

Ultradźwięmne kontrolowane zderzenia jonów i atomów

Michał Tomza

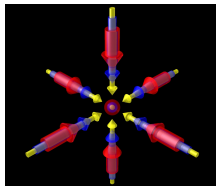
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Uniwersytet Śląski,
4 grudnia 2020

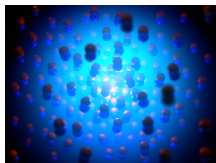
Czym jest ultrazimna materia?



Zimne ($< 1\text{K}$) i ultrazimne ($< 1\text{mK}$) gazy atomów lub cząsteczek o małej gęstości ($10^{11} - 10^{15}\text{cm}^{-3}$)



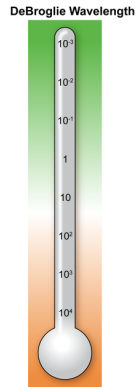
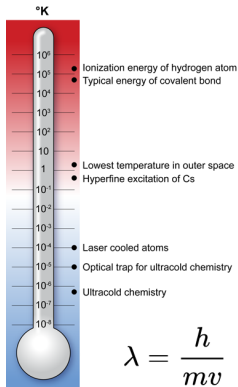
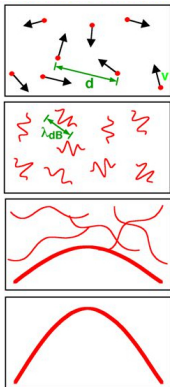
Pułapkowane w polu magnetycznym, elektrycznym lub laserowym



W pełni kontrolowane syntetyczne obiekty kwantowe

Najzimniejsze miejsca na Ziemi i w znanym Wszechświecie

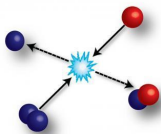
Eksperymenty z ultrazimnymi atomami: $100 \text{ nK} = 10^{-7} \text{ K}$



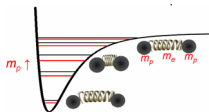
Rekord: $500 \text{ pK} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ K} \rightarrow 100 \text{ pK}$

Science 301, 1513 (2003)

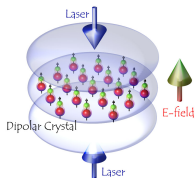
Dlaczego warto badać ultrazimną materię?



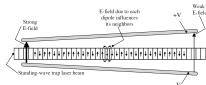
Ultrazimne kontrolowalne **zderzenia i reakcje chemiczne**



Dokładne pomiary i **testy** podstawowych **praw natury**

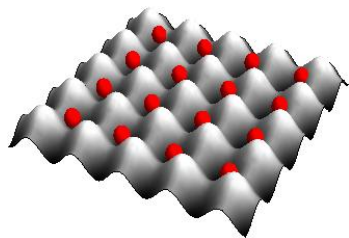
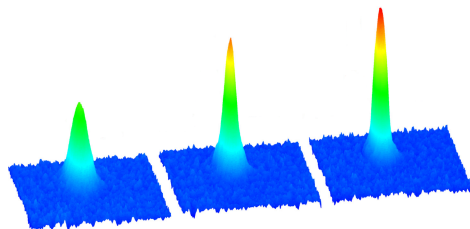


Symulacje kwantowe właściwości **zaawansowanych materiałów**



Obliczenia kwantowe i **technologie** kwantowe

Ultrazimne kontrolowane zderzenia jonów i atomów

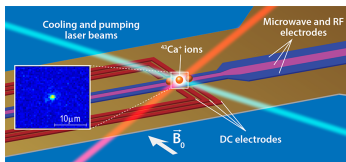
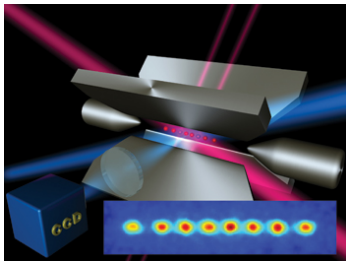


