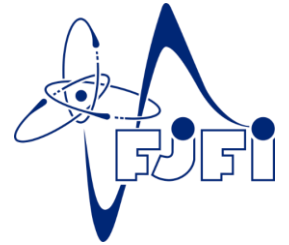


# Betatronové záření z LWFA a jeho použití pro ultrarychlou spektroskopii

**Lenka Hronova**

Školitelka: MSci Kateřina Falk, PhD

LWFA = Laser Wakefield Acceleration

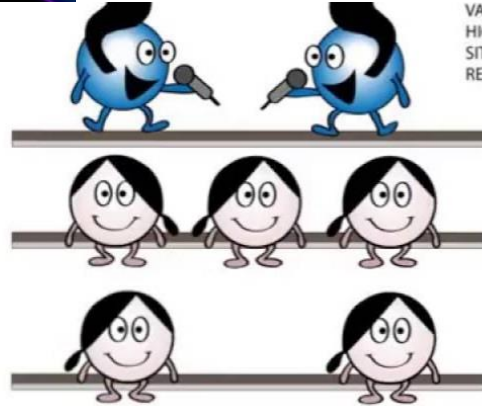
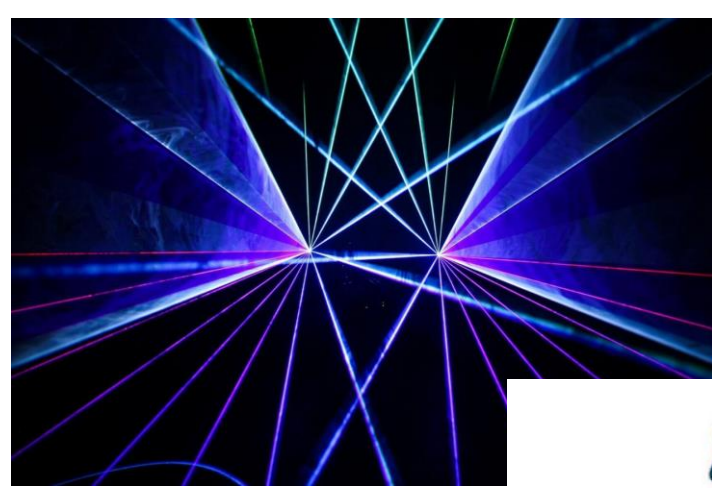


**HZDR**

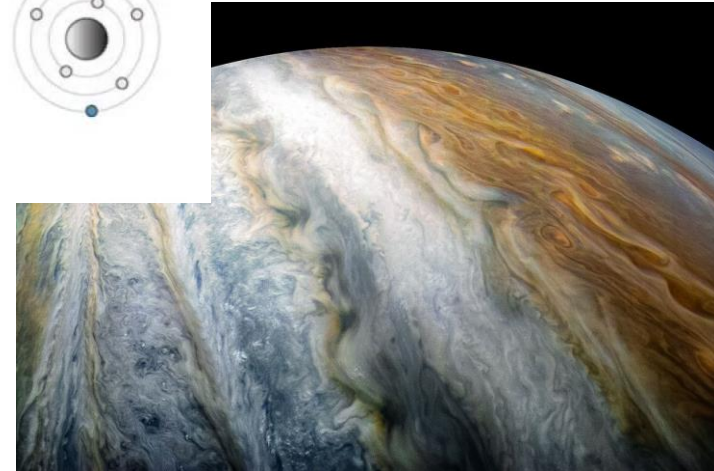
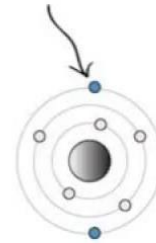
 **HELMHOLTZ**  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF



HZDR Summer Student Programme 2018

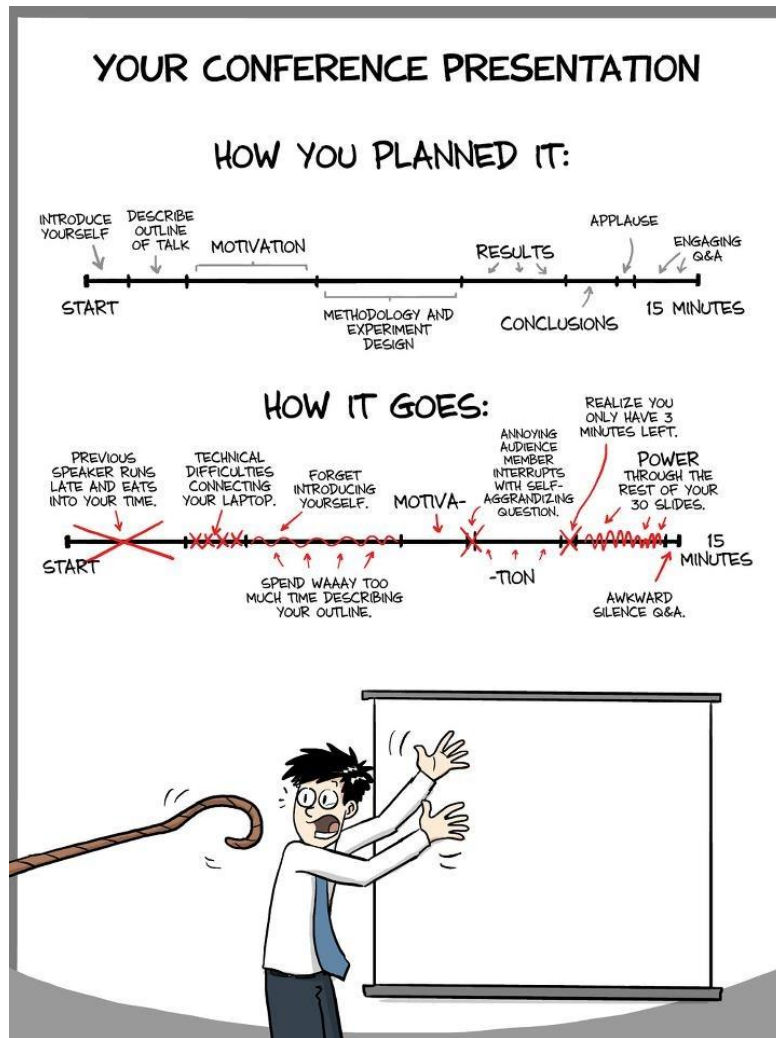


VALENCE ELECTRONS  
HIGHEST ENERGY LEVEL  
SITS ON THE OUTERMOST SHELL  
RESPONSIBLE FOR BONDING



# Obsah

- Motivace a teorie
  - Urychlování elektronů na plazmové vlně
  - Vznik betatronového záření
  - Warm dense matter (WDM) a X-ray absorption near edge structure (XANES)
- Experiment
  - Popis a cíle měření
  - Stavba v malé laboratoři
  - První výsledky
  - Měření s apodizérem
  - Stavba ve velké laboratoři
  - Zpožd'ovací úsek a zobrazovací diagnostika
- Shrnutí



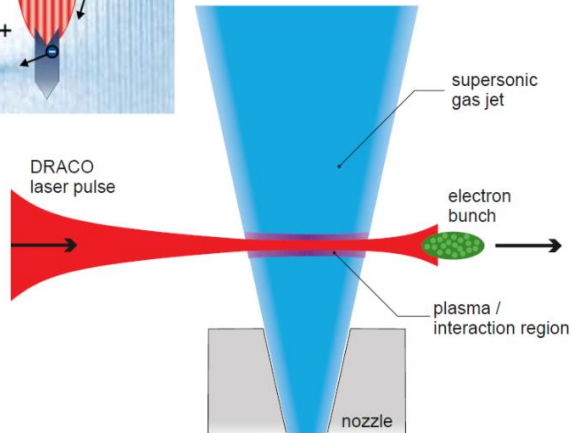
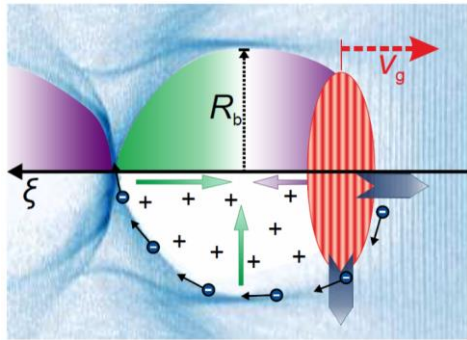
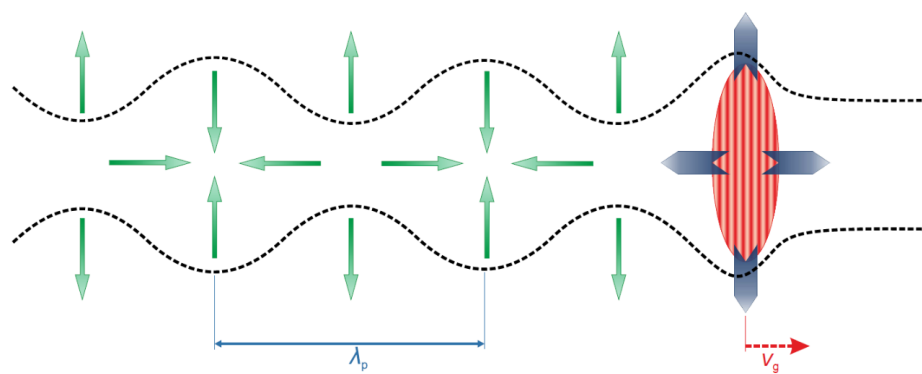


**Motivace a teorie**

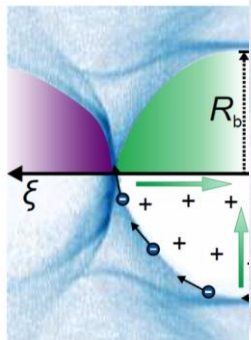
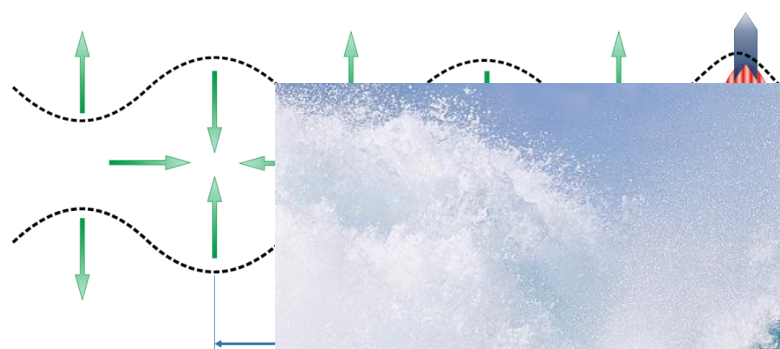
**JUST DO IT.**



# Urychlování elektronů na plazmové vlně



- Ultrakrátký laserový pulz o vysoké intenzitě
- Průchod pulzu plynem (He, Ar) způsobuje jeho ionizaci a ponderomotivní síla laseru odmršťuje elektrony z cesty pulzu
- Vznik nábojové separace => vznik plazmové vlny
- Elektrony zachycené v plazmové vlně jsou urychleny



