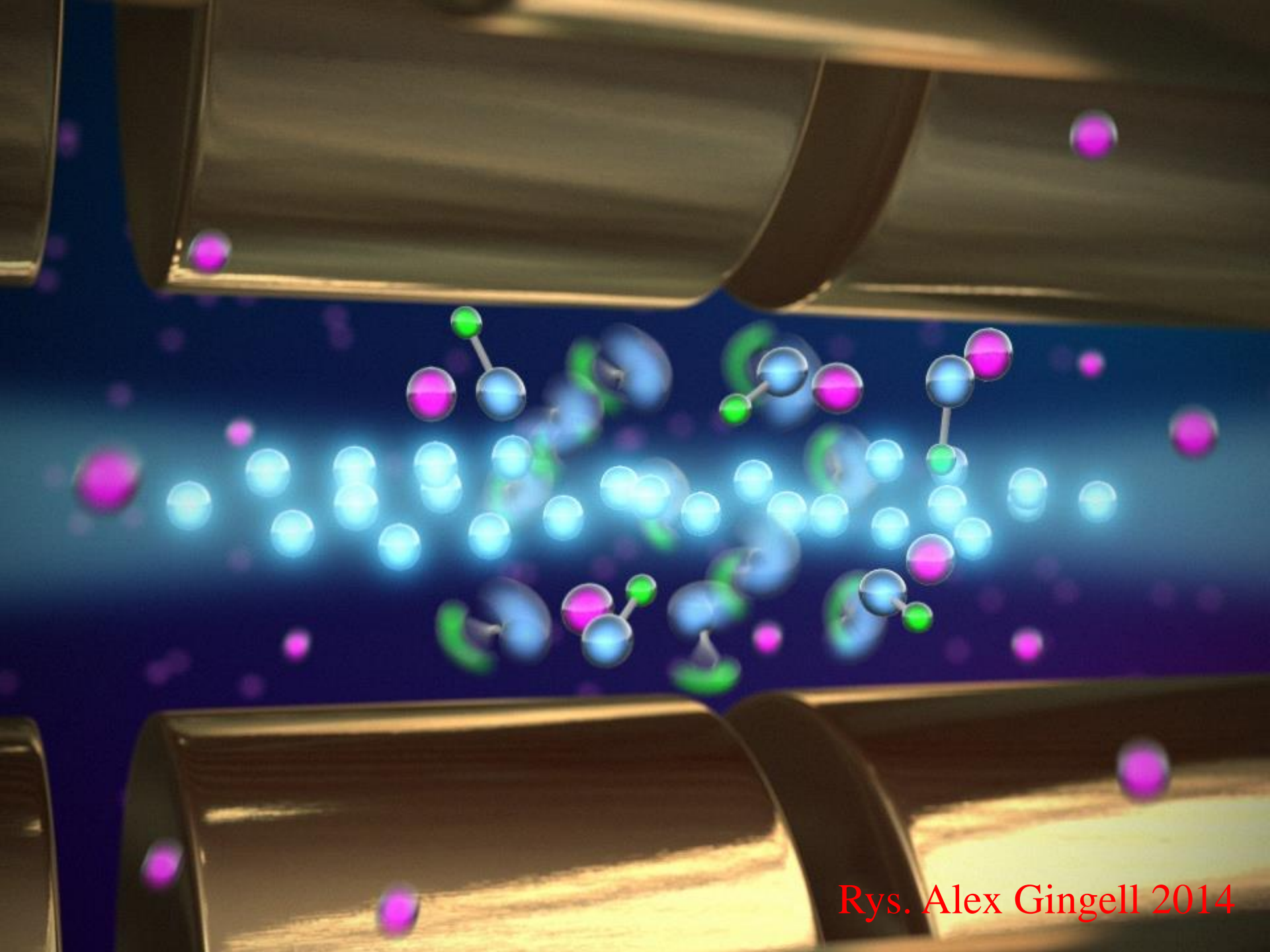
$$a = 4 \frac{QU_0}{Md^2\Omega^2}$$

$$q = 2 \frac{QV_0}{Md^2\Omega^2}$$



# Spodziewane rezultaty

- Otrzymanie schłodzonego zespołu jonów molekularnych o kontrolowanym składzie
- Przygotowanie do badań spektroskopowych takiego zespołu
- Metoda pomiaru przekroju czynnego na jonizację z zastosowaniem pułapki zasilanej napięciem impulsowym
- Badanie właściwości kryształu kulombowskiego o składnikach ze zbliżoną masą (np.  $\text{CO}_2$  i  $^{44}\text{Ca}$ )



Rys. Alex Gingell 2014