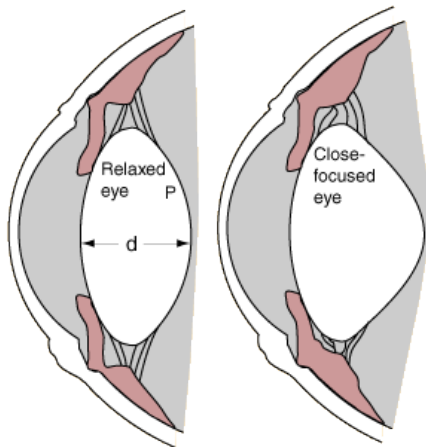


akomodace



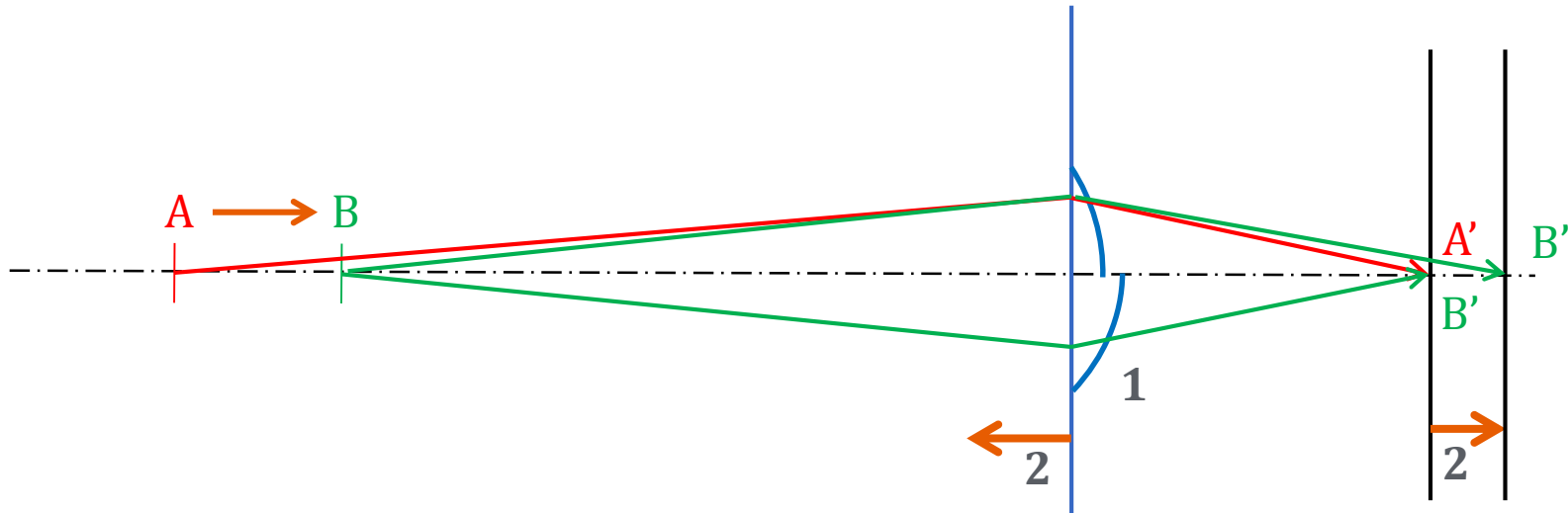
Akomodace

proces, při němž oko přizpůsobuje svou mohutnost, aby zaostřilo na objekty v různých vzdálenostech

například emetrop:

- zobrazuje vzdálené objekty na sítnici neakomodovaným (relaxovaným) okem, přitom jevergence svazku dopadajícího na rohovku nulová
- pokud pozoruje bližší objekt ve vzdálenosti například 50 cm před okem, jevergence svazku dopadajícího na rohovku $-2D$
- mohutnost tedy oka musí být zvýšena o $+2D$ vzhledem k vrcholu rohovky