(względnie)

- **duża liczba** atomów
- **długi** czas spójności
- w pełni **kontrolowalne**
- naturalna statystyka **bozonów/fermionów**
- **kwantowa** materia

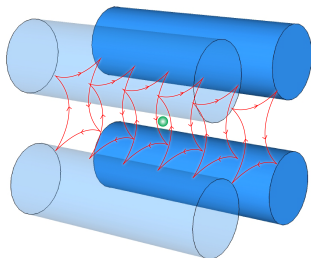
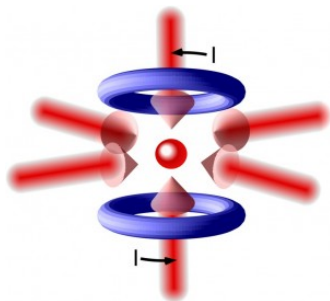
Zimne jony w pułapce

Leibfried et al., Rev. Mod. Phys. 75, 281, (2003)



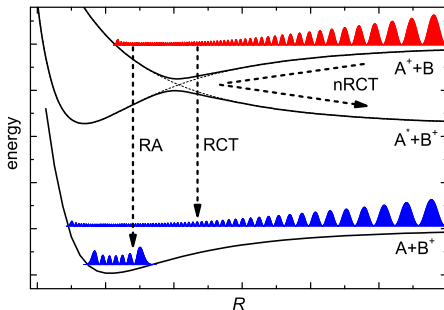
- **mniejsza liczba jonów**
- **silne** oddziaływania
- w pełni **kontrolowalne**
- zastosowania **technologiczne**

Połączenie najlepszych cech dwóch światów



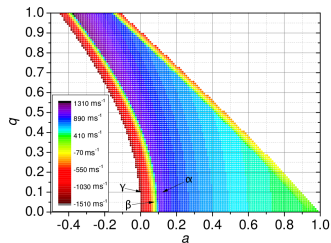
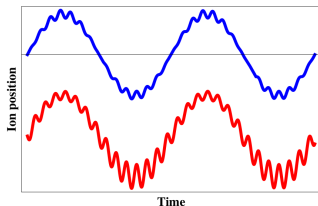
ultrazimne **atomy** + chłodzone laserowo **jony**

Mikroskopowa teoria mieszanin jonów z atomami



Wyzwania

- **Straty** związane z (nie)radiacyjnym przeniesieniem ładunku i asocjacją
- **Kontrola** siły oddziaływania pomiędzy jonem i atomem
- Osiągnięcie reżimu **kwantowego** pojedynczych fal parcjalnych
- Limit temperatury z powodu **mikroruchu** w pułapce Paul



Mikroruchu w pułapce Paula **utrudnia** osiągnięcie ultraniskich temperature

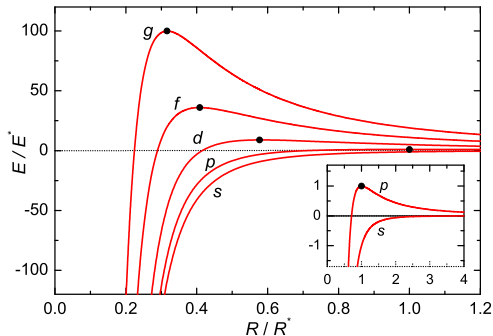
Krych and Idziaszek, Phys. Rev. A 91, 023430 (2015)

Chen et al., Phys. Rev. Lett. 112, 143009 (2014)

Cetina et al., Phys. Rev. Lett. 109, 253201 (2012)