ů na

é

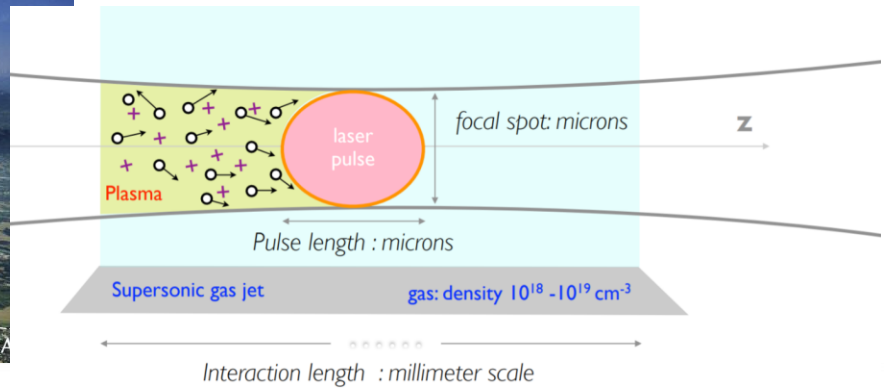
šťuje

k

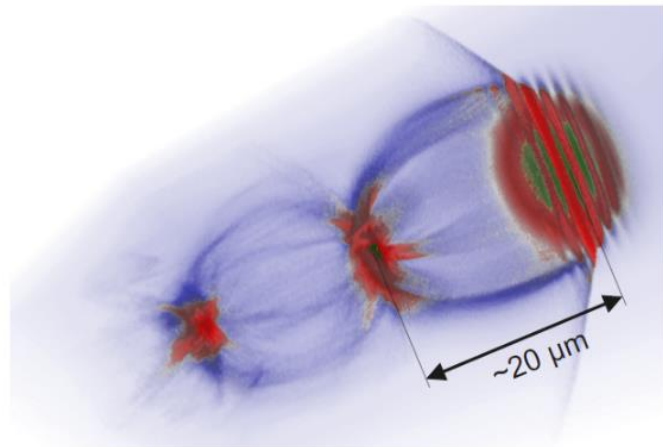
vlně



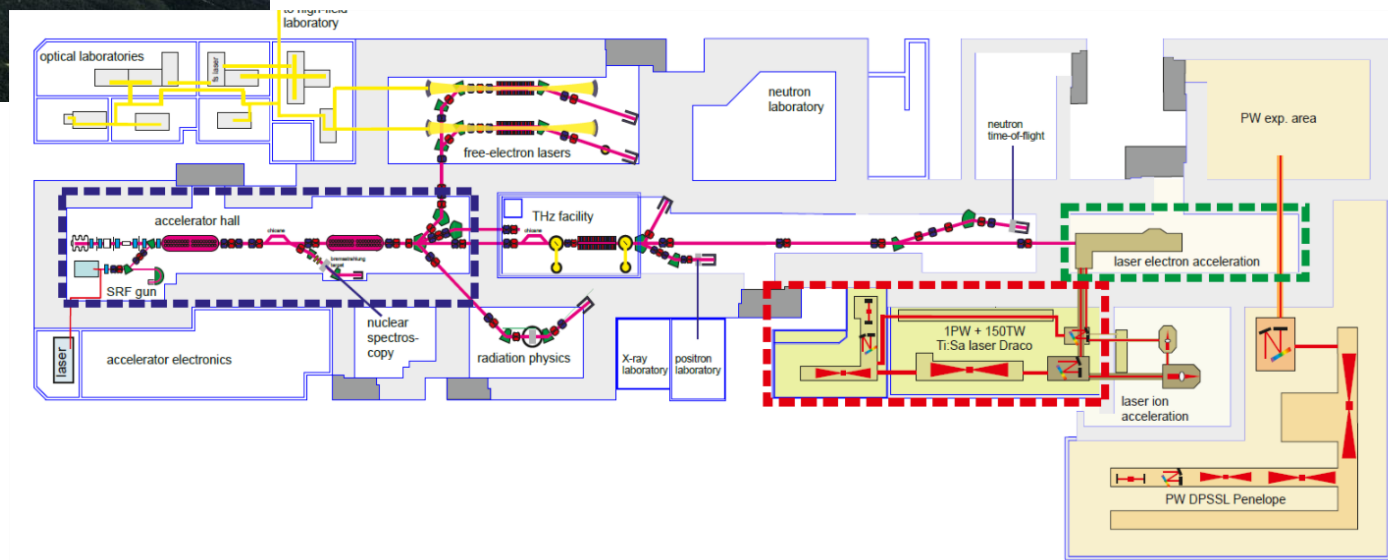


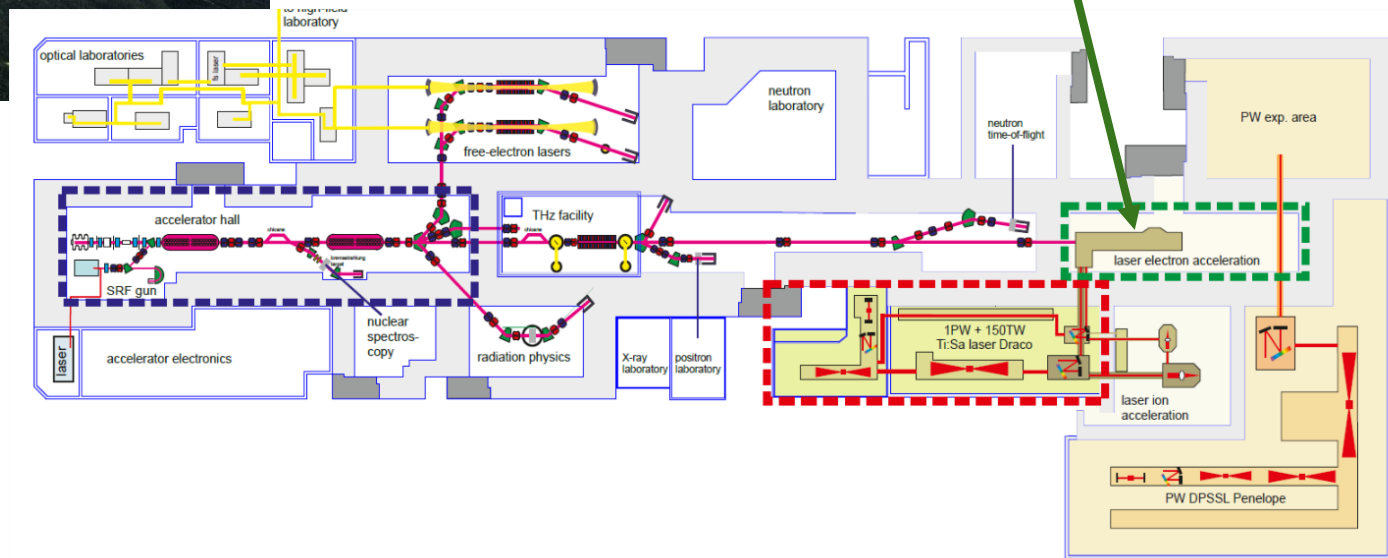


(a) Conventional rf cavity

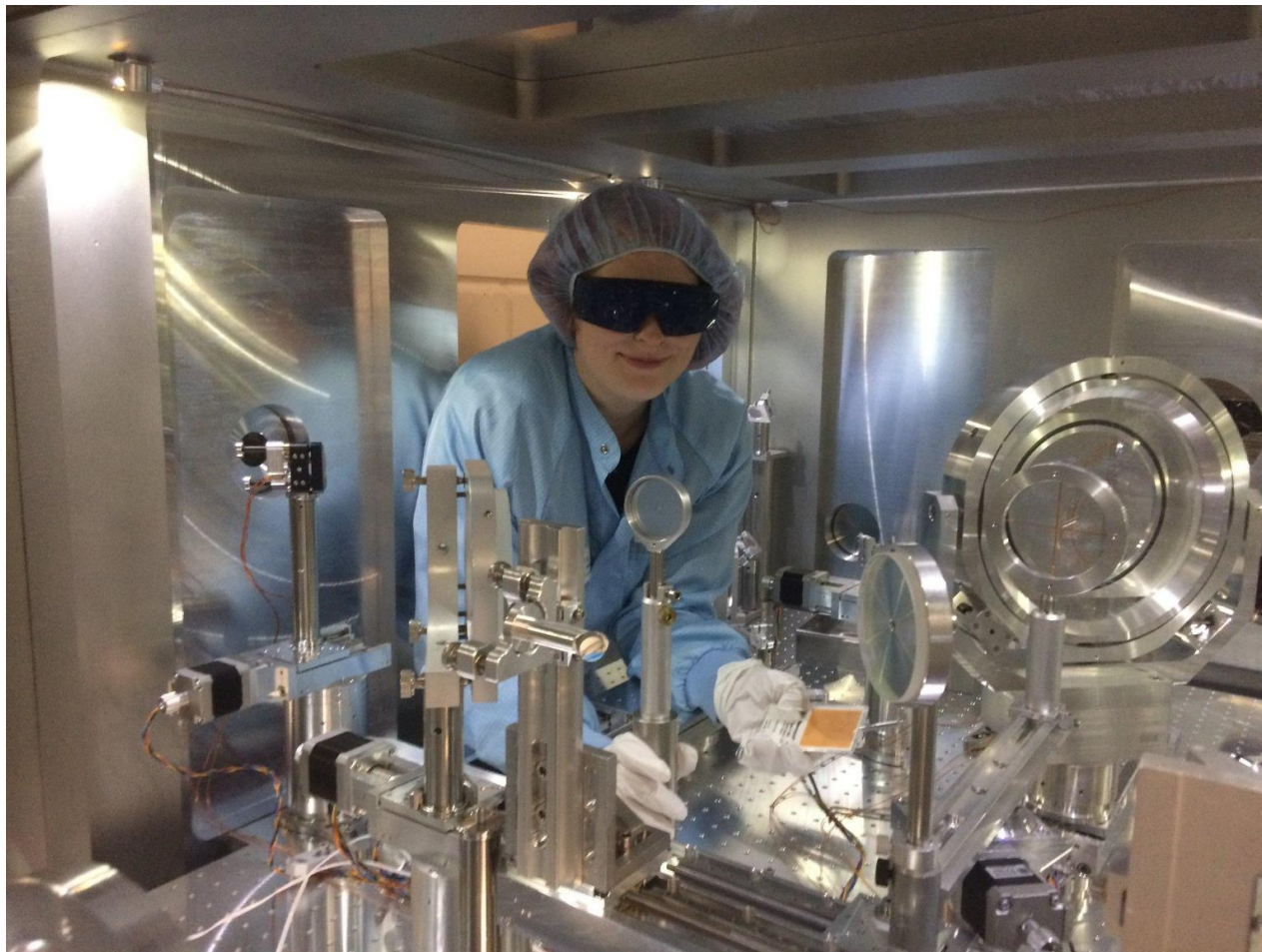


(b) Laser driven plasma cavity, PIConGPU render



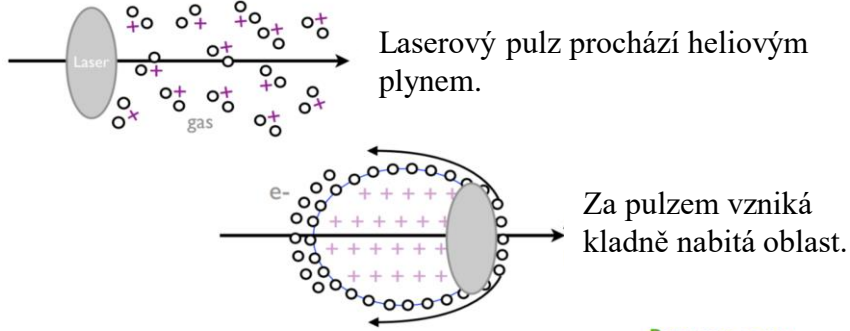




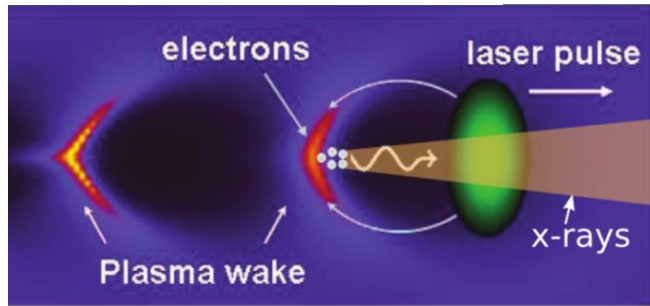
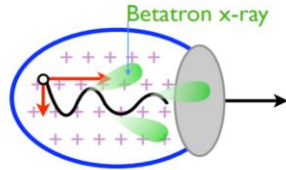




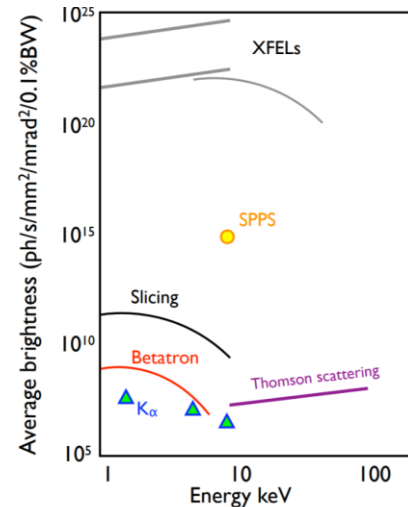
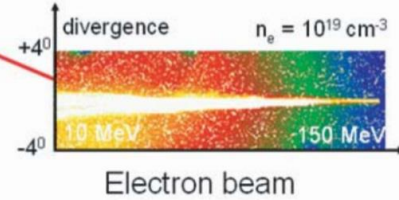
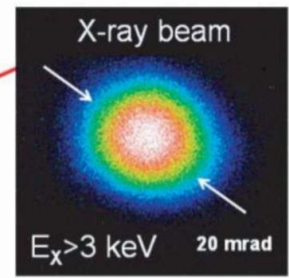
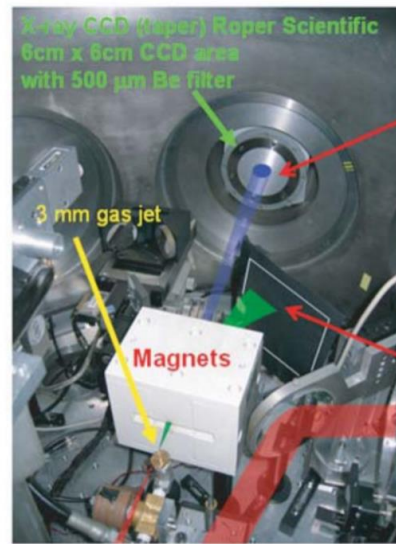
# Vznik betatronového záření



Zachycené elektrony jsou urychlovány a oscilují (betatronové oscilace). Jako důsledek těchto oscilací vzniká rentgenové záření.

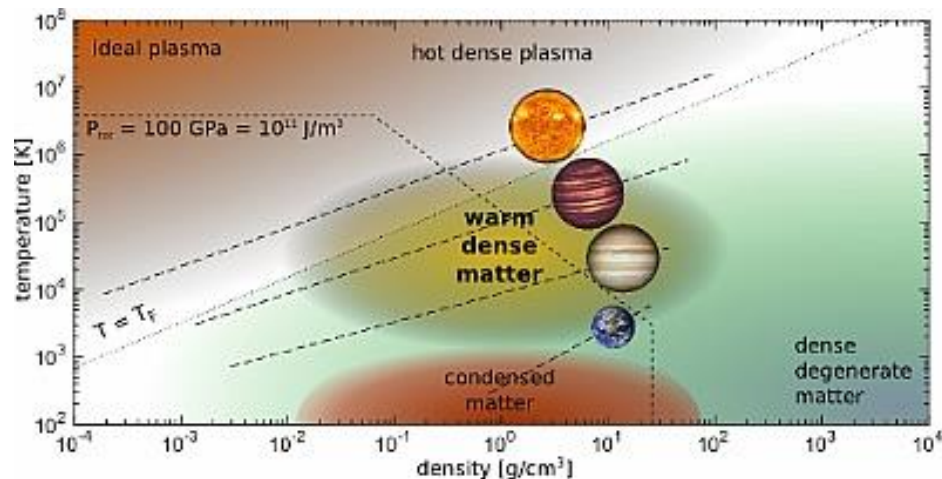


adapted from [Malik, proceedings IPAC2013]

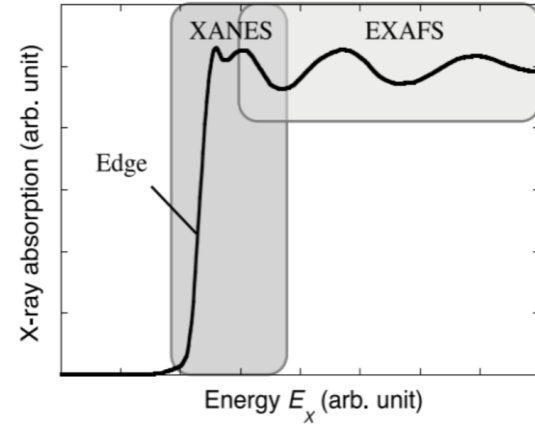


# Warm dense matter (WDM)

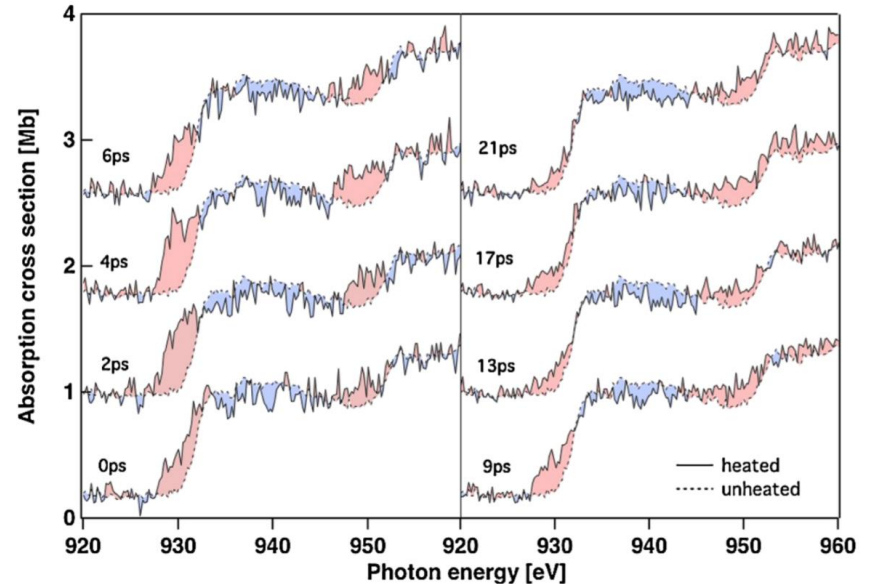
- Přechodný stav mezi pevnou látkou a plazmatem
  - Ionty - silně spojené vazbami mezi sebou, ale nemají pevnou strukturu
  - Elektronky - plně nebo částečně kvantově degenerované



# X-ray absorption near edge structure (XANES)



- Diagnostická metoda zkoumající rentgenové záření těsně nad K-edge
  - Absorbční peaky odpovídají prostorovému rozložení iontů
  - Sklon K-edge odpovídá hustotě volných stavů  $\sim$  teplotě



# Experiment

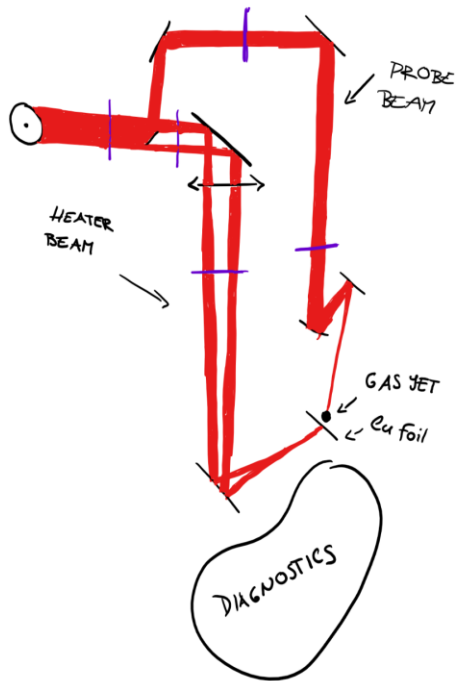


JORGE CHAM © 2016

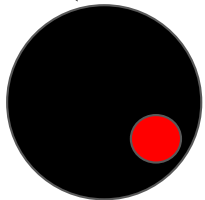
$$\text{PROBABILITY YOUR EQUIPMENT WILL WORK} = \frac{1}{\text{YOUR MOTIVATION TO WORK}}$$



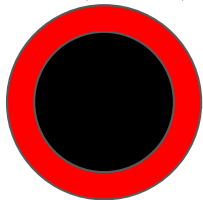
# Popis a cíle měření



Before (Lunt - LLC)



Now (Dresden)

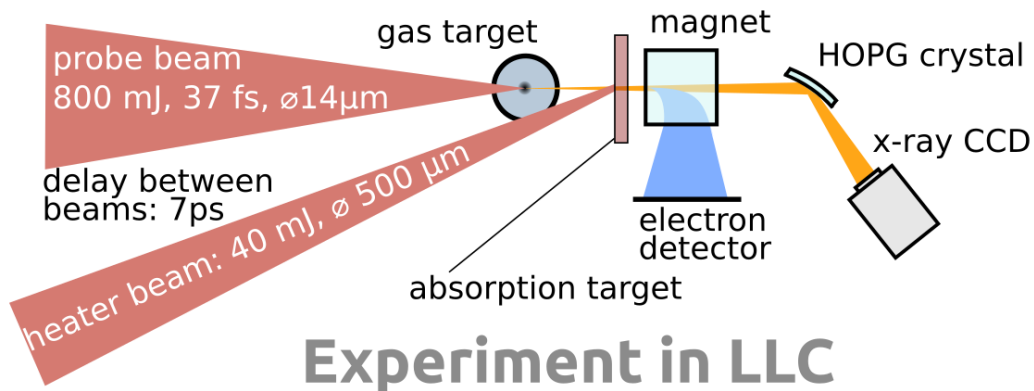


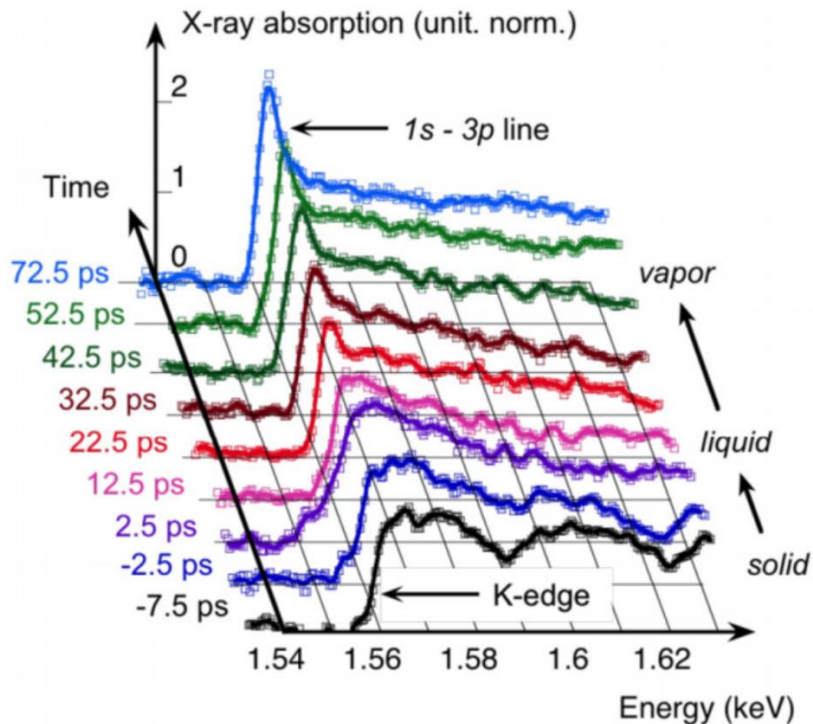
- Warm dense copper - chceme zkoumat strukturu zahřáté Cu folie
- **Probe beam:** LWFA k urychlení elektronů a vzniku betatronového záření
- **Heater beam:** na zahřátí terče - Cu folie
- Třeba rozdělení jednoho velkého svazku do dvou

## Cíle

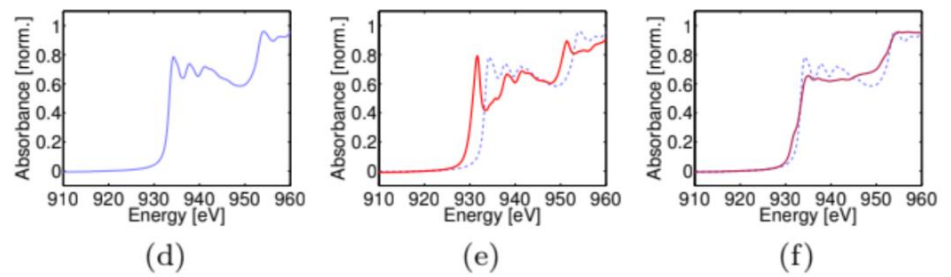
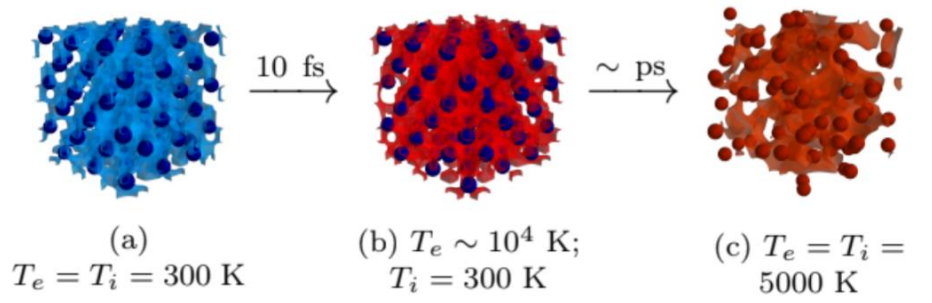
- Fokusování prstencového svazku - parabola nebo čočka?
- Stavba dráhy po obě části laseru
- Provedení potřebných výpočtů, stavba zpoždovacího úseku
- Stavba zobrazovací diagnostiky laserového ohniska “heater beamu”

adapted from [Smid et al., RSI 88, 063102 (2017)]