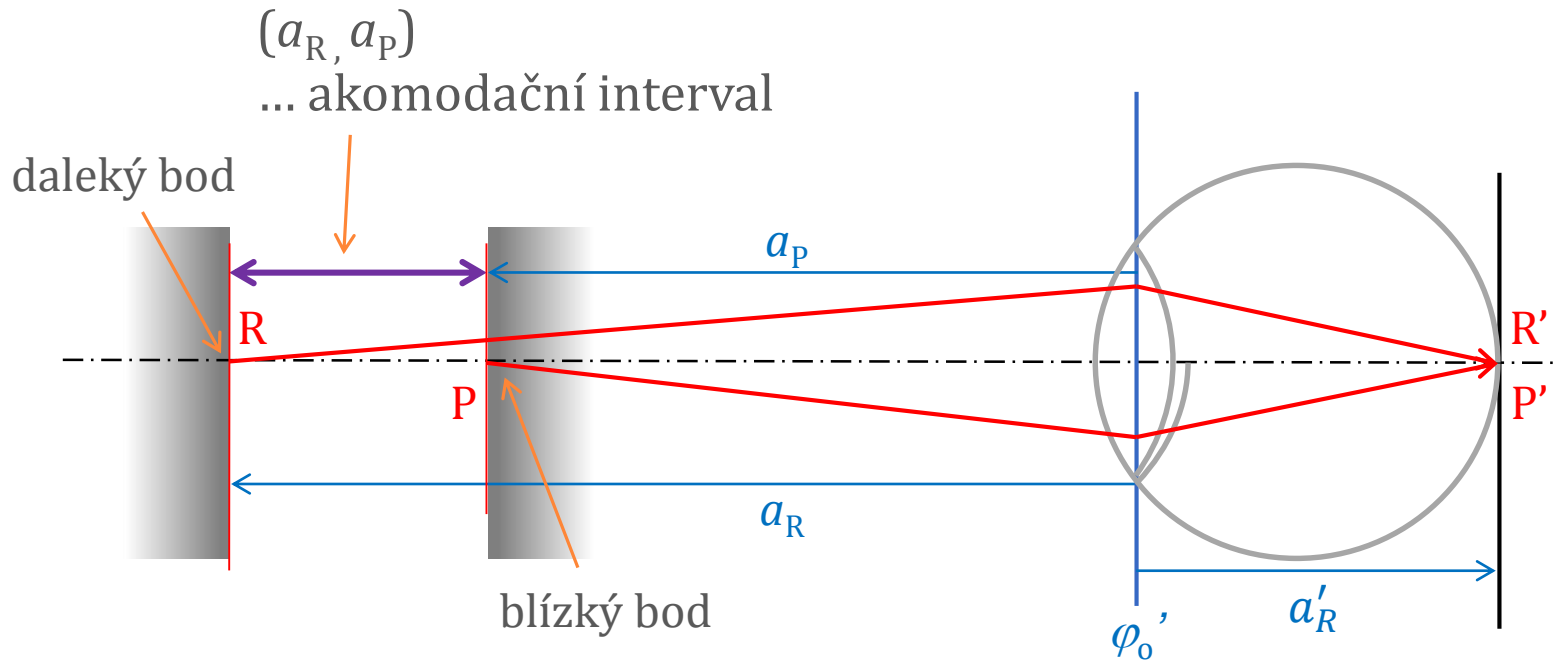
Akomodace



možnosti přeastření z $A \rightarrow B$

1. změna optické mohutnosti φ'_o zobrazovací soustavy (u lidského oka převládá)
2. změna polohy optické soustavy nebo detektoru (jen v malé míře)