Reżim kwantowy pojedynczych fal parcjalnych

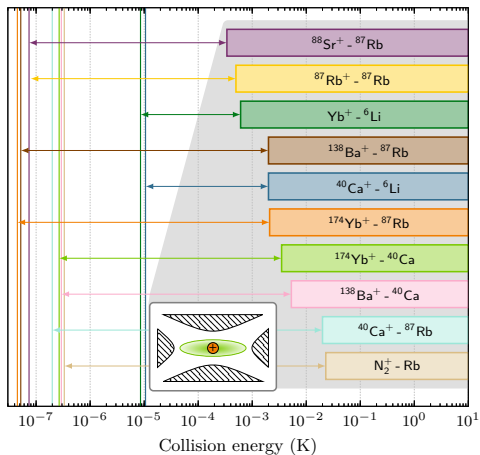
Bariera odśrodkowa w rozkładzie na fale parcjalne:



$$V(R) \rightarrow -\frac{C_4}{R^4}, \quad E^* = \frac{\hbar^2}{2\mu(R^*)^2}, \quad R^* = \sqrt{\frac{2\mu C_4}{\hbar^2}}$$

reżim kwantowy fali s : $E_{\text{coll}} \leq E^*$

Doświadczalne realizacje przed 2018

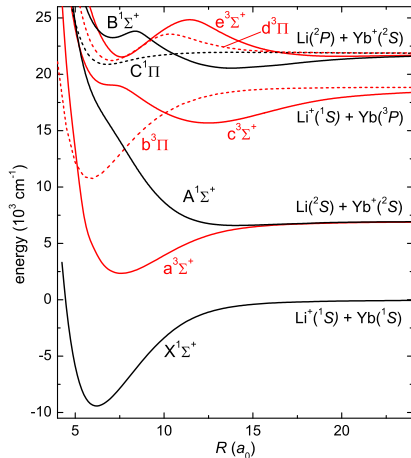


$$V(R) \rightarrow -\frac{C_4}{R^4}, \quad E^* = \frac{\hbar^2}{2\mu(R^*)^2}, \quad R^* = \sqrt{\frac{2\mu C_4}{\hbar^2}}$$

Korzystna mieszanina $\text{Yb}^+ + \text{Li}$

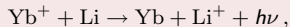
Struktura elektronowa ab initio

M. Tomza et al., Phys. Rev. A 91, 042706 (2015)

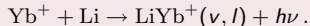


Straty radiacyjne?

Spontaniczne radiacyjne **przeniesienie ładunku**,

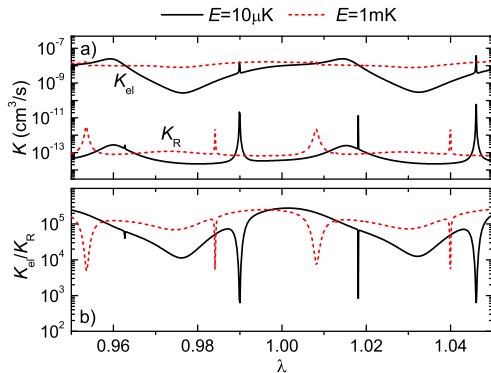


albo radiacyjna **asocjacja**,



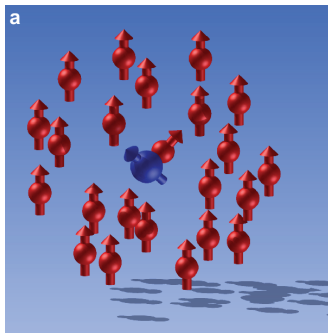
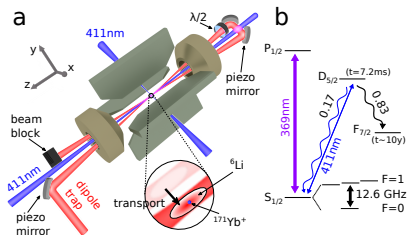
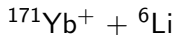
Zderzenia elastyczne versus reaktywne