Ultrarychlý nerovnovážný přechod pevné látky ve WDM

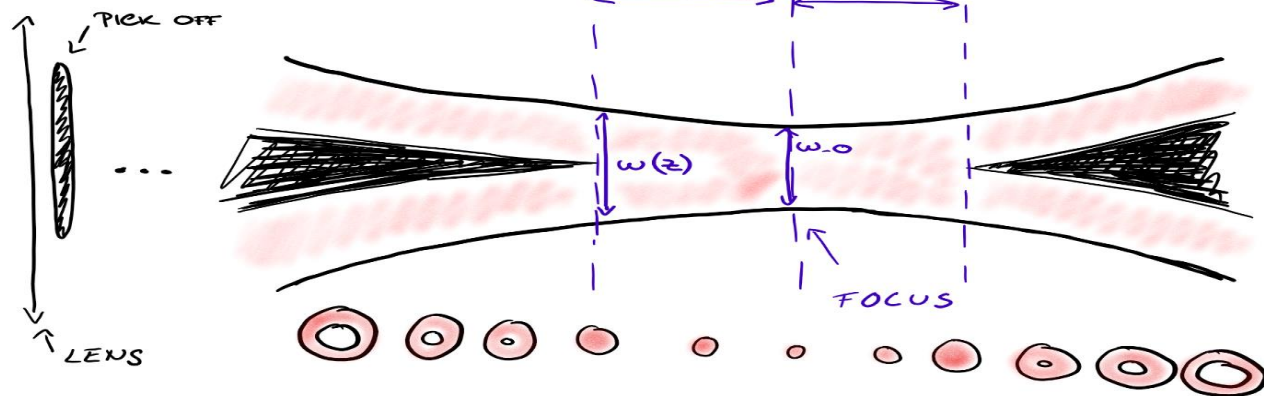
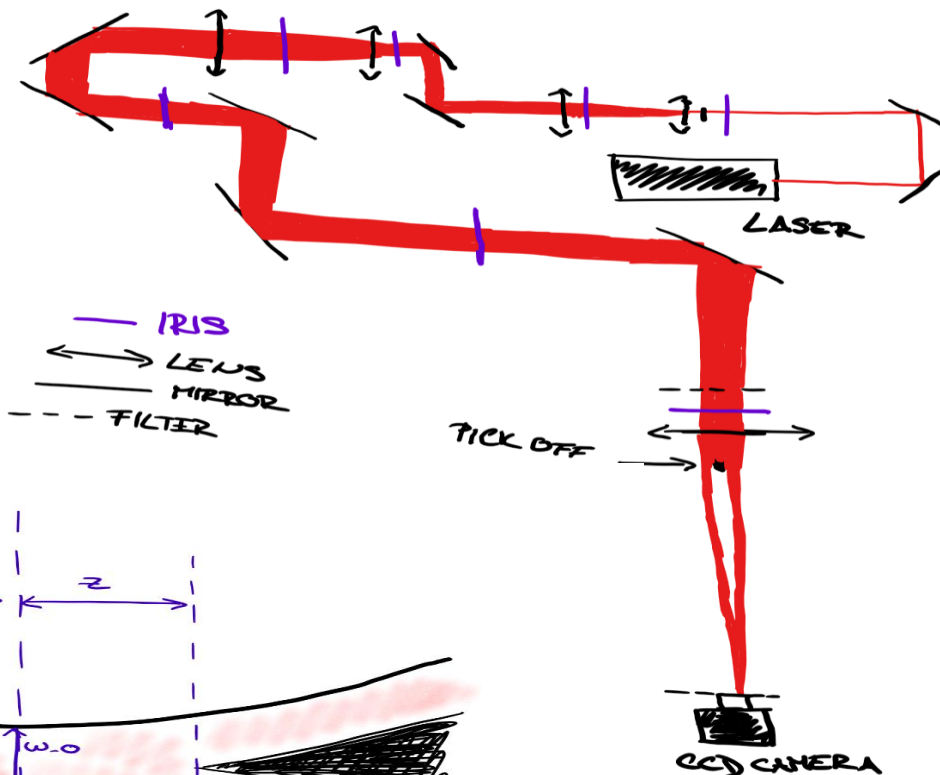


Časový vývoj 100nm hliníkového vzorku zahřátého femtosekundovým laserovým pulzem

# Stavba v malé laboratoři

## Hlavní cíle:

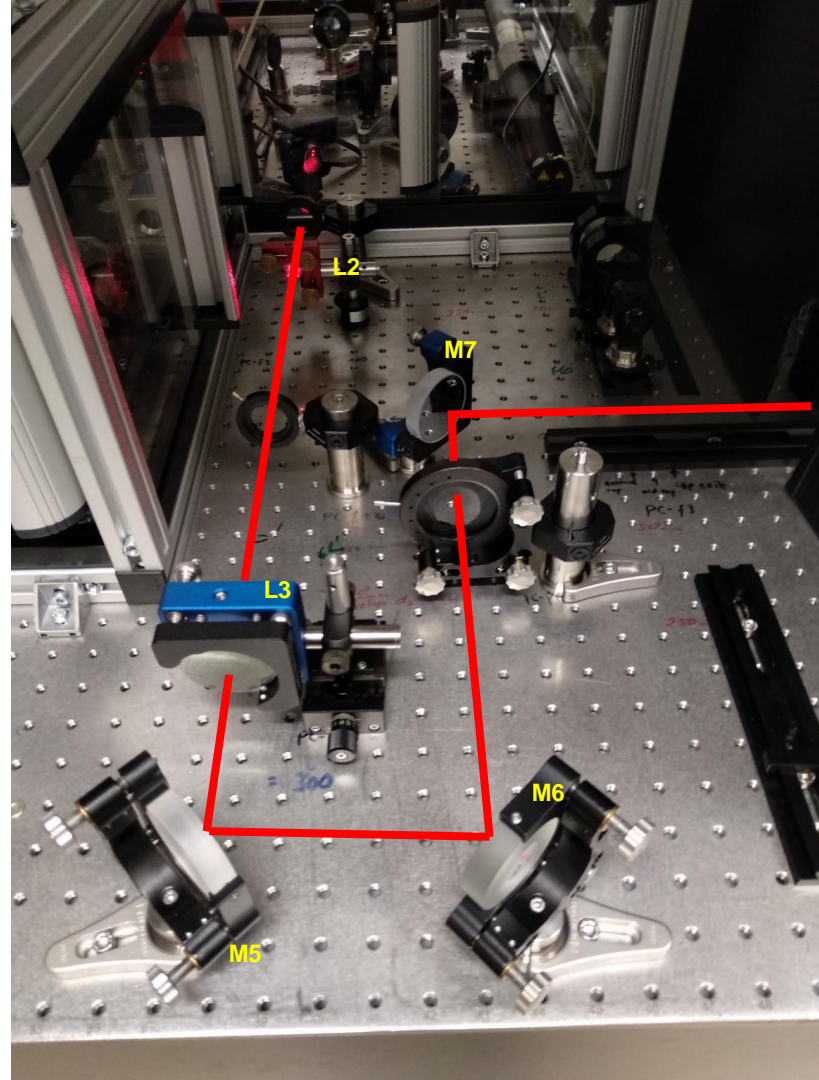
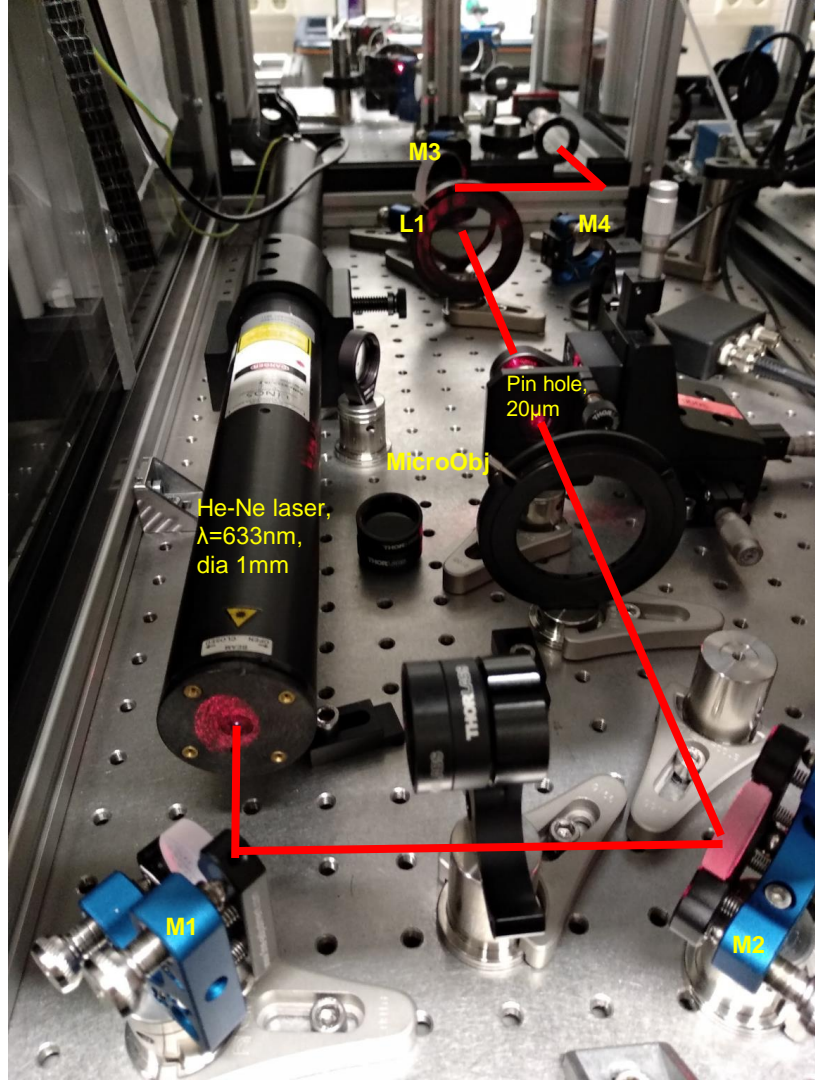
- Najít **vzdálenost  $z$** , od ohniska, ve které zmizí prstencová struktura laseru
- Vypočítat **průměr laseru  $w(z)$**  v této vzdálenosti
  - Odhadnout hodnoty pro velký laserový DRACO systém ( $Z$ ,  $w(Z)$ )



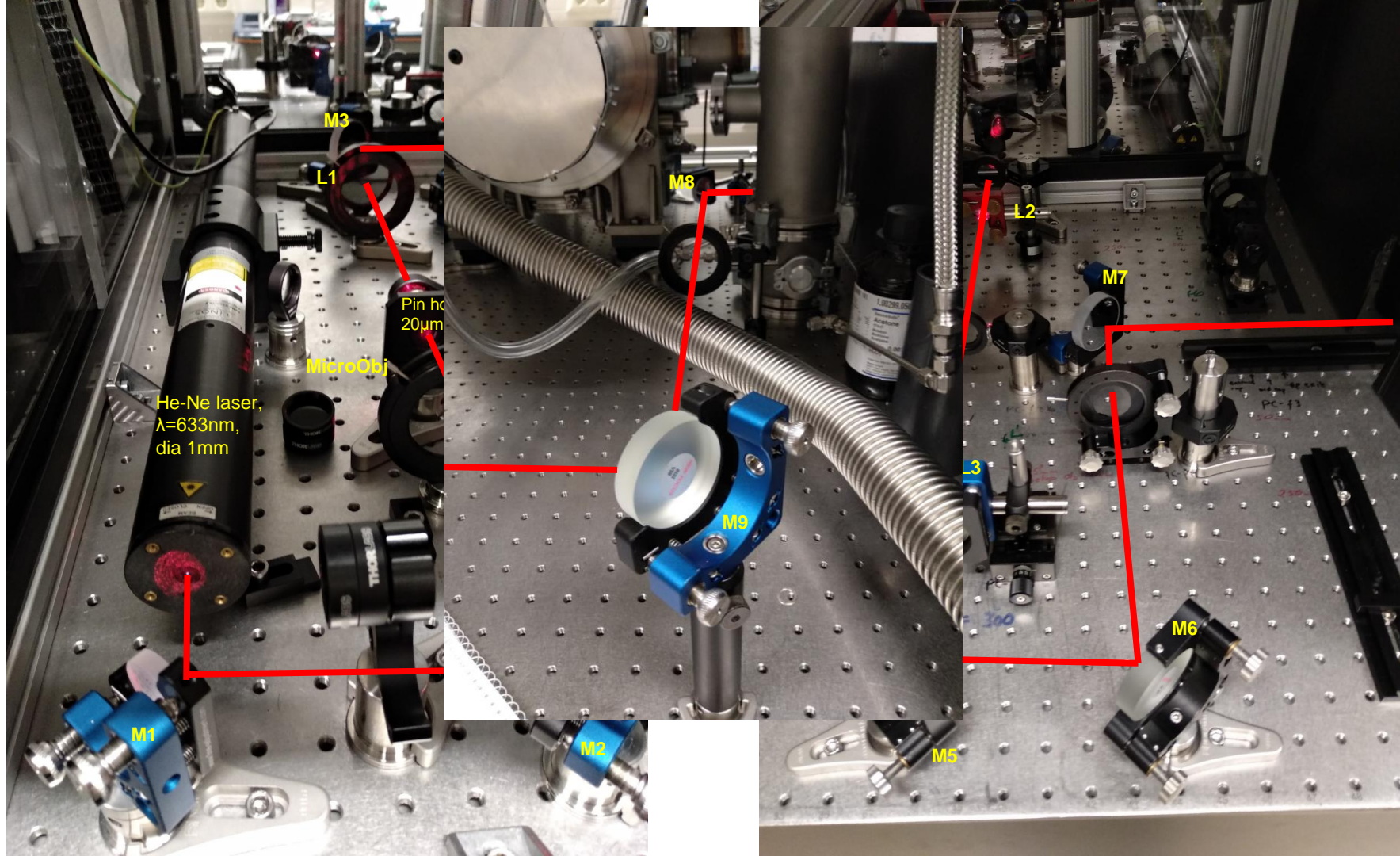
Pro DRACO

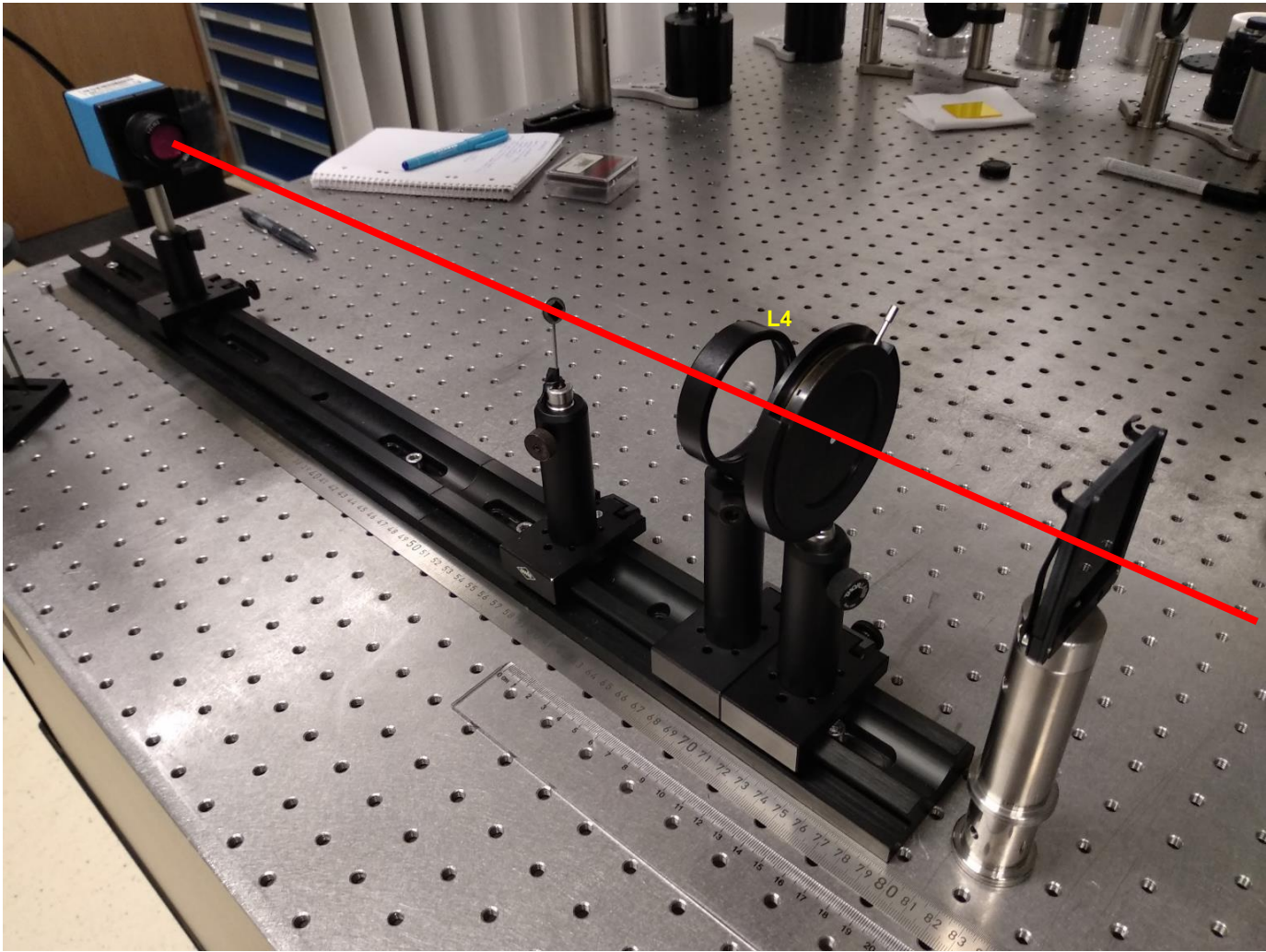
Potřebujeme  $w(Z) = 400-500\mu\text{m}$

Jaká je potřebná vzdálenost  $Z$ ?  
Je možné ji dosáhnout?

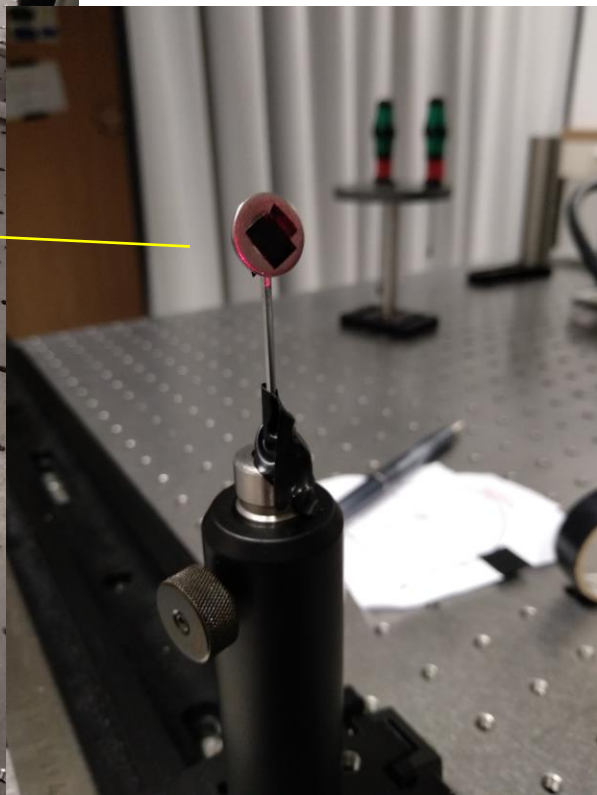
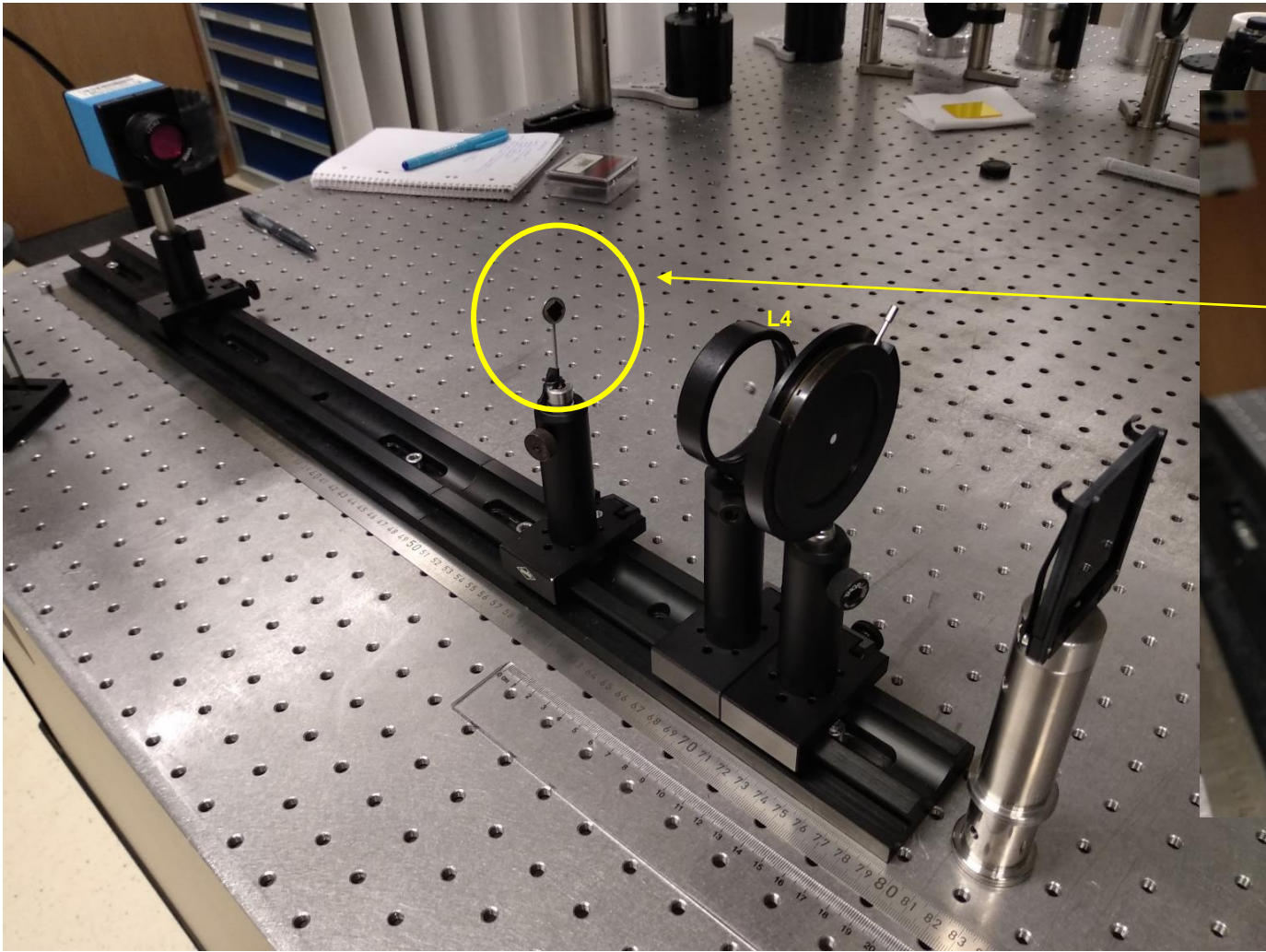


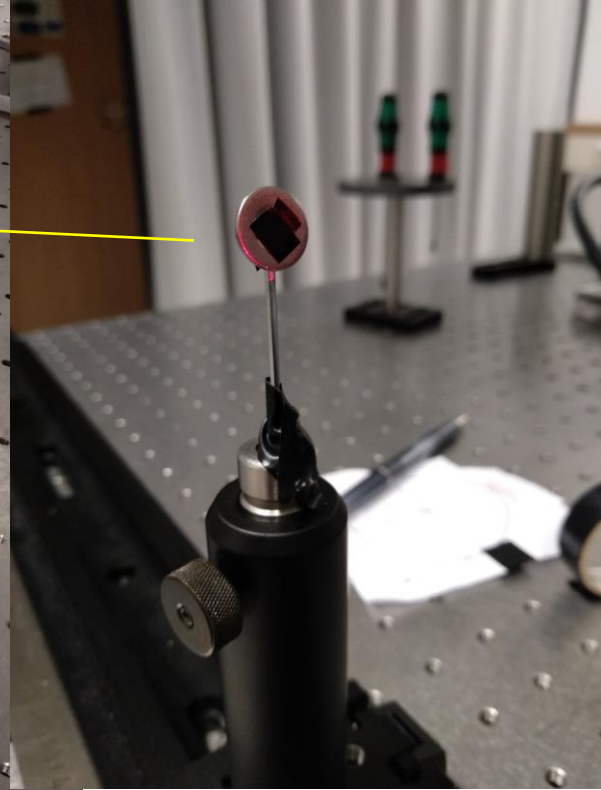
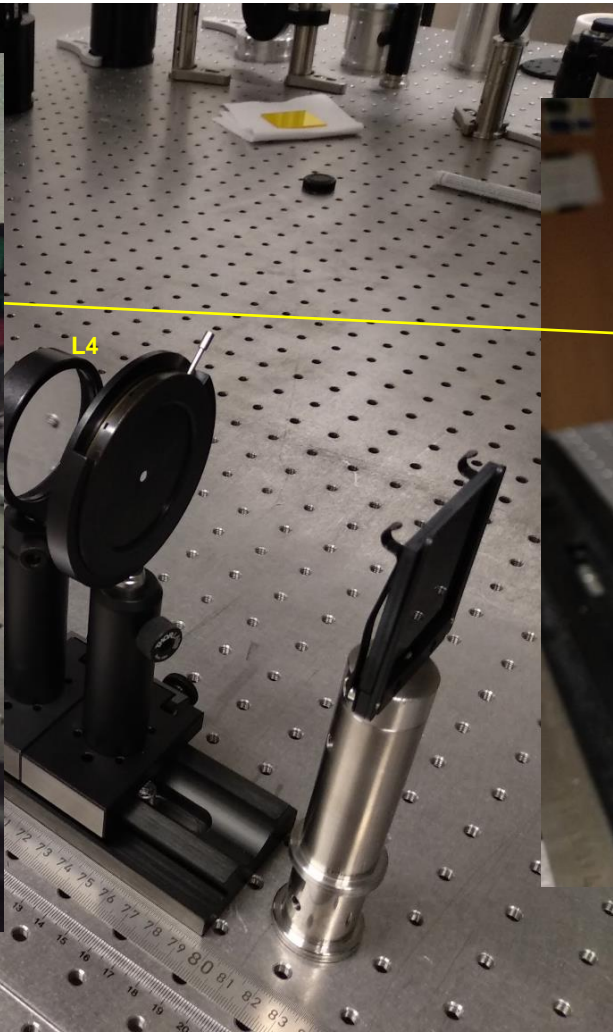
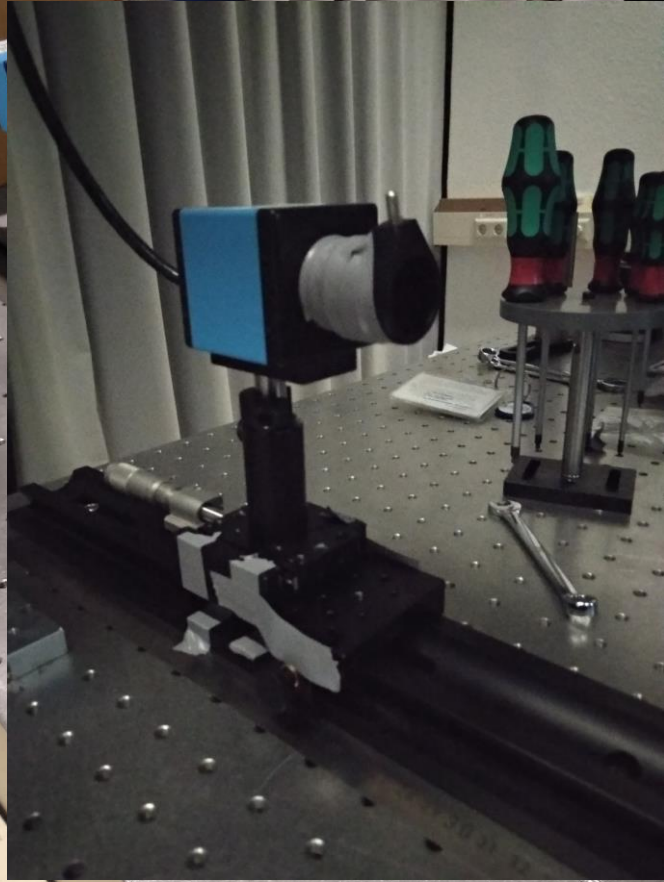




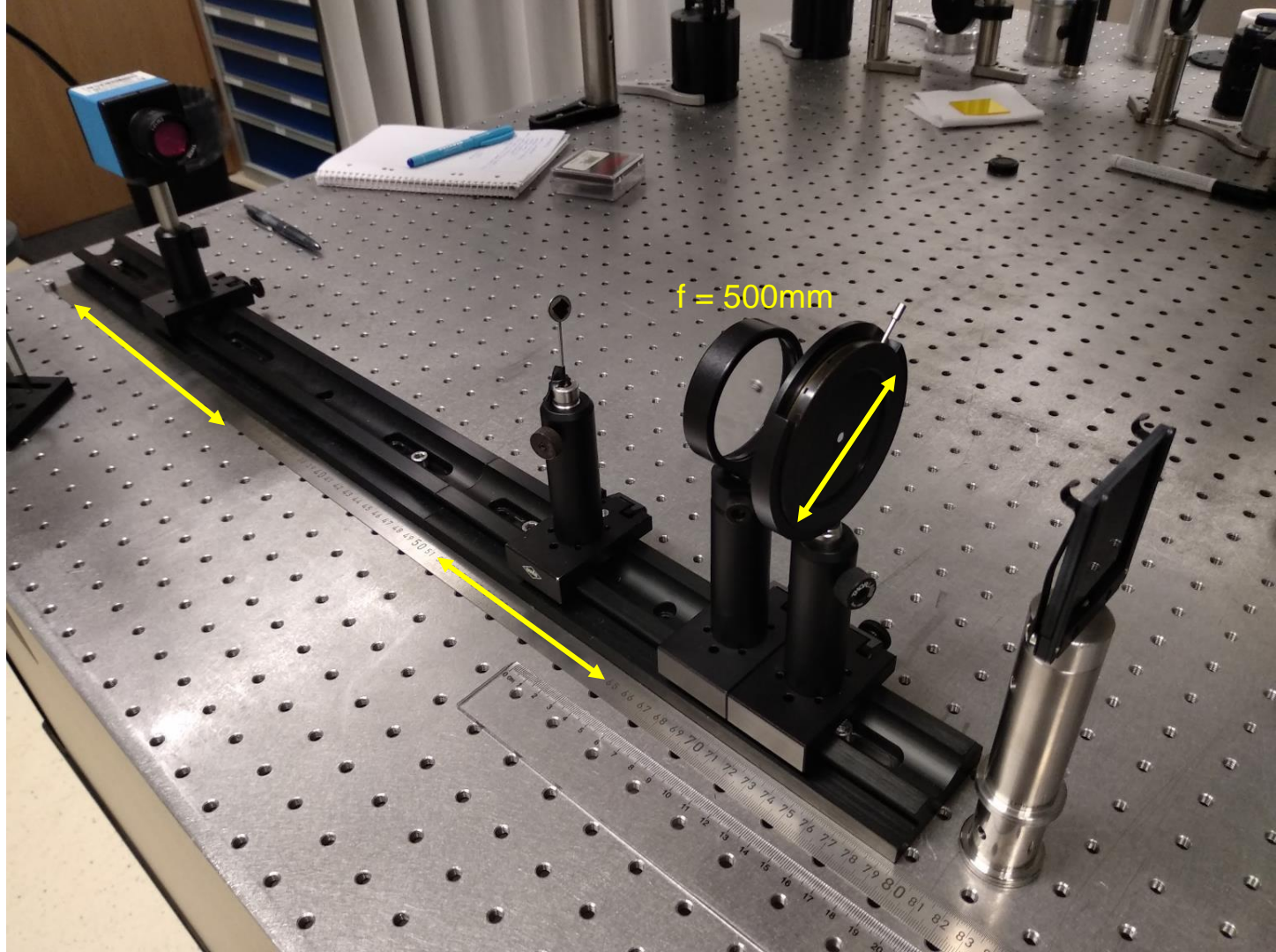












# První výsledky

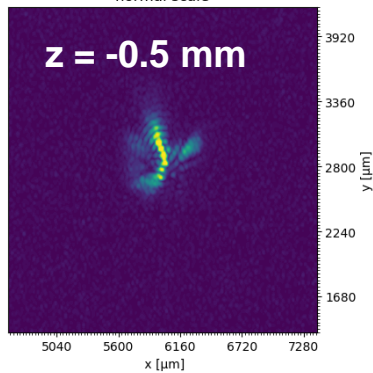
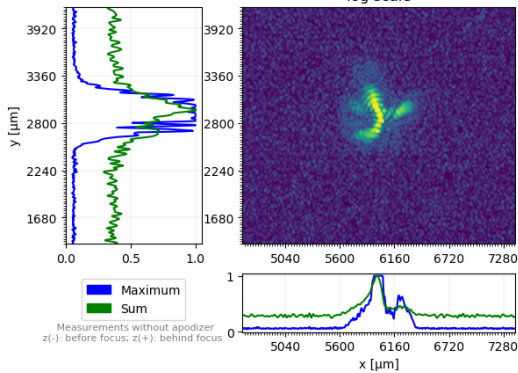
Pohyb kamery kolem ohniska  $\rightarrow$  z se mění

Průměr svazku 28mm, střední část o průměru 21mm byla odstraněna

f/17; f = 500mm; z = -0.5mm; spot size = 31 $\mu$ m

log scale

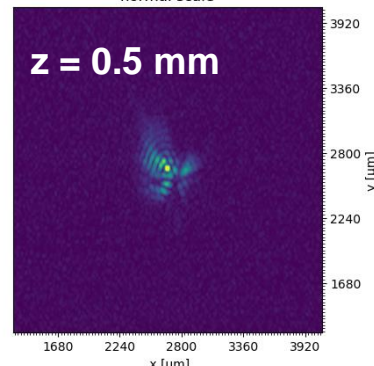
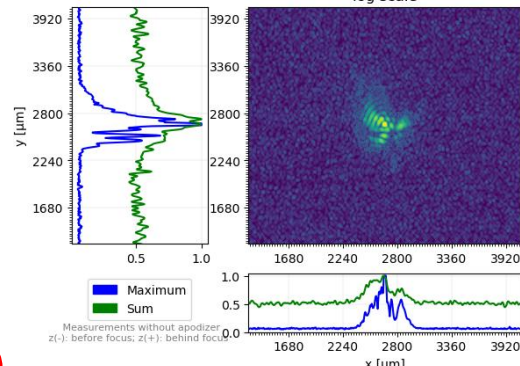
normal scale



f/17; f = 500mm; z = 0.5mm; spot size = 31 $\mu$ m

log scale

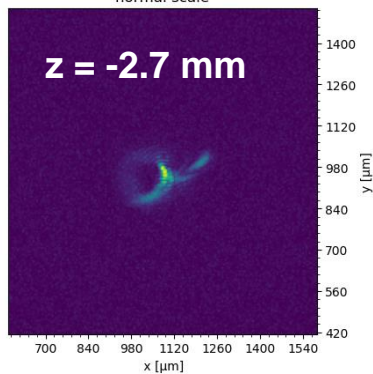
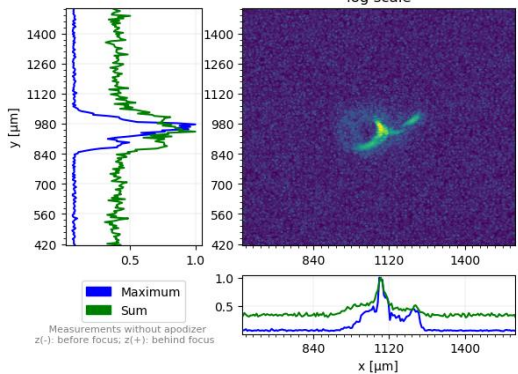
normal scale



f/17; f = 500mm; z = -2.7mm; spot size = 151 $\mu$ m

log scale

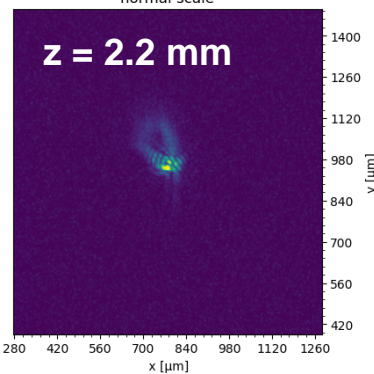
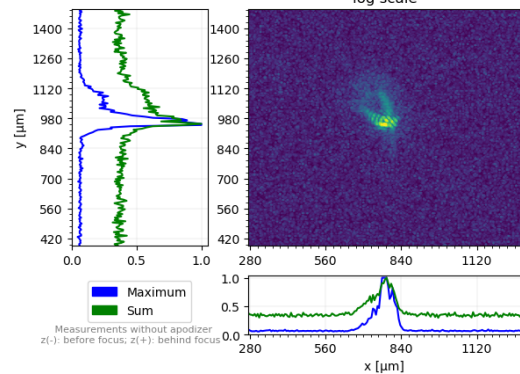
normal scale



f/17; f = 500mm; z = 2.2mm; spot size = 124 $\mu$ m

log scale

normal scale





# První výsledky

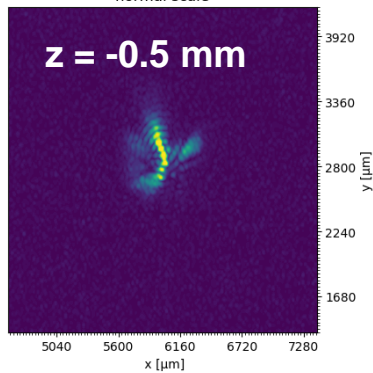
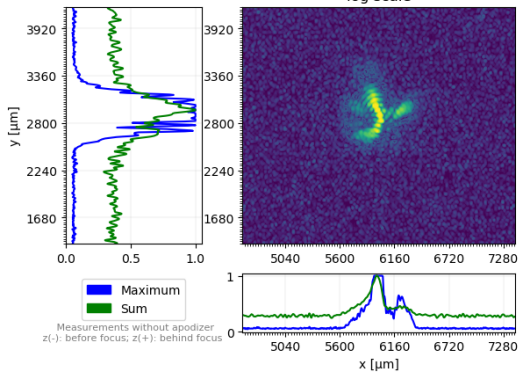
Pohyb kamery kolem ohniska  $\rightarrow$  z se mění

Průměr svazku 28mm, střední část o průměru 21mm byla odstraněna

f/17; f = 500mm; z = -0.5mm; spot size = 31 $\mu$ m

log scale

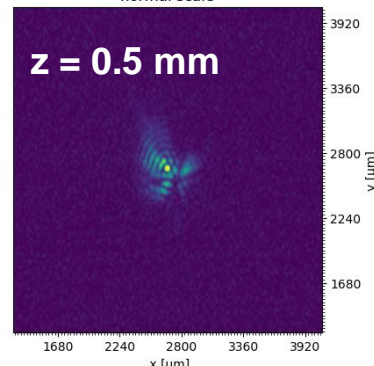
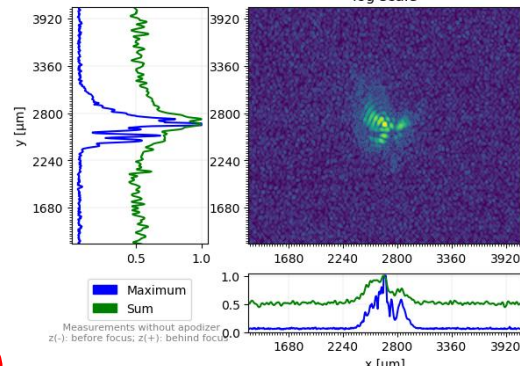
normal scale



f/17; f = 500mm; z = 0.5mm; spot size = 31 $\mu$ m

log scale

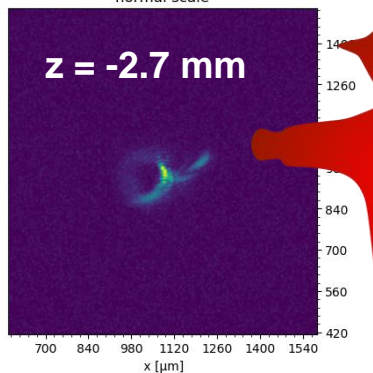
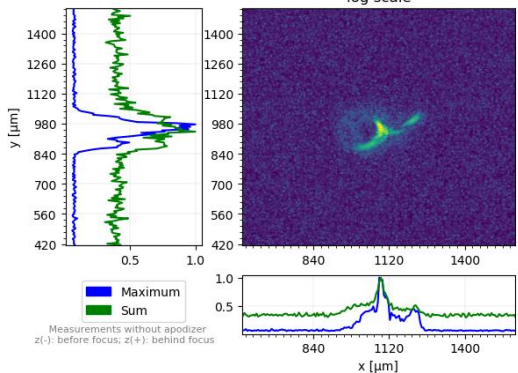
normal scale



f/17; f = 500mm; z = -2.7mm; spot size = 151 $\mu$ m

log scale

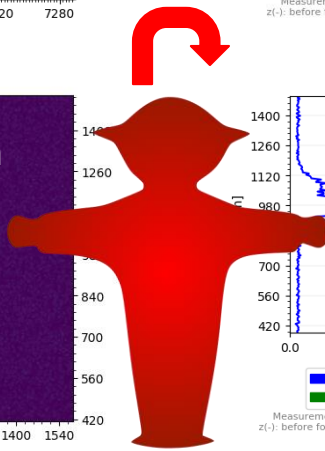
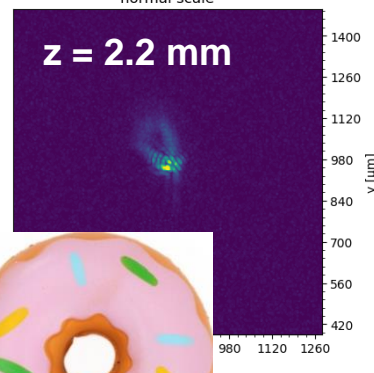
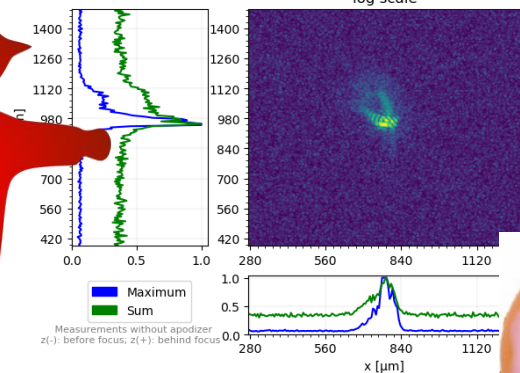
normal scale



f/17; f = 500mm; z = 2.2mm; spot size = 124 $\mu$ m

log scale

normal scale



# První výsledky

Pohyb kamery kolem ohniska → z se mění

Průměr svazku 28mm, střední část o průměru 21mm byla odstraněna

f/17; f = 500mm; z = -0.5mm; spot size = 31 $\mu$ m

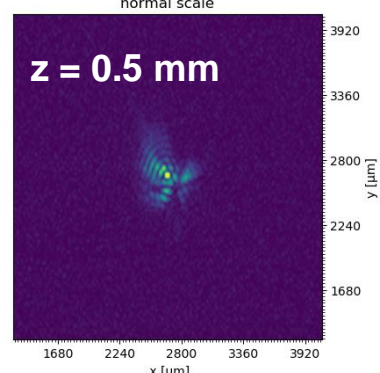
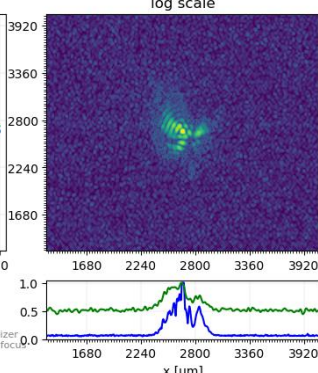
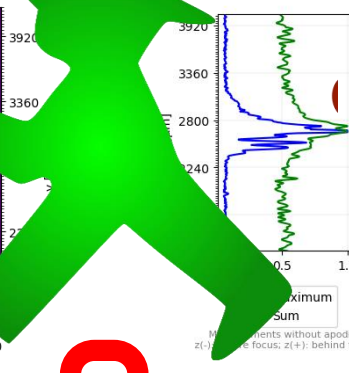
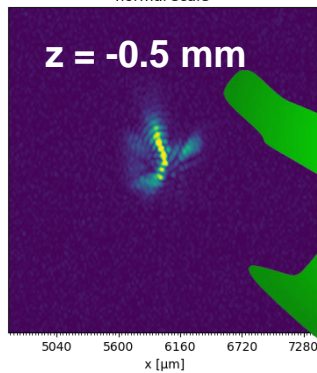
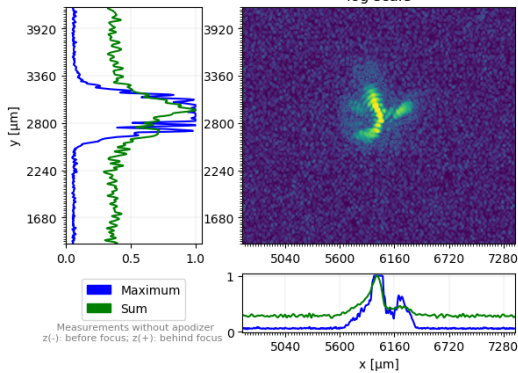
log scale

normal scale

f/17; f = 500mm; z = 0.5mm; spot size = 31 $\mu$ m

log scale

normal scale



f/17; f = 500mm; z = -2.7mm; spot size = 151 $\mu$ m

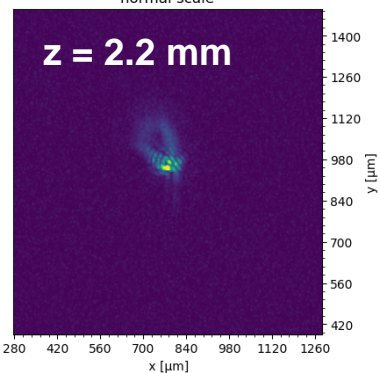
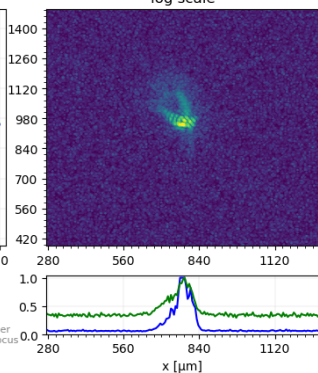
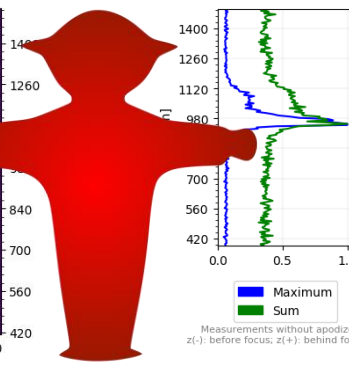
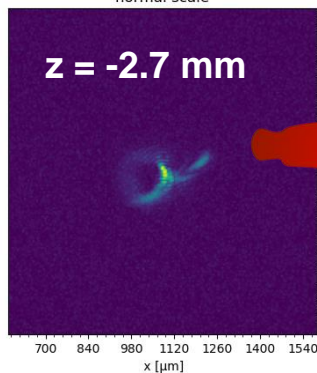
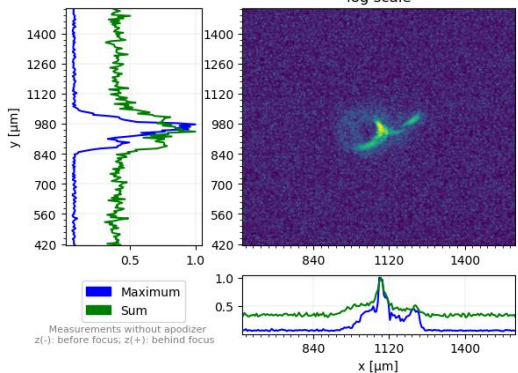
log scale

normal scale

f/17; f = 500mm; z = 2.2mm; spot size = 124 $\mu$ m

log scale

normal scale



Maximální použitelná vzdálenost od ohniska  
z = 0.5 mm



# Výsledky pro různá f#

Optical Lab 010					DRACO							
f#	$\lambda$ [μm]	w_1a [mm]	f [mm]	z [mm]	$\lambda$ [μm]	w_1b [mm]	r*	f* [mm]	w_0* [μm]	z_R* [mm]	Z* [mm]	w(Z)* [μm]
17	0,633	28	500	0,5	0,8	100	3,57	1700	17	0,29	1,7	106
25	0,633	20	500	1,7	0,8	100	5	2500	25	0,61	8,5	340
33	0,633	15	500	2,5	0,8	100	6,6	3300	33	0,94	16,5	580

...maximální použitelná vzdálenost od ohniska

f# - f-number

$\lambda$  - vlnová délka laseru (optical lab nebo DRACO)

w\_1(a/b) - průměr svazku před spojnou čočkou (optical lab nebo DRACO)

f - ohnisková vzdálenost spojné čočky

z - maximální použitelná vzdálenost od ohniska

w\_0 - průměr svazku v ohnisku  $w_0 = (\lambda * f) / (\pi * w_1)$

r - poměr průměru svazků mezi optical lab a DRACO laserem ( $r = w_1b / w_1a$ )

z\_R - Rayleigh Range

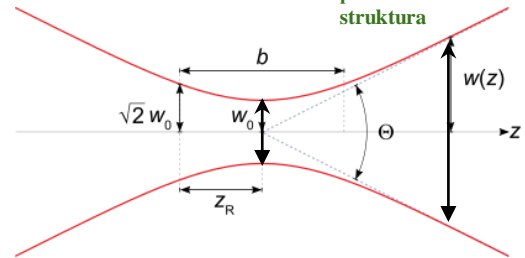
Z - maximální použitelná vzdálenost od ohniska ( $Z = r * z_R$ )

w(Z) - průměr svazku ve vzdálenosti Z od ohniska

$$z_R = \frac{\pi(\omega_0)^2}{\lambda}$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left[\frac{z}{z_R}\right]^2}$$

...maximální průměr svazku, u kterého není vidět prstencová struktura



=> maximální použitelná vzdálenost Z od ohniska roste se zvětšujícím se f# (s delší ohniskovou vzdáleností pro pevný průměr svazku w\_1)

# Výsledky pro různá f#

Optical Lab 010					DRACO							
f#	$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	w_1a [mm]	f [mm]	z [mm]	$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	w_1b [mm]	r*	f* [mm]	w_0* [ $\mu\text{m}$ ]	z_R* [mm]	Z* [mm]	w(Z)* [ $\mu\text{m}$ ]
17	0,633	28	500	0,5	0,8	100	3,57	1700	17	0,29	1,7	106
25	0,633	20	500	1,7	0,8	100	5	2500	25	0,61	8,5	340
33	0,633	15	500	2,5	0,8	100	6,6	3300	33	0,94	16,5	580

...maximální použitelná vzdálenost od ohniska

...maximální průměr svazku, u kterého není vidět prstencová struktura

f# - f-number

$\lambda$  - vlnová délka laseru (optical lab nebo DRACO)

w\_1(a/b) - průměr svazku před spojnou čočkou (optical lab nebo DRACO)

f - ohnisková vzdálenost spojné čočky

z - maximální použitelná vzdálenost od ohniska

w\_0 - průměr svazku v ohnisku  $w_0 = (\lambda * f) / (\pi * w_1)$

r - poměr průměru svazků mezi optical lab a DRACO laserem ( $r = w_1b / w_1a$ )

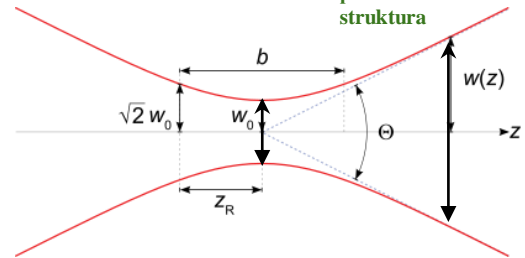
z\_R - Rayleigh Range

Z - maximální použitelná vzdálenost od ohniska ( $Z = r * z_R$ )

w(Z) - průměr svazku ve vzdálenosti Z od ohniska

$$z_R = \frac{\pi(\omega_0)^2}{\lambda}$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left[\frac{z}{z_R}\right]^2}$$

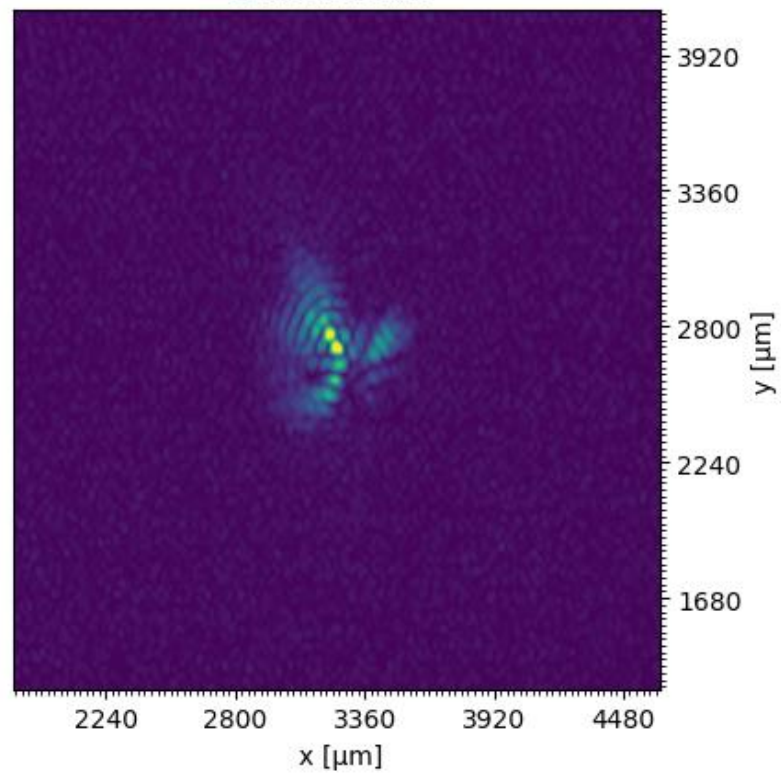
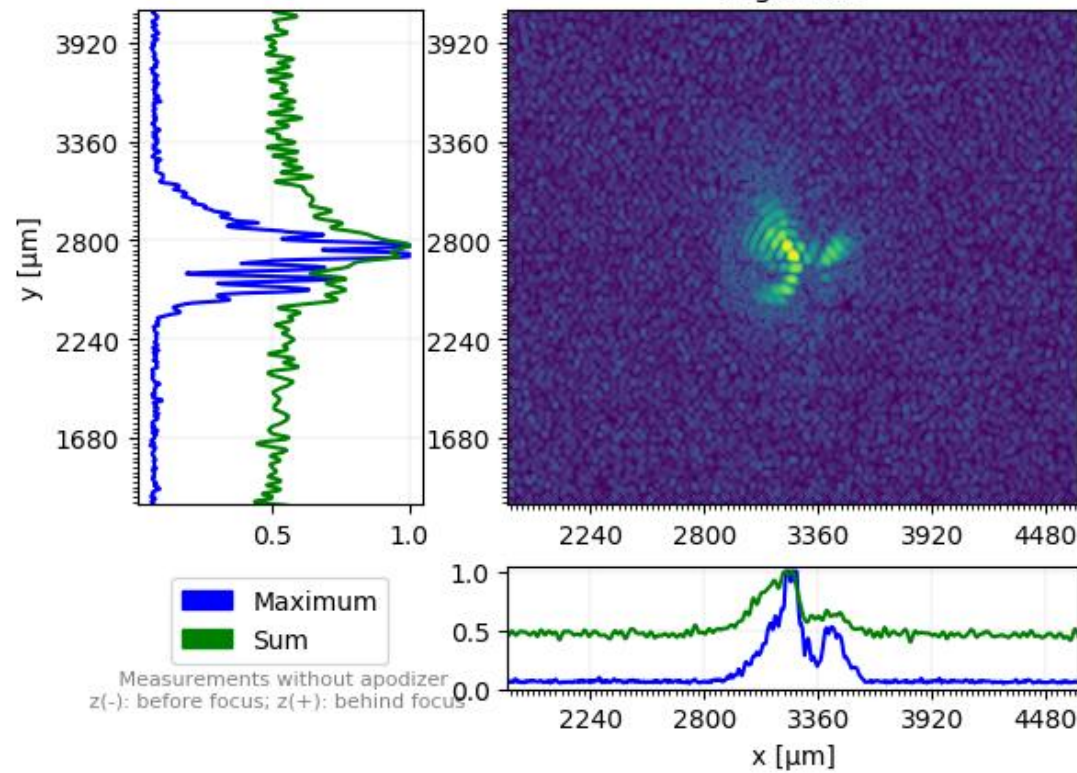


=> maximální použitelná vzdálenost Z od ohniska roste se zvětšujícím se f# (s delší ohniskovou vzdáleností pro pevný průměr svazku w\_1)

f/17;  $f = 500\text{mm}$ ;  $z = 0.0\text{mm}$ ; spot size =  $14\mu\text{m}$

log scale

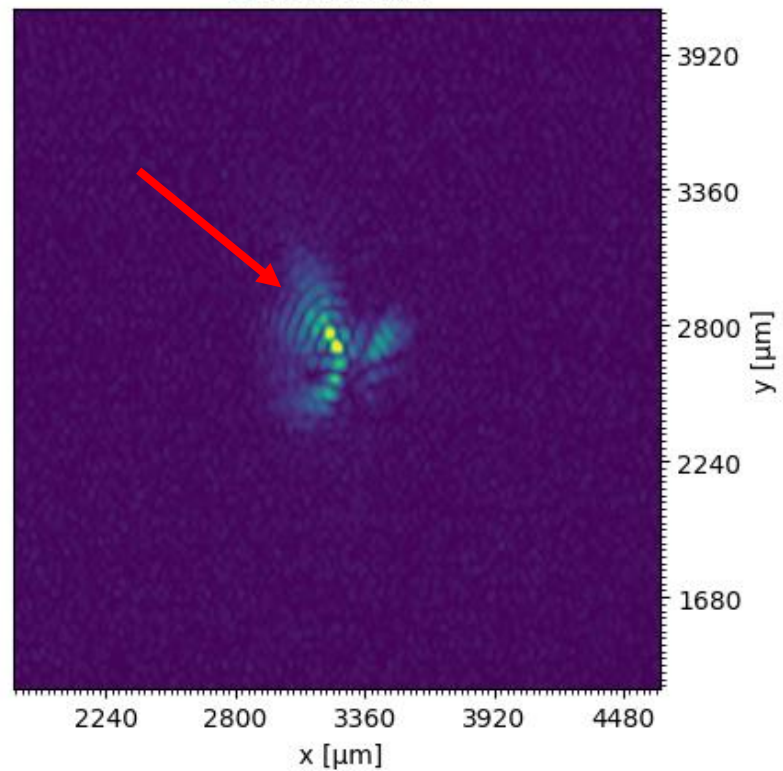
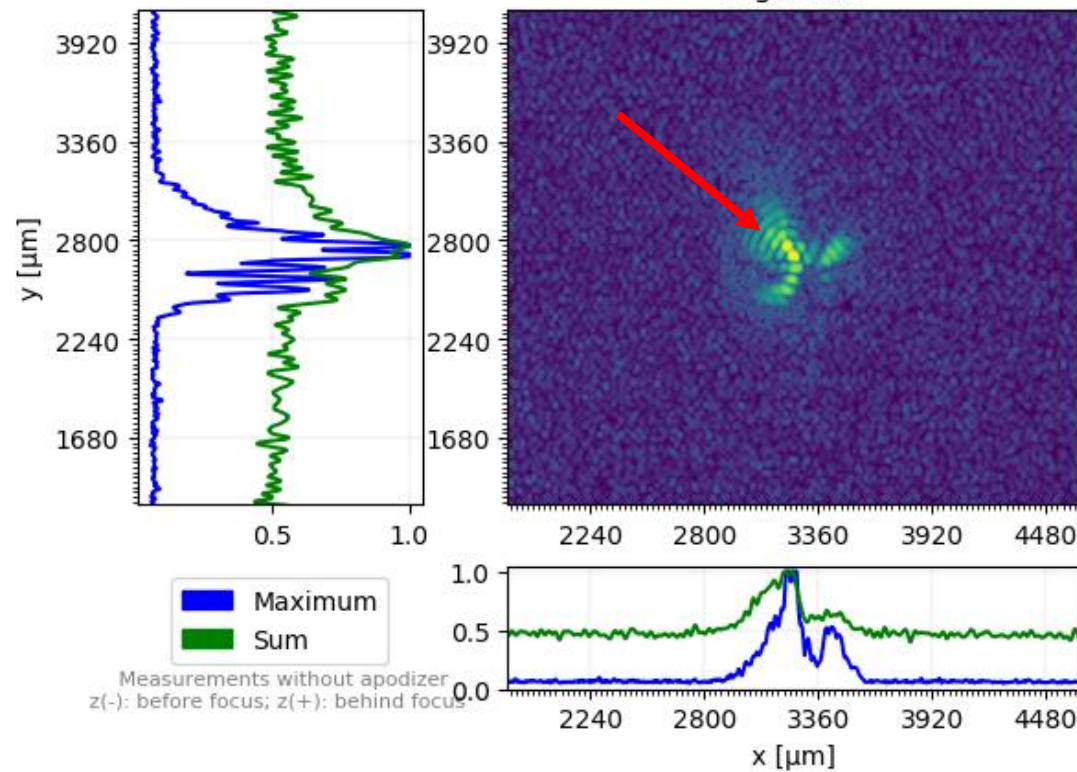
normal scale



f/17;  $f = 500\text{mm}$ ;  $z = 0.0\text{mm}$ ; spot size =  $14\mu\text{m}$

log scale

normal scale

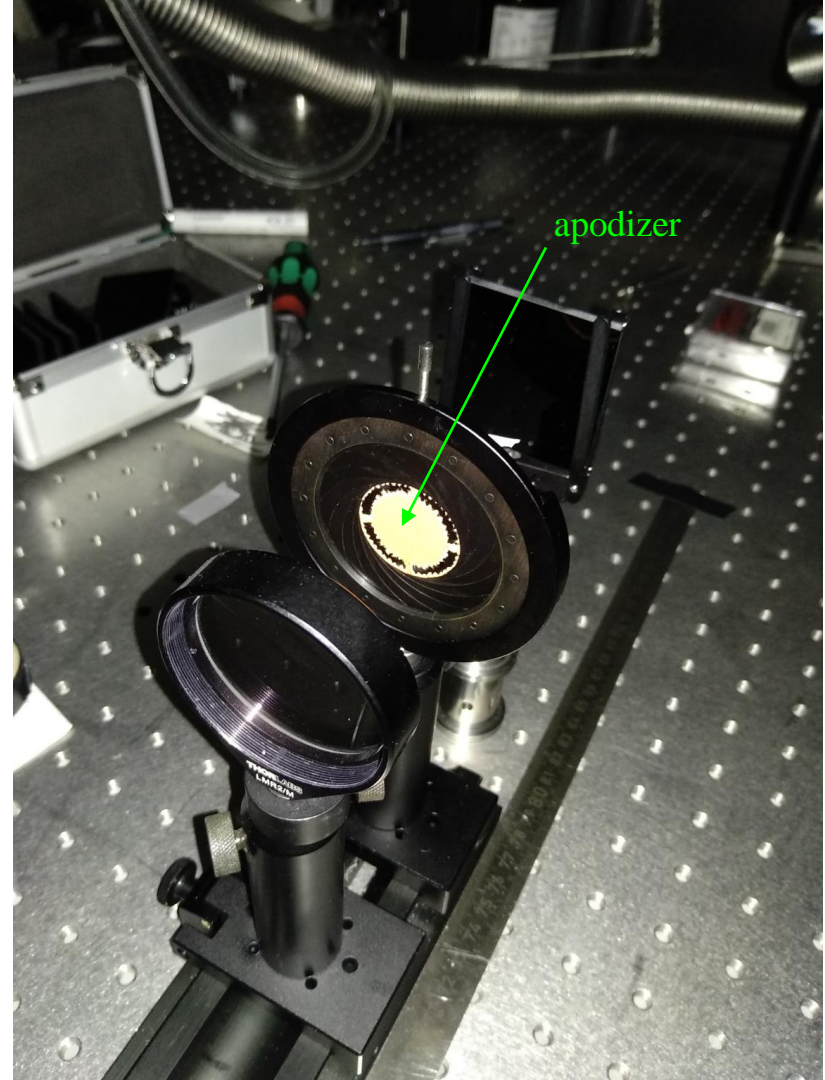
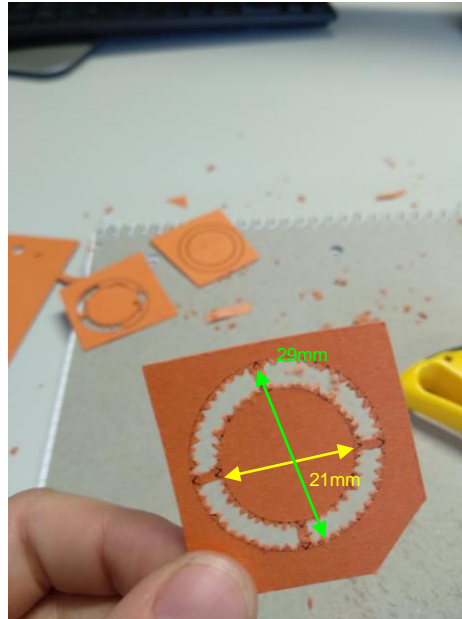
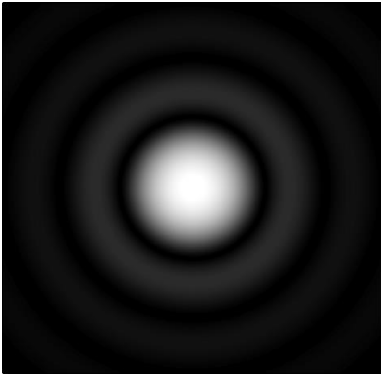


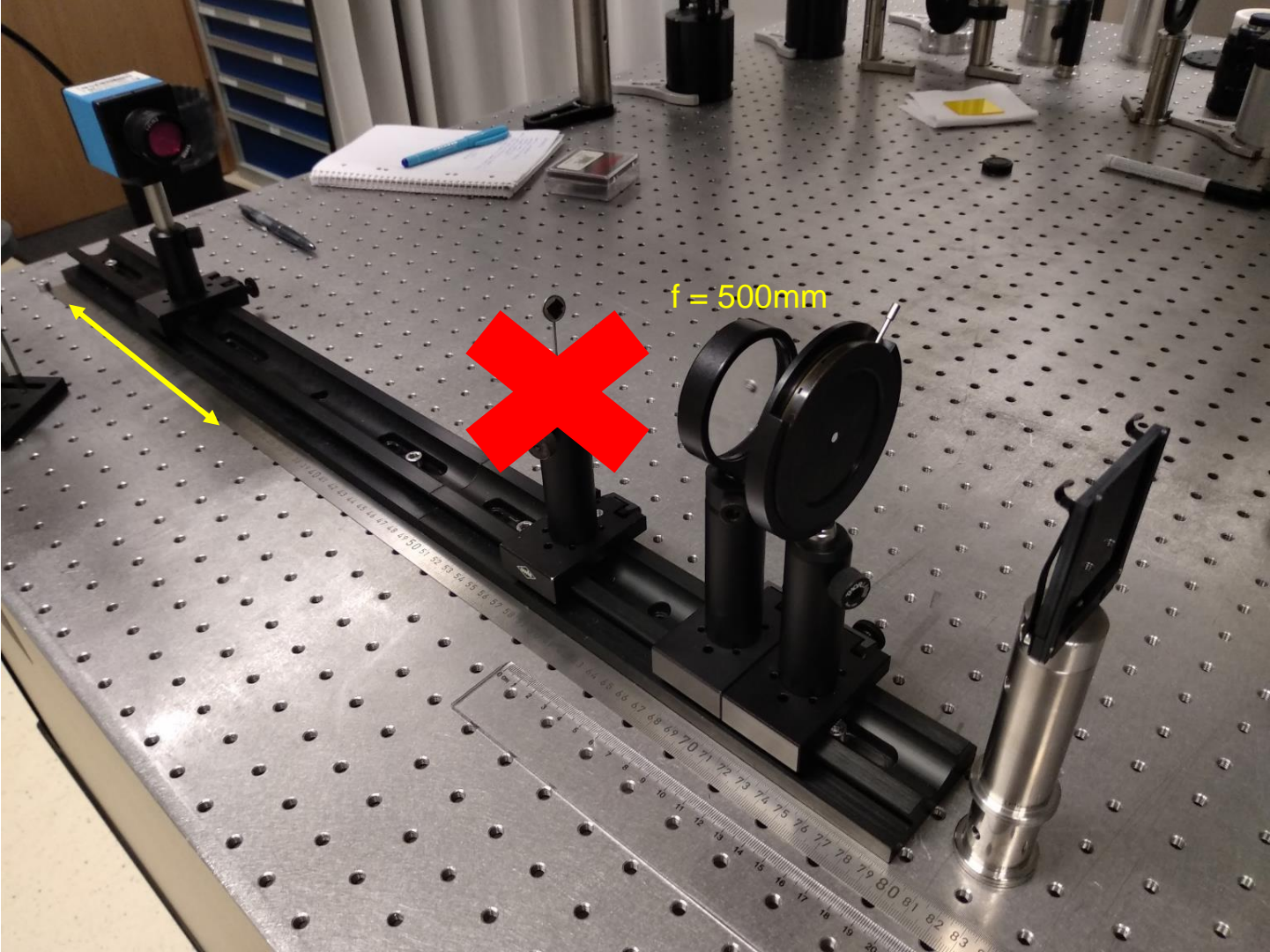


# Měření s apodizérem

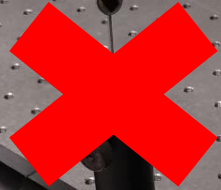
**Apodizace** - optická filtrovací metoda; primárně používaná k redukci *Airy disků*, které jsou způsobené difrakcí kolem peaku intenzity; zlepšuje ostrost  
(*Wikipedia*)

Airy disk

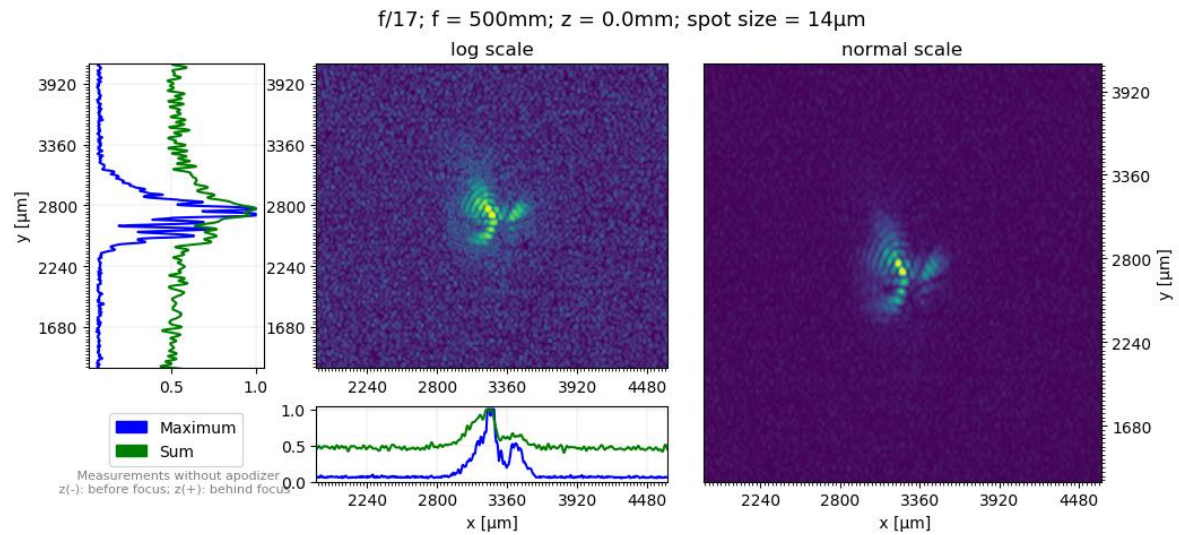




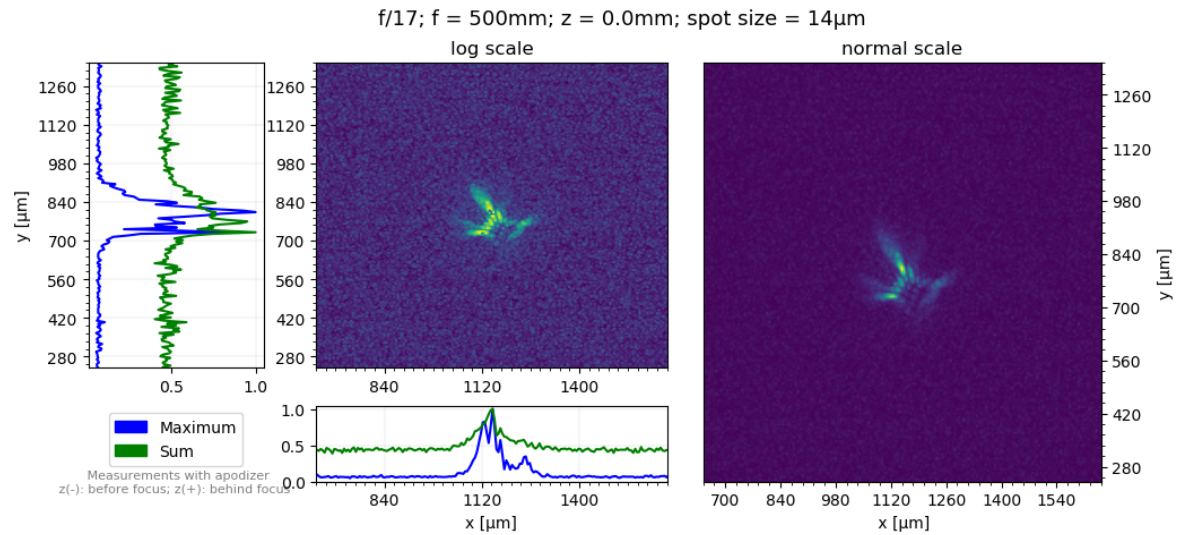
f = 500mm



Bez  
apodizace



S apodizací





# Měření s apodizací

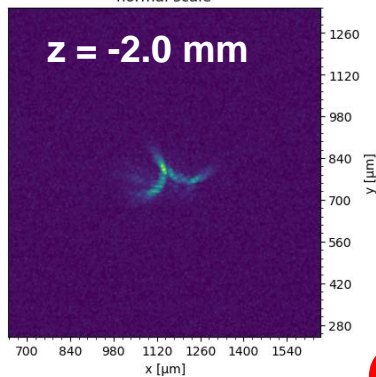
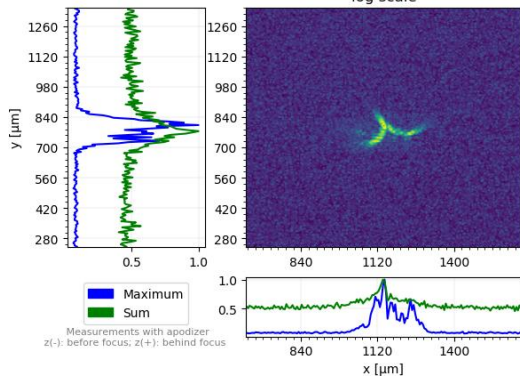
Pohyb kamery kolem ohniska  $\rightarrow$  z se mění

Průměr svazku 28mm, střední část o průměru 21mm byla odstraněna

f/17; f = 500mm; z = -2.0mm; spot size = 112 $\mu$ m

log scale

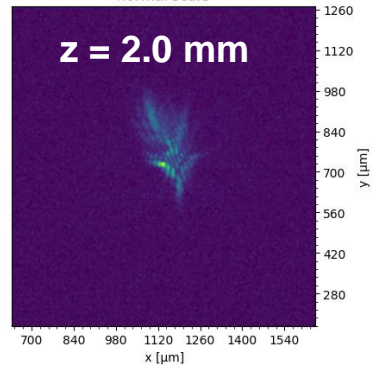
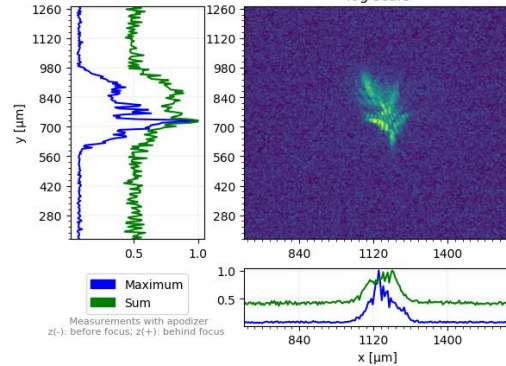
normal scale



f/17; f = 500mm; z = 2.0mm; spot size = 112 $\mu$ m

log scale

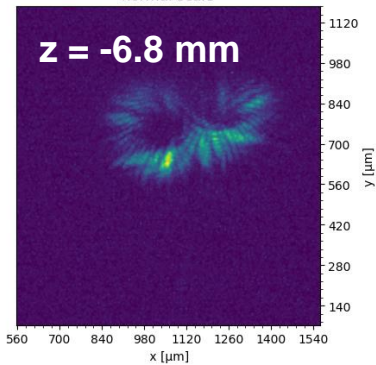
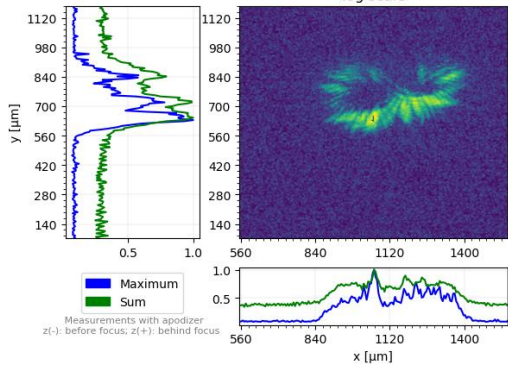
normal scale



f/17; f = 500mm; z = -6.8mm; spot size = 381 $\mu$ m

log scale

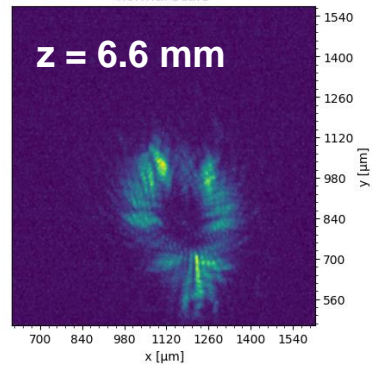
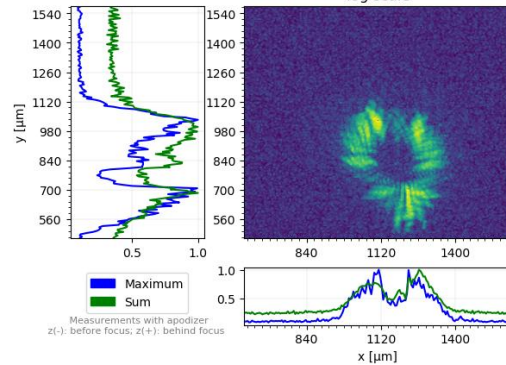
normal scale



f/17; f = 500mm; z = 6.6mm; spot size = 369 $\mu$ m

log scale

normal scale



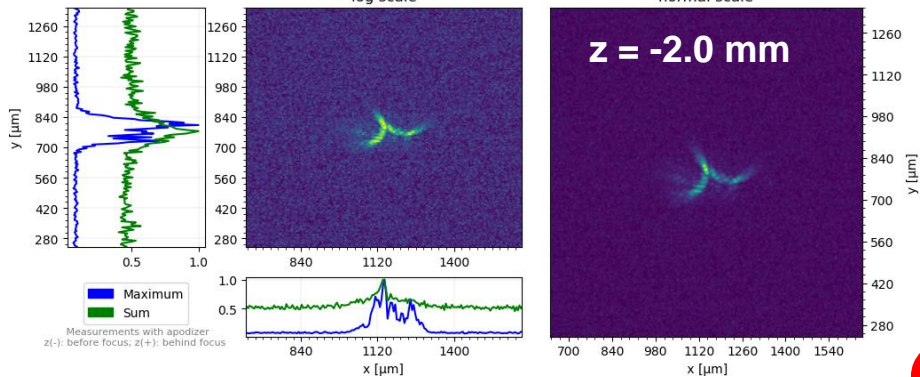


# Měření s apodizací

Pohyb kamery kolem ohniska → z se mění  
Průměr svazku 28mm, střední část o průměru 21mm byla odstraněna

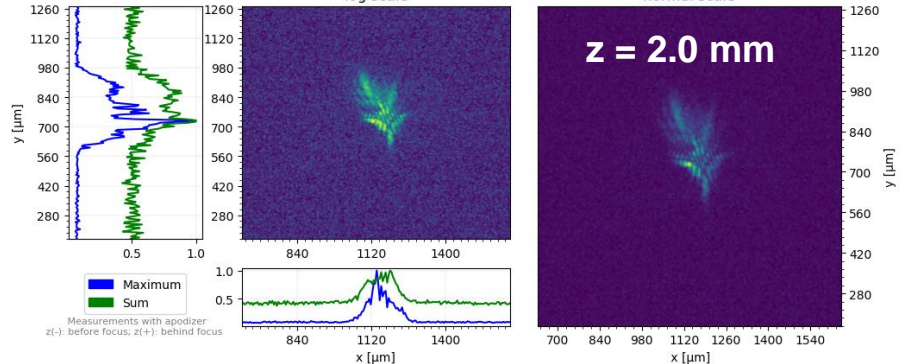
f/17; f = 500mm; z = -2.0mm; spot size = 112μm

log scale normal scale



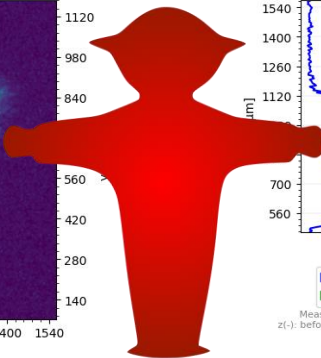
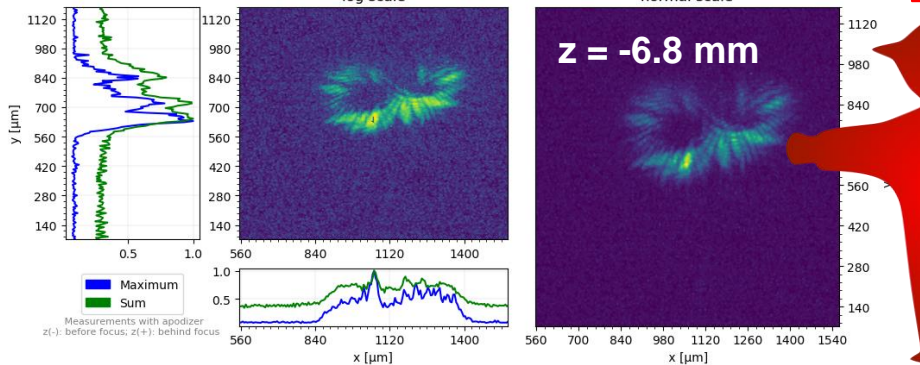
f/17; f = 500mm; z = 2.0mm; spot size = 112μm

log scale normal scale



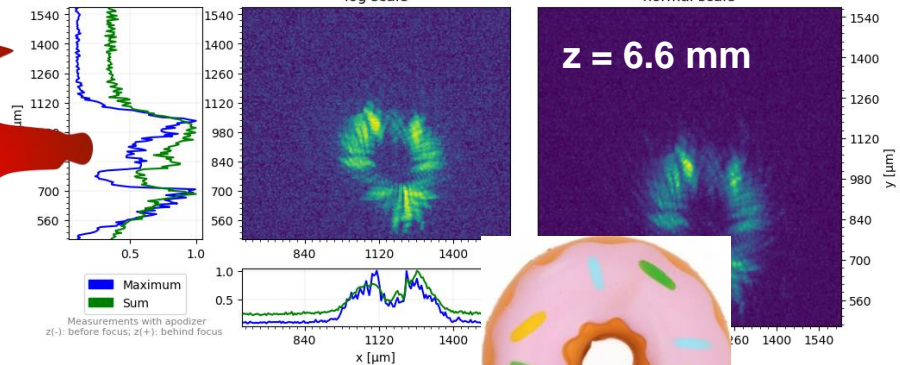
f/17; f = 500mm; z = -6.8mm; spot size = 381μm

log scale normal scale



f/17; f = 500mm; z = 6.6mm; spot size = 369μm

log scale normal scale



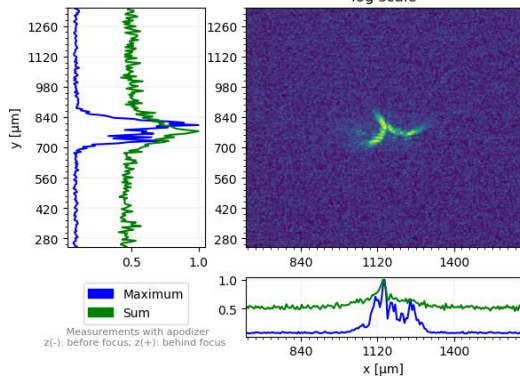
# Měření s apodizací

Pohyb kamery kolem ohniska  $\rightarrow$  z se mění

Průměr svazku 28mm, střední část o průměru 21mm byla odstraněna

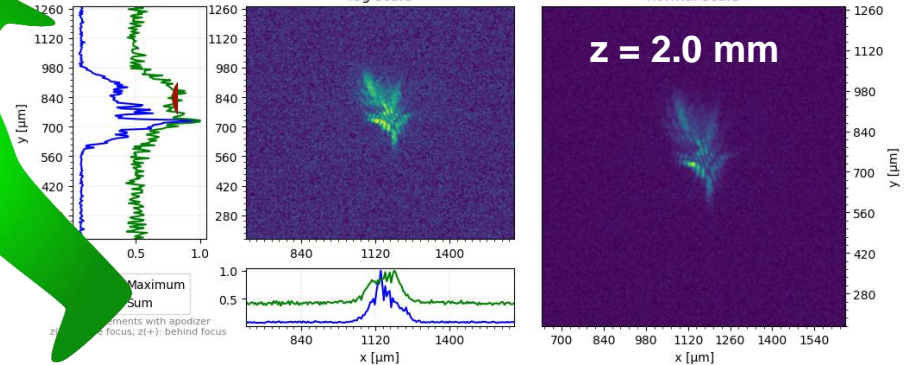
f/17; f = 500mm; z = -2.0mm; spot size = 112 $\mu$ m

log scale normal scale



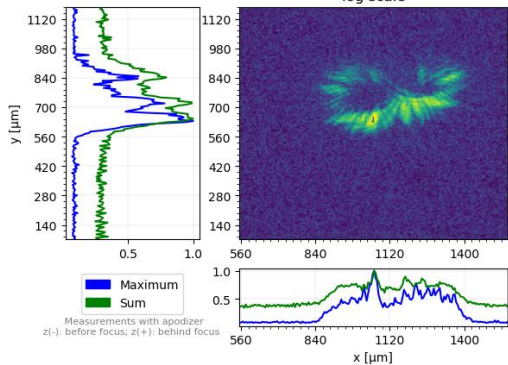
f/17; f = 500mm; z = 2.0mm; spot size = 112 $\mu$ m

log scale normal scale



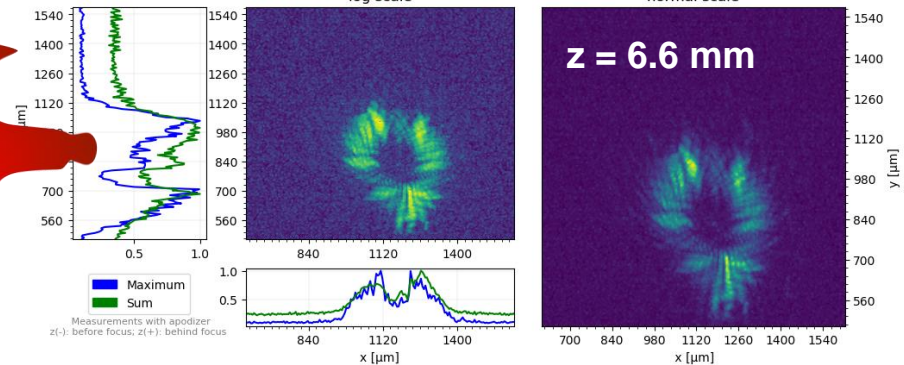
f/17; f = 500mm; z = -6.8mm; spot size = 381 $\mu$ m

log scale normal scale



f/17; f = 500mm; z = 6.6mm; spot size = 369 $\mu$ m

log scale normal scale



Maximální použitelná vzdálenost od ohniska  
z = 2mm

# Možnosti pro DRACO setup

DRACO setup									
w_1 [mm]	f [mm]	f# [-]	r [-]	$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	w_0 [ $\mu\text{m}$ ]	z_R [mm]	Z [mm]	w(Z) [ $\mu\text{m}$ ]	
100	1700	17*	3.57	0.8	17.3	0,29	7,14	420	
100	2000	20	4	0.8	20.4	0,40	10**	500	
100	2250	22.5	4.5	0.8	22.9	0,51	11**	489	
100	5090	50.9	10.1	0.8	51.9	2,64	25**	493	

...maximální použitelná vzdálenost od ohniska  $Z$  ..průměr svazku ve vzdálenosti  $Z$

f# - f-number

$\lambda$  - vlnová délka laseru

w\_1 - průměr laseru před spojnou čočkou

f - ohnisková vzdálenost spojné čočky

w\_0 - průměr laseru v ohnisku

r - poměr mezi průměrem laseru v L10 a DRACu

z\_R - Rayleigh Range

Z - maximální použitelná vzdálenost od ohniska

w(Z) - průměr laseru ve vzdálenosti Z od ohniska

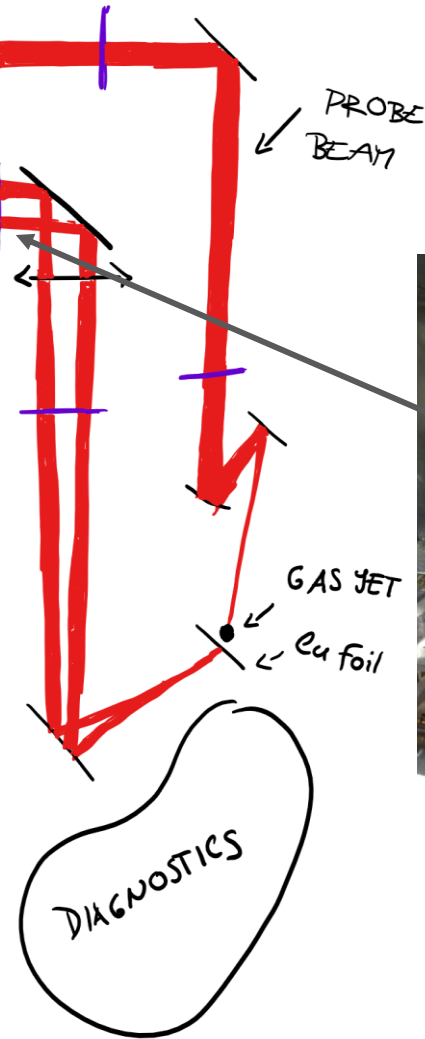
\*Výsledky z optical labu  
přepočítané pro DRACO

\*\*Navrhované hodnoty, které by  
měly být splnitelné.



# Stavba ve velké laboratoři

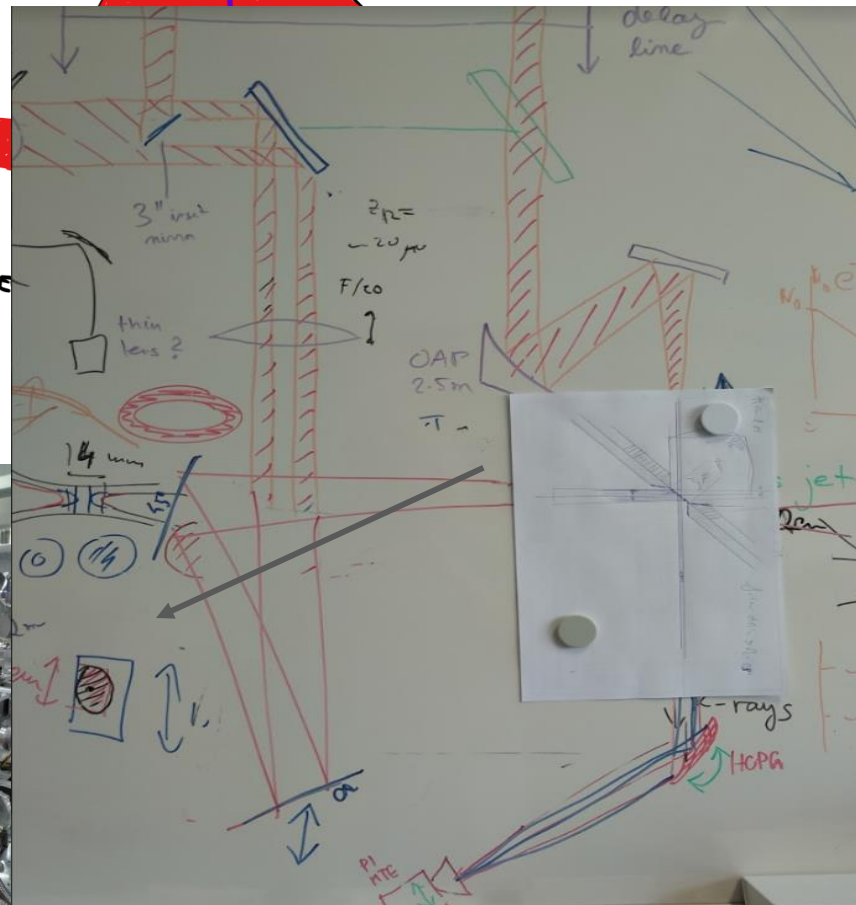
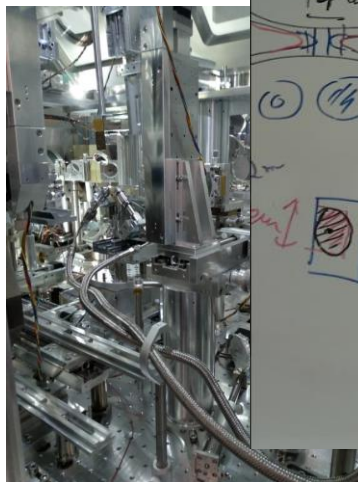
- Úkoly:
  - spočítat a postavit dráhu pro obě ramena laseru
  - vypočítat posunutí zrcadel pro dostačující zpoždění u “probe beam”
  - postavit zobrazovací diagnostiku laserového fokusu



# Stavba ve velké laboratoři

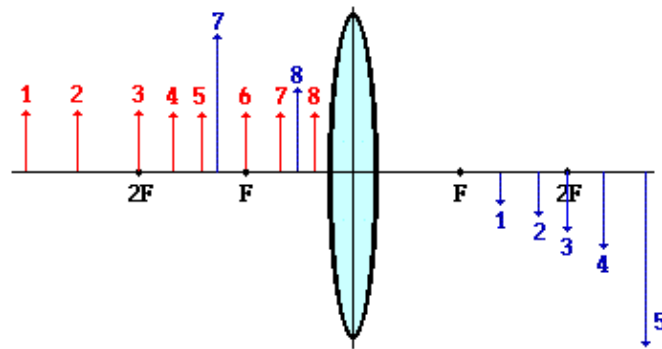
## Úkoly:

- spočítat a postavit dráhu pro obě ramena laseru
- vypočítat posunutí zrcadel pro dostatečnou zpoždění u “probe beam”
- postavit zobrazovací diagnostiku laserového fokusu



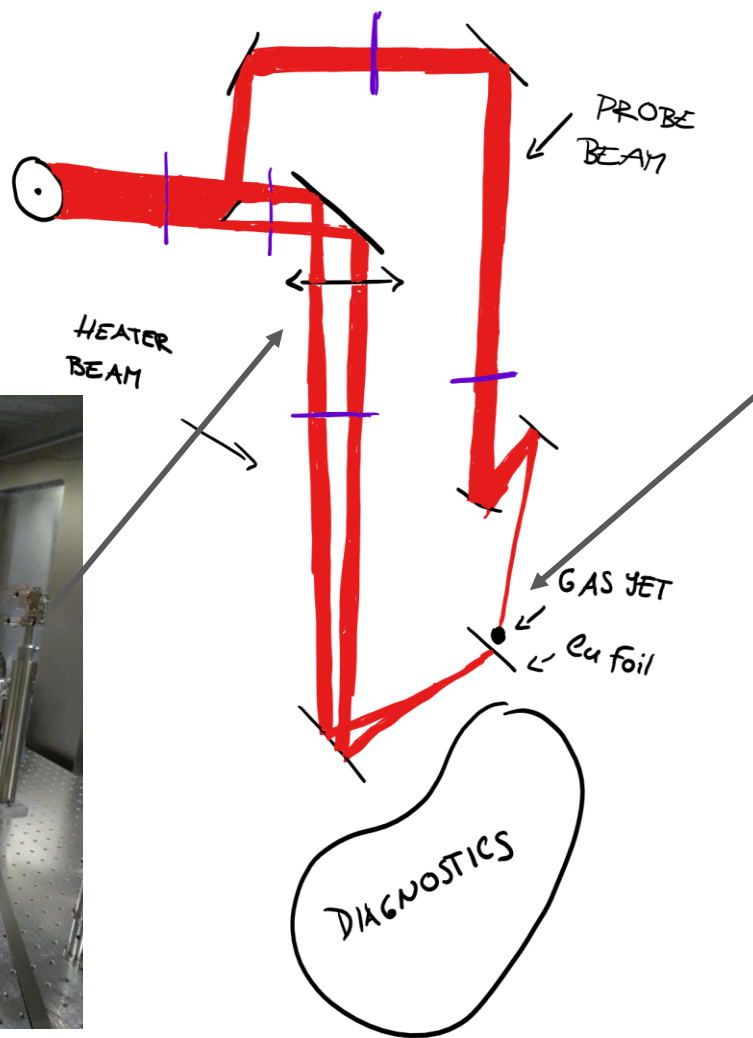
# Zpožd'ovací úsek a zobrazovací diagnostika

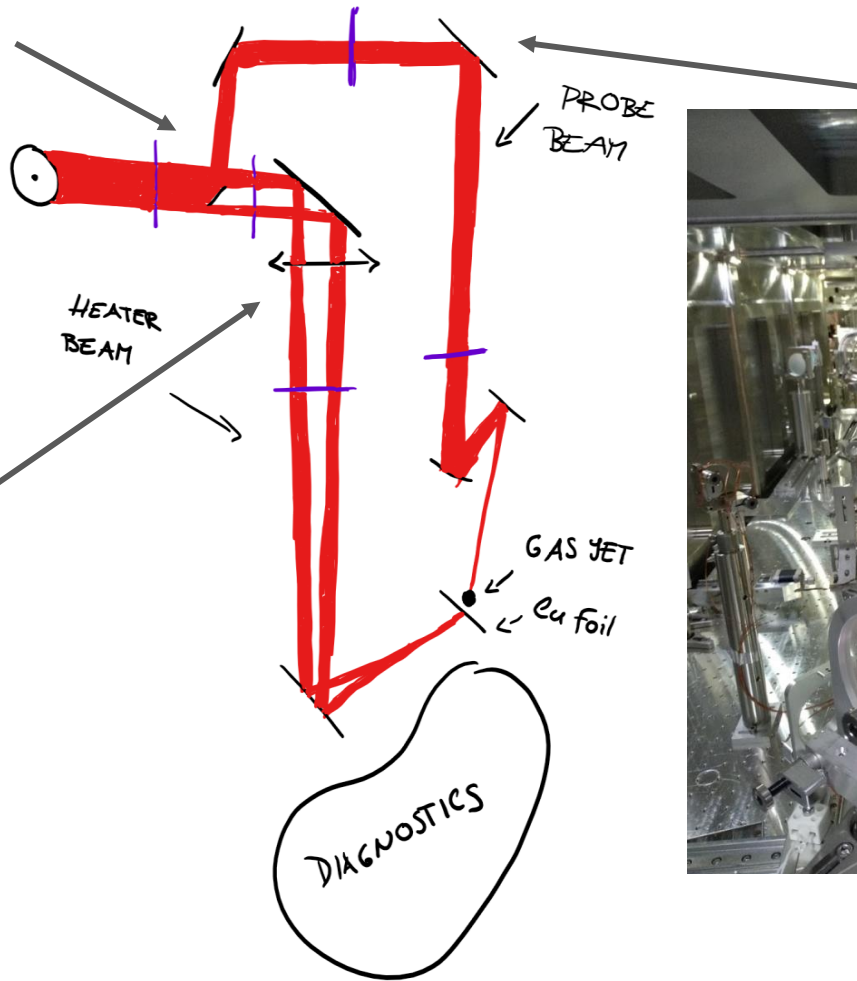
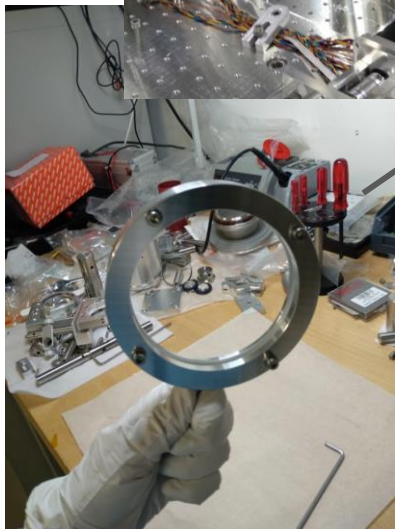
speed of light [m/s]	delay we want [ps]	distance on one mirror we need to add [mm]	total distance we need to add [mm]
299792458	0	0,00	0,00
	2	0,30	0,60
	5	0,75	1,50
	10	1,50	3,00
	20	3,00	6,00
	30	4,50	8,99
	40	6,00	11,99
	50	7,49	14,99
	60	8,99	17,99
	70	10,49	20,99
	8	1,20	2,40
	90	13,49	26,98
	100	14,99	29,98



Each of the numbered objects (except #6) has an image with the corresponding number; its relative location, size, and orientation are shown.







# Shrnutí

- K výzkumu přechodových „solid-to-WDM“ lze použít fs pulzů betatronového záření, které můžeme získat při oscilaci urychlených elektronů z LWFA
- Na fokusování prstencového svazku laseru lze použít spojnou čočku
  - Čím větší je její **ohnisková vzdálenost  $f$** , tím větší **vzdálenost  $Z$  od ohniska**, tedy i větší **průměr  $w(Z)$  svazku**, můžeme dostat bez prstencové struktury (při pevném počátečním průměru laseru)
  - Dosáhli jsme lepších výsledků při použití apodizace
- Pro zobrazovací diagnostiku byla vybudována dráha o **celkové délce  $4f$** , kde  $f$  je ohnisková vzdálenost použité spojné čočky umístěné mezi target a kameru
- K vytvoření 100ps zpoždění mezi svazky laseru potřebujeme mít schopnost posunout zrcadla zpožďovacího úseku o vzdálenost 30mm

## "FINAL".doc



FINAL.doc!



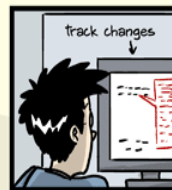
FINAL\_rev.2.doc



FINAL\_rev.6.COMMENTS.doc



FINAL\_rev.8.comments5.  
CORRECTIONS.doc



FINAL\_rev.18.comments7.  
corrections9.MORE.30.doc



FINAL\_rev.22.comments49.  
corrections.10.#@\$%WHYDID  
ICOMETOGRADSDCHOOL?????.doc

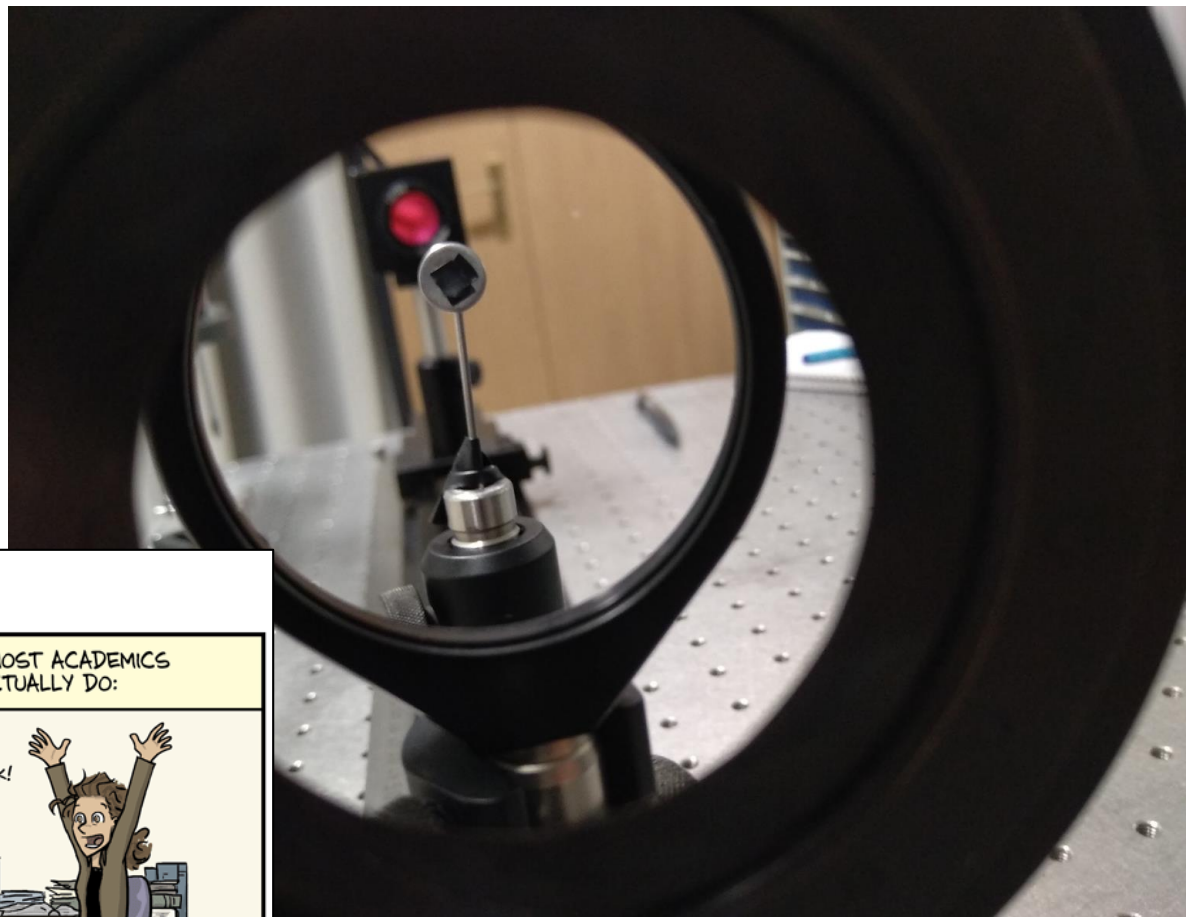
JORGE CHAM © 2012



# Děkuji!

Školitelka: MSci Kateřina Falk, D.Phil  
Ing. Michal Šmid, PhD

Dr. Arie Irman  
Jeyathanan Viswanathan  
Alexander Köhler  
Thomas Kurz  
Dr. Yen-Yu Chan



## SUMMER

WHAT MOST PEOPLE THINK  
ACADEMICS DO ALL SUMMER:



WHAT MOST ACADEMICS  
ACTUALLY DO:



JORGE CHAM © 2018

# Zdroje

[https://en.wikipedia.org/wiki/Apodization#Apodization\\_in\\_optics](https://en.wikipedia.org/wiki/Apodization#Apodization_in_optics)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Airy\\_disk](https://en.wikipedia.org/wiki/Airy_disk)

<http://electrons.wikidot.com/x-ray-diffraction-and-bragg-s-law>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Bragg%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Bragg%27s_law)

<https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Crystal+Spectroscopy>

[http://instructor.physics.lsa.umich.edu/adv-labs/X-Ray\\_Spectroscopy/x\\_ray\\_spectroscopy\\_v2.pdf](http://instructor.physics.lsa.umich.edu/adv-labs/X-Ray_Spectroscopy/x_ray_spectroscopy_v2.pdf)

<https://en.wikipedia.org/wiki/K-edge>

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1186895/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray\\_crystallography](https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography)

<https://www.wikiskripta.eu/w/Laser>

<https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/>

<https://mail.google.com/mail/u/2/#inbox/KtbxLxgBvHnMSKfTbGQVjMzpFzTsHpQSfg?projector=1&messagePartId=0.1.1>

[https://drive.google.com/drive/u/4/folders/17baKgORWaEjgL17mPgbCJL0XSkSTCv\\_7](https://drive.google.com/drive/u/4/folders/17baKgORWaEjgL17mPgbCJL0XSkSTCv_7)

<https://drive.google.com/drive/u/4/folders/1wV-FR1JU9a9Eu8FCbKEPoBdxhBEFyBmf>

<https://drive.google.com/drive/u/4/folders/1wV-FR1JU9a9Eu8FCbKEPoBdxhBEFyBmf>

<https://drive.google.com/drive/u/4/folders/1jRLQL2daHdZtPsvli9Jan6WO1wyZjoAD>

<https://www.email.cz/download/k/GaWkUbt->

[https://www.email.cz/download/k/GaWkUbt-Rqazde1A\\_1bG93EB3JNFPexsr7FU4M09latLPVlnmgIG3tLBFMveTSBX29ks48c/Cho\\_WDM\\_Cu\\_structure\\_absorption\\_xray\\_PRL\\_2011.pdf](https://www.email.cz/download/k/GaWkUbt-Rqazde1A_1bG93EB3JNFPexsr7FU4M09latLPVlnmgIG3tLBFMveTSBX29ks48c/Cho_WDM_Cu_structure_absorption_xray_PRL_2011.pdf)