Akomodační interval a šíře

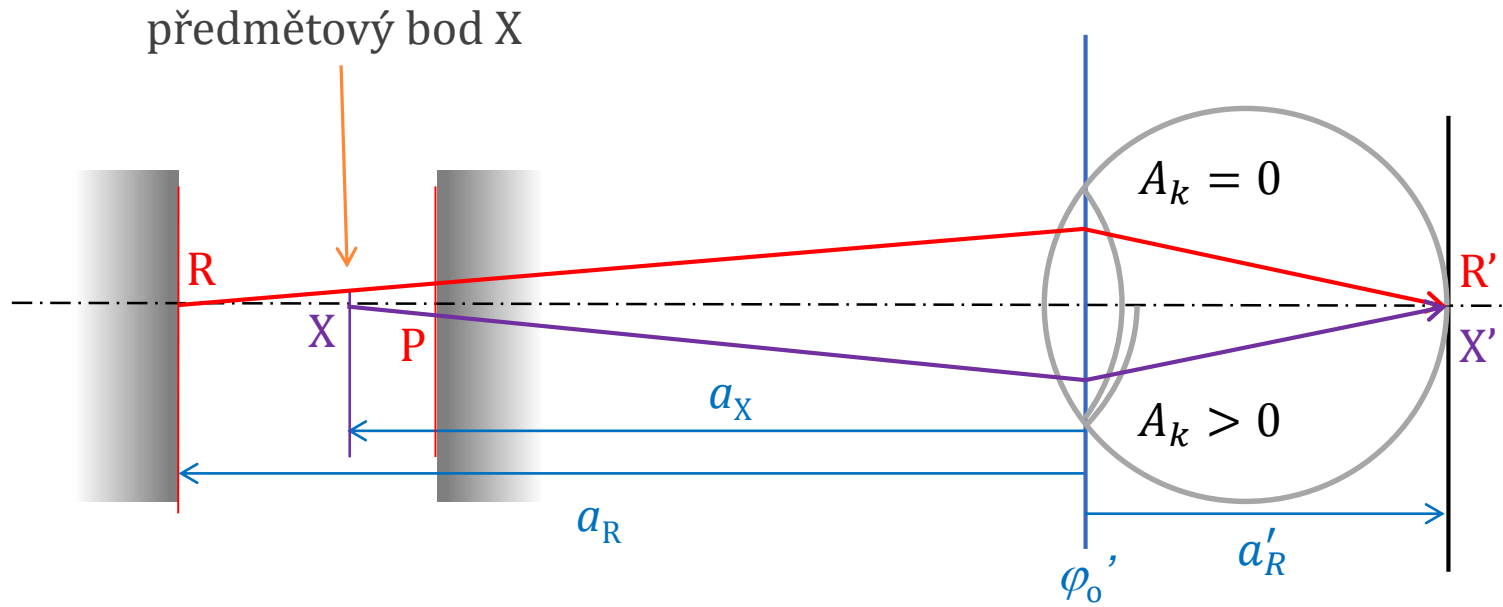


$$A_{\check{s}} = \varphi'_{o,max} - \varphi'_{o,min} = \frac{1}{a_R} - \frac{1}{a_P} = A_R - A_P$$

↑
akomodační šíře (amplituda)

(zde zanedbáváme posun hlavních rovin oka při akomodaci: $a'_R \approx \text{konst}$)

akomodace



$$A_{kX} = \varphi'_{o,X} - \varphi'_{o,min} = \frac{1}{a_R} - \frac{1}{a_X} = A_R - A_X$$

↑
akomodace

(zde zanedbáváme posun hlavních rovin oka při akomodaci: $a'_R \approx \text{konst}$)

Mechanismus akomodace

- Jan Kepler (1571 – 1630): r. 1611 si uvědomil, že objekty jsou zobrazovány na sítnici, tudíž je akomodace nezbytná
- Christoph Scheiner (1573 – 1650): r. 1619 demonstroval schopnost oka akomodovat pomocí tzv. *Scheinerova disku*
- René Descartes (1596 - 1650): poprvé navrhl, že by akomodaci mohla působit změna tvaru oční čočky
- Thomas Young (1773 – 1829): eliminoval vliv rohovky skleněnou čočkou připevněnou k oku s vodní imerzí a stále byl schopen akomodovat, tj. prokázal, že rohovka nezodpovídá za akomodaci; ukázal také, že akomodace nenastává změnou délky oka
- Herman von Helmholtz (1821 – 1894): *relaxační teorie*: napjatá zonulární vlákna udržují čočku v oploštělém tvaru, při uvolnění (relaxaci) vláken nabývá čočka tvaru s vyšší křivostí ploch
- Marius Tscherning (1854 – 1939)
- Edgar F. Fincham 1937: modifikovaná Helmholtzova teorie, takřka odpovídající dnešním poznatkům a moderní teorii