M. Tomza et al., Phys. Rev. A 91, 042706 (2015)



Eksperyment Prof. Rene Gerritsmy na Uni. w Amsterdamie

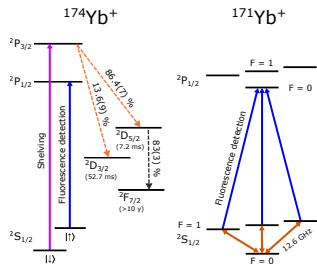
J. Joger, H. Furst, N. Ewald, T. Feldker, M. Tomza, R. Gerritsma, Phys. Rev. A 96, 030703(R) (2017)



Transfer ładunku

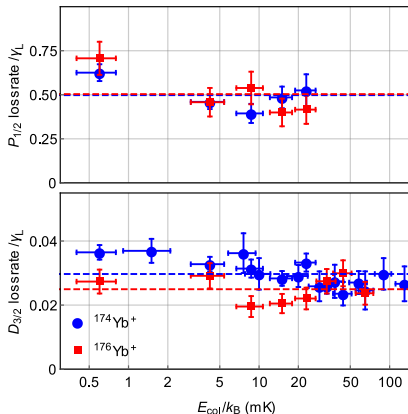
Transfer ładunku versus izotop i stan elektronowy

J. Joger et al., Phys. Rev. A 96, 030703(R) (2017)



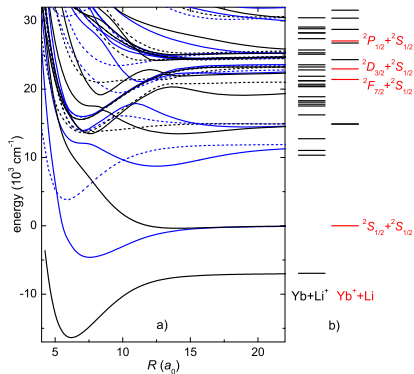
State	$^{174}\text{Yb}^+$	$^{176}\text{Yb}^+$	$^{171}\text{Yb}^+$
$^2S_{1/2}$	$\leq 10^{-3}$	$\leq 2 \times 10^{-4}$	$\leq 2 \times 10^{-4}$
$^2P_{1/2}$	0.50(4)(20)	0.50(6)(20)	–
$^2D_{3/2}$	0.030(1)(11)	0.025(1)(10)	–
$^2F_{7/2}$	0.46(3)(16)	0.41(3)(14)	–

Table: Loss rates in units of Langevin collisions for the isotopes $^{174}\text{Yb}^+$, $^{176}\text{Yb}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$ in ground and excited states at a collision energy of $E_{\text{col}}/k_B = 1 \text{ mK}$.



Transfer ładunku we wzbudzonych stanach elektronowych?

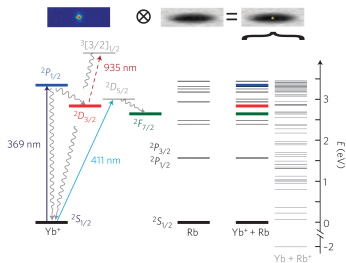
J. Joger et al., Phys. Rev. A 96, 030703(R) (2017)



Duże sprzężenie spin-orbit
 $(^2F_{7/2} \gg ^2P_{1/2} > ^2D_{3/2})$?
 Duża gęstość stanów?
 Natura stanów sąsiednich?

Comparison to $\text{Yb}^+ + \text{Rb}$

L. Ratschbacher et al., Nature Phys. 8, 649 (2012)



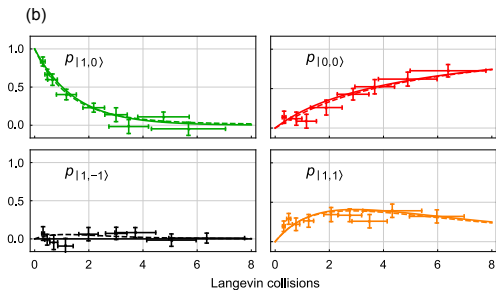
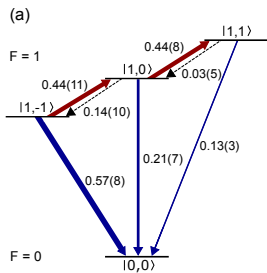
Przeciwne zachowanie dla $^2F_{7/2}$ i $^2D_{3/2}$

Jakościowe wyjaśnienie:
Natura stanów sąsiednich!

Dynamika spinu

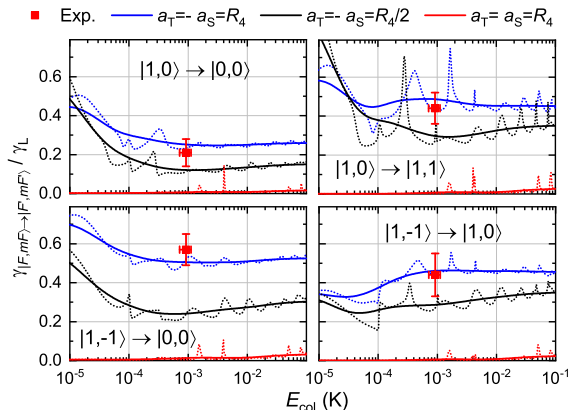
Dynamika pojedynczego spinu domieszki - doświadczenie

H. Furst, T. Feldker, N. Ewald, J. Joger, M. Tomza, R. Gerritsma, Phys. Rev. A 98, 012713 (2018)



Dynamika pojedynczego spinu domieszki - teoria

H. Furst, T. Feldker, N. Ewald, J. Joger, M. Tomza, R. Gerritsma, Phys. Rev. A 98, 012713 (2018)

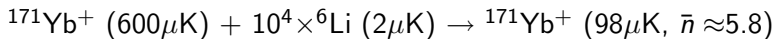
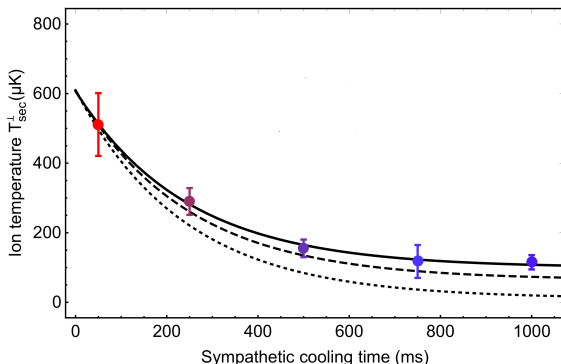


$$\sigma(E)_{\text{ex}} \approx \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \sin^2(\delta_l^S(E) - \delta_l^T(E))$$

Reżim kwantowy

Chłodzenie jonu przez zderzenia z ultrazimnymi atomami

Feldker, Fürst, Hirzler, Ewald, Mazzanti, Wiater, Tomza, Gerritsma, Nature Phys. 16, 413 (2020)



Energia zderzenia w układzie środka masy

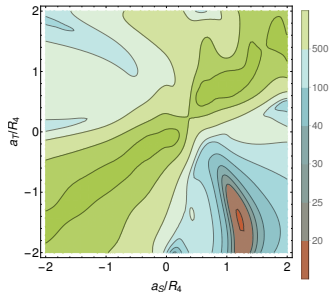
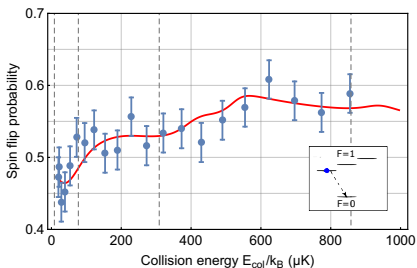
Feldker, Fürst, Hirzler, Ewald, Mazzanti, Wiater, Tomza, Gerritsma, Nature Phys. 16, 413 (2020)

$$E_{\text{coll}} = \frac{\mu}{m_i} E_i + \frac{\mu}{m_a} E_a, \quad m_i \gg \mu$$

Type of motion	$E_{\text{kin}}/k_B (\mu\text{K})$	$E_{\text{col}}/k_B (\mu\text{K})$
Radial secular ion	$2 \times 21(9)$	1.4(0.6)
Intrinsic micromotion	$2 \times 21(9)$	1.4(0.6)
Axial secular ion	65(18)	2.2(0.4)
Excess micromotion	44(13)	1.5(0.4)
Total ion energy	193(42)	6.6(1.4)
Atom temperature	$3/2 \times 2.3(0.4)$	3.3(0.6)
Total collision energy	—	9.9(2.0)

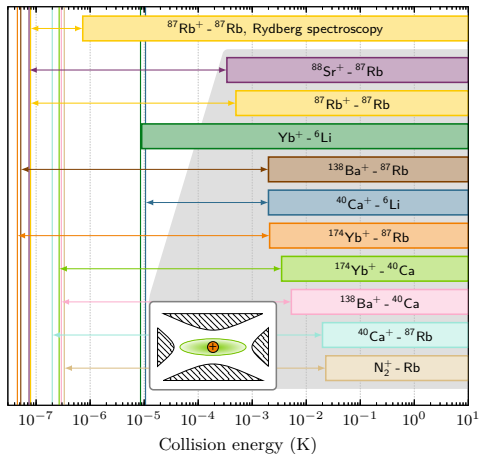
Pierwszy pomiar rezonansów kształtu

Feldker, Fürst, Hinzler, Ewald, Mazzanti, Wiater, Tomza, Gerritsma, Nature Phys. 16, 413 (2020)



$$a_S = 1.2(0.3)R^*, \quad a_T = -1.5(0.7)R^*$$

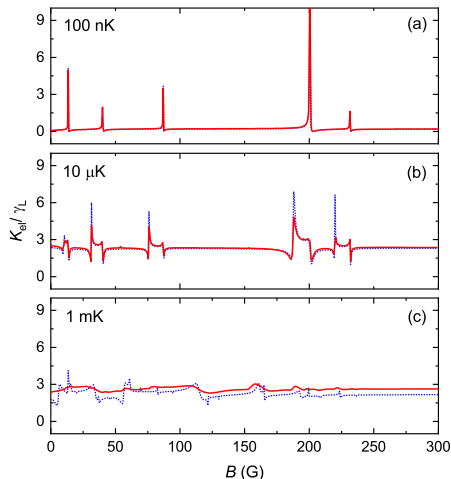
Doświadczalne realizacje w 2020



$$E^* = \frac{\hbar^2}{2\mu(R^*)^2}, \quad R^* = \sqrt{\frac{2\mu C_4}{\hbar^2}}$$

Perspektywa magnetycznych rezonansów Feshbacha

H. Furst, T. Feldker, N. Ewald, J. Joger, M. Tomza, R. Gerritsma, Phys. Rev. A 98, 012713 (2018)



Doświadczalno-teoretyczne wyniki z grupą Prof. Schaetza wkrótce...

- Obserwacja **zimnych** zderzeń pomiędzy jonami Yb^+ i atomami Li
- Dynamika pojedynczego **spinu domieszki** w łaźni spinowo-spolaryzowanych atomów
- **Chłodzenie** jonu przez **zderzenia** z ultrazimnymi atomami do **reżimu kwantowego**
- Obserwacja **rezonansów kształtu** i wyznaczenie **długości rozpraszania**

Quantum Molecular Systems Group

Faculty of Physics, University of Warsaw



Postdocs: dr M. Gronowski, dr P. Gniewek

Ph.D. students: A. Dawid, M. Śmiałkowski, K. Zaremba-Kopczyk, D. Wiater, Sangami G. S.

M.Sc. students: J. Gębała, A. Koza, A. Wojciechowska, M. Suchorowski

B.Sc. Students: M. Walewski, M. Osada

Funding:



Foundation for
Polish Science



NATIONAL SCIENCE CENTRE
POLAND

Dziękuję za uwagę!