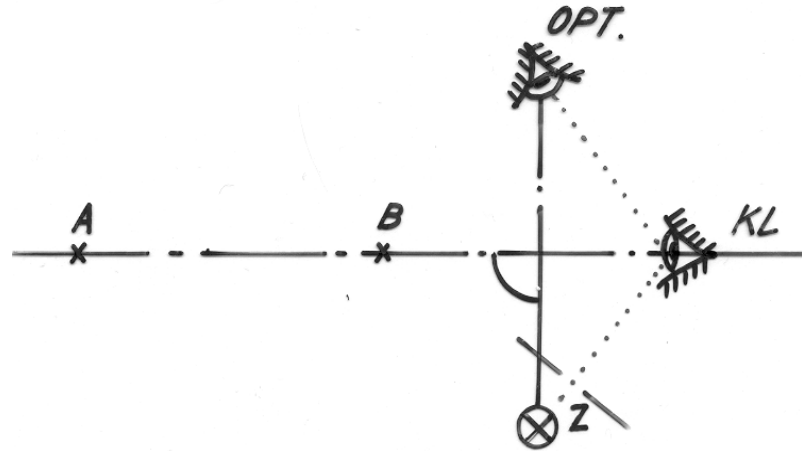


A. Tunncliffe: Introduction to Visual Optics, ABDO, Canterbury 1993.

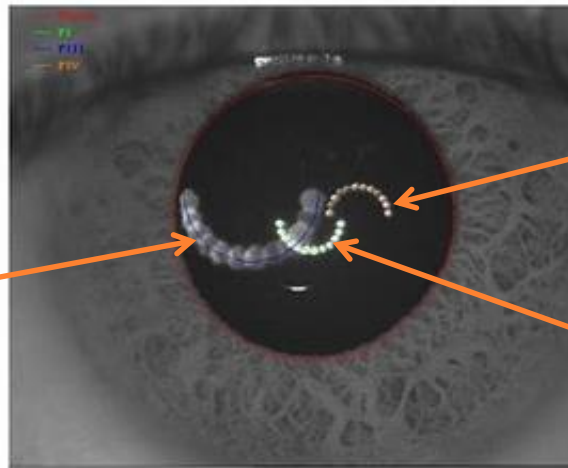
Mechanismus akomodace: Purkyňův pokus



Jan Evangelista Purkyně
(1787 - 1869)



odraz na přední
lámavé ploše
čočky (PIII)



odraz na zadní
lámavé ploše
čočky (PIV)

odraz na přední
lámavé ploše
rohovky (PI)

Purkyňův pokus

oko:
neakomodované (R) – akomodované (A)

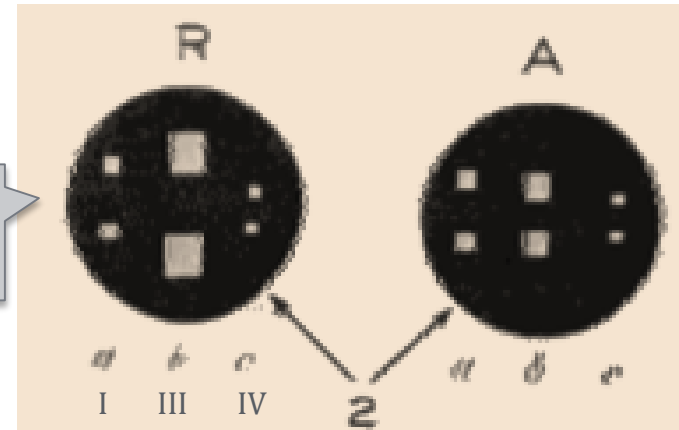


Table 12.3 The Purkinje images (calculated from Le Grand's schematic eye)

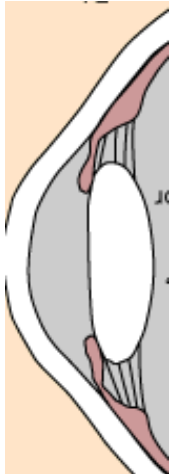
Image No.	Relative brightness	Unaccommodated eye				Eye accommodated 6.96 D (distant object)	
		Distant object		Object at 500 mm		Image position (mm)	Relative size
		Image position (mm)	Relative size	Image position (mm)	Relative size		
I	1	+3.900	1	+3.870	1	+3.900	1
II	0.010	+3.605	0.820	+3.585	0.821	+3.605	0.820
III	0.008	+10.726	1.971	+10.610	1.945	+6.200	1.102
IV	0.008	+4.625	-0.763	+4.325	-0.762	+5.237	-0.773

Image positions expressed as their distances from the anterior corneal vertex.

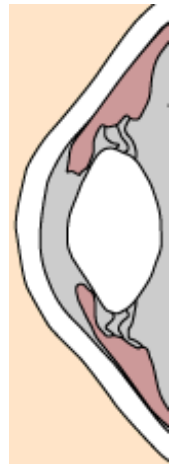
I, II ... lámavé plochy rohovky, III, IV ... lámavé plochy čočky

A. G. Bennett, R. B. Rabbetts: Clinical Visual Optics. Elsevier Health Sciences, 1998.

Mechanismus akomodace



$$A_k = 0$$



$$A_k > 0$$

1. Je-li ciliární sval relaxován, udržuje elastická tkáň ciliárního tělíska zonulární vlákna napjata, pouzdro udržuje čočku v oploštělém tvaru (poloměry křivosti vnějších ploch čočky: +10 mm, -6 mm), oko vidí do dálky.
2. Při akomodaci do blízka je ciliární sval stažen, ciliární tělísko se pohybuje vpřed a stahuje se ke středu, a tím je uvolněno napětí zonulárních vláken.
3. Elastický obal (kapsule) stlačuje čočku a za pomoci tlaku sklivce se první plocha čočky vydouvá do tvaru s vyšší křivostí – v místech, kde je kapsule nejtenší (poloměry křivosti vnějších ploch čočky: +5,33 mm, -5,33 mm)
4. Při návratu k vidění do dálky ciliární sval relaxuje, elastická tkáň ciliárního tělíska napíná zonule a s pomocí elasticity čočky je čočka stažena do ploššího, tenčího tvaru.

A. Tunnaclyffe: Introduction to Visual Optics, ABDO, Canterbury 1993.

Gullstrandovo oko – akomodační klid

plocha č.	1	2	3	4	5	6
n'	1,376	1,336	1,386	1,406	1,386	1,336
n	1	1,376	1,336	1,386	1,406	1,386
r	7,7	6,8	10	7,911	-5,76	-6
d	0,5	3,1	0,546	2,419	0,635	
x_1 plochy	0	0,5	3,6	4,146	6,565	7,2
x	nekon.	27,6787	27,3808	25,2193	22,0391	19,9691
n/x	0	0,04971	0,04879	0,05496	0,0638	0,06941
$\varphi = (n'-n)/r$	0,04883	-0,0059	0,005	0,00253	0,00347	0,00833
n'/x'	0,04883	0,04383	0,05379	0,05749	0,06727	0,07774
x'	28,1787	30,4808	25,7653	24,4581	20,6041	17,1854
$x'-d$	27,6787	27,3808	25,2193	22,0391	19,9691	
$x'/(x'-d)$	1,01806	1,11322	1,02165	1,10976	1,0318	
	$f'_R = 31,0314$					

$x'(F') = 17,1854\text{mm}$
 $x'(H') = -5,5992\text{mm}$
 $x'(N') = 0,13106\text{mm}$

$f' = 22,7846\text{mm}$
 $\varphi'_c = 58,6361\text{D}$

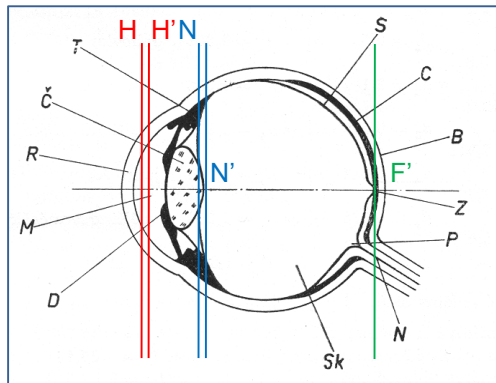
$x_1(F') = 24,3854\text{mm}$
 $x_1(H') = 1,6008\text{mm}$
 $x_1(N') = 7,33106\text{mm}$

6	5	4	3	2	1
1,386	1,406	1,386	1,336	1,376	1
1,336	1,386	1,406	1,386	1,336	1,376
6	5,76	-7,911	-10	-6,8	-7,7
0,635	2,419	0,546	3,1	0,5	
nekon.	165,685	116,356	94,3094	64,73	92,7424
0	0,00837	0,01208	0,0147	0,02064	0,01484
0,00833	0,00347	0,00253	0,005	-0,0059	0,04883
0,00833	0,01184	0,01461	0,0197	0,01476	0,06367
166,32	118,775	94,8554	67,83	93,2424	15,7065
165,685	116,356	94,3094	64,73	92,7424	
1,00383	1,02079	1,00579	1,04789	1,00539	

$x(F) = -15,706\text{mm}$
 $x(H) = 1,34786\text{mm}$
 $x(N) = 7,07811\text{mm}$

$f = -17,054\text{mm}$
 $\varphi'_c = 58,6361\text{D}$

$x_1(F) = -15,706\text{mm}$
 $x_1(H) = 1,34786\text{mm}$
 $x_1(N) = 7,07811\text{mm}$



- R - rohovka
- M - komorová voda
- Č - čočka
- Sk - sklivec
- S - sítnice
- Z - žlutá skvrna
- D - duhovka
- T - ciliární sval
- C - cévnatka
- B - bělima
- P - papila, slepá skvrna
- N - oční nerv

Gullstrandovo oko – akomodační maximum

plocha č.	1	2	3	4	5	6
n'	1,376	1,336	1,386	1,406	1,386	1,336
n	1	1,376	1,336	1,386	1,406	1,386
r	7,7	6,8	5,33	2,655	-2,655	-5,33
d	0,5	2,7	0,6725	1,655	1,6725	
x_1 plochy	0	0,5	3,2	3,8725	5,5275	7,2
x	nekon.	27,6787	27,7808	23,4437	19,4392	15,6827
n/x	0	0,04971	0,04809	0,05912	0,07233	0,08838
$\varphi = (n'-n)/r$	0,04883	-0,0059	0,00938	0,00753	0,00753	0,00938
n'/x'	0,04883	0,04383	0,05747	0,06665	0,07986	0,09776
x'	28,1787	30,4808	21,052	21,0942	17,3552	13,6663
$x'-d$	27,6787	27,7808	23,4437	19,4392	15,6827	
$x'/(x'-d)$	1,01806	1,09719	1,02869	1,08514	1,10665	
	$f'_R = 31,0314$					

$x'(F') = 13,6663\text{mm}$
 $x'(H') = -5,1912\text{mm}$
 $x'(N') = -0,4486\text{mm}$

$f' = 18,8575\text{mm}$
 $\varphi'_c = 70,8471\text{D}$

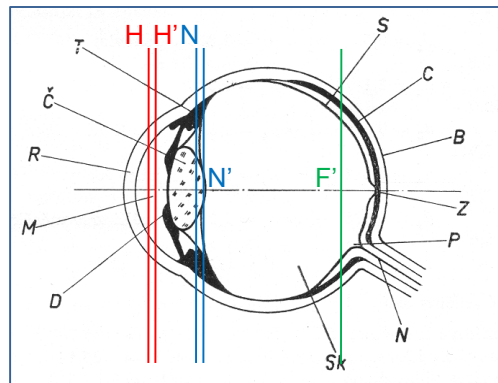
$x_1(F') = 20,8663\text{mm}$
 $x_1(H') = 2,0088\text{mm}$
 $x_1(N') = 6,75141\text{mm}$

	6	5	4	3	2	1
	1,386	1,406	1,386	1,336	1,376	1
	1,336	1,386	1,406	1,386	1,336	1,376
	5,33	2,655	-2,655	-5,33	-6,8	-7,7
	1,6725	1,655	0,6725	2,7	0,5	
	nekon.	146,075	80,9477	54,9853	35,9265	43,4551
	0	0,00949	0,01737	0,02521	0,03719	0,03166
	0,00938	0,00753	0,00753	0,00938	-0,0059	0,04883
	0,00938	0,01702	0,0249	0,03459	0,0313	0,0805
	147,748	82,6027	55,6578	38,6265	43,9551	12,423
	146,075	80,9477	54,9853	35,9265	43,4551	
	1,01145	1,02045	1,01223	1,07515	1,01151	

$x(F) = -12,423\text{mm}$
 $x(H) = 1,69193\text{mm}$
 $x(N) = 6,43454\text{mm}$

$f = -14,115\text{mm}$
 $\varphi'_c = 70,8471\text{D}$

$x_1(F) = -12,423\text{mm}$
 $x_1(H) = 1,69193\text{mm}$
 $x_1(N) = 6,43454\text{mm}$



- R - rohovka
- M - komorová voda
- Č - čočka
- Sk - sklivec
- S - sítnice
- Z - žlutá skvrna
- D - duhovka
- T - ciliární sval
- C - cévnatka
- B - bělima
- P - papila, slepá skvrna
- N - oční nerv

Změna parametrů Gullstrandova oka při akomodaci

akomodační klid:

$$x_1(F) = -15,706 \text{ mm}$$

$$x_1(H) = 1,34786 \text{ mm}$$

$$x_1(N) = 7,07811 \text{ mm}$$

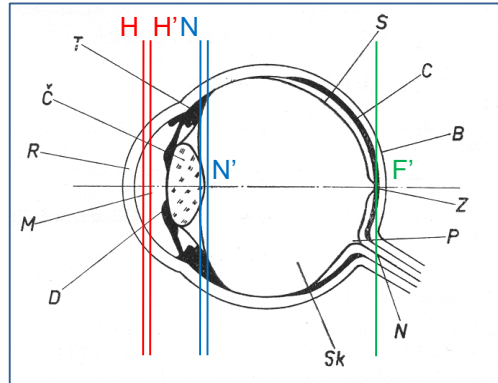
$$x_1(F') = 24,3854 \text{ mm}$$

$$x_1(H') = 1,6008 \text{ mm}$$

$$x_1(N') = 7,33106 \text{ mm}$$

$$f' = 22,7846 \text{ mm}$$

$$\varphi'_c = 58,6361 \text{ D}$$



jen čočka:

$$\varphi' = 19,1109 \text{ D}$$

akomodační maximum:

$$x_1(F) = -12,423 \text{ mm}$$

$$x_1(H) = 1,69193 \text{ mm}$$

$$x_1(N) = 6,43454 \text{ mm}$$

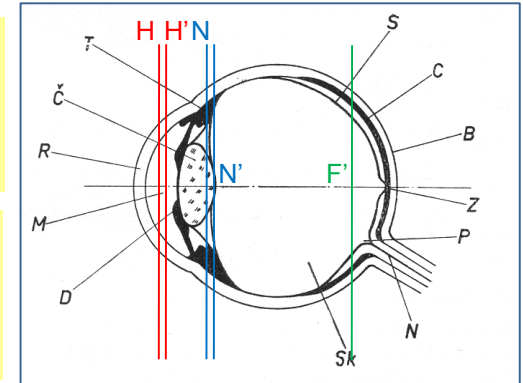
$$x_1(F') = 20,8663 \text{ mm}$$

$$x_1(H') = 2,0088 \text{ mm}$$

$$x_1(N') = 6,75141 \text{ mm}$$

$$f' = 18,8575 \text{ mm}$$

$$\varphi'_c = 70,8471 \text{ D}$$

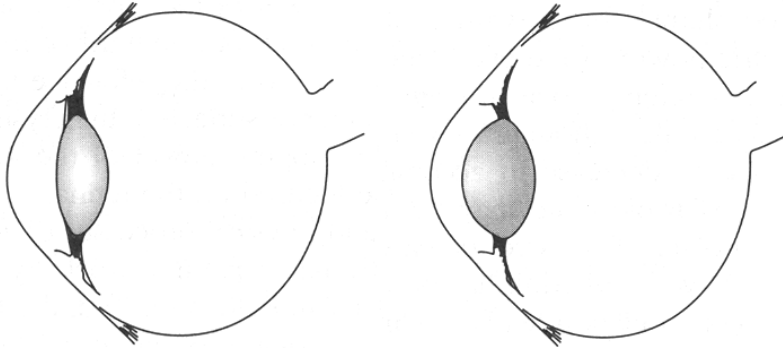


jen čočka:

$$\varphi' = 33,1060 \text{ D}$$

- mohutnost oka se zvýší asi o +12,2 D (21 %)
- mohutnost čočky se zvýší asi o +14,0 D
- ohniskové vzdálenosti se zkrátí asi o 17 %
- hlavní roviny se posunou směrem od rohovky k čočce asi o 0,35-0,40 mm
- uzlové body se posunou směrem k rohovce asi o 0,6 mm

změna parametrů Gullstrandova oka při akomodaci



	akom. klid	akom. max.
Indexy lomu :		
rohovka	1,376	1,376
komorová voda a sklivce	1,336	1,336
čočka ekvivalentní	1,406	1,406
čočka	1,386	1,386
Místo :		
první lámavá plocha rohovky	0	0
druhá lámavá plocha rohovky	0,5	0,5
první lám. plochy čočky	3,6	3,2
první lám. pl. ekviv. čočky	4,146	3,8725
druhá lám. pl. ekviv. čočky	6,565	5,5275
druhá lám. pl. čočky	7,2	7,2
optické centrum čočky		
Poloměry zakřivení :		
první lám. p. rohovky	7,7	7,7
druhá lám. pl. rohovky	6,8	6,8
ekviv. pl. čočky		
první lám. pl. čočky	10,000	5,33
první lám. pl. ekviv. čočky	7,911	2,655
druhá lám. pl. ekviv. čočky	-5,76	-2,655
druhá lám. pl. čočky	-6,000	-5,33
Optická mohutnost :		
první lám. pl. rohovky	48,83	48,83
druhá lám. pl. rohovky	-5,88	-5,88
ekviv. pl.		
první lám. pl. čočky	5,000	9,375
jádra čočky	5,985	14,96
druhá lám. pl. čočky	8,33	9,375
Rohovkový systém :		
optická mohutnost	43,05	43,05
místo předmětového hl. bodu	-0,0496	-0,0496
místo obrazového hl. bodu	-0,0506	-0,0506
předmětová ohnisková vzdálenost	-23,227	23,227
obrazová ohnisková vzdálenost	31,031	31,131
Čočkový systém :		
optická mohutnost	19,11	33,06
místo předmětového hl. bodu	5,678	5,145
místo obrazového hl. bodu	5,808	5,255
ohnisková vzdálenost	69,908	40,416
Celkový systém :		
optická mohutnost	58,64	70,57
místo předmětového hl. bodu	1,348	1,722
místo obrazového hl. bodu	1,602	2,086
místo předm. ohniska	-15,707	-12,397
místo obraz. ohniska	24,387	21,016
předm. ohnisk. vzdál.	-17,055	-14,169
obraz. ohnisk. vzdál.	22,785	18,030
místo fovey centralis	24,00	24,00
axiální refrakce	1,00	-9,6
místo blízkého bodu P		-102,3
skutečný střed otáčení oka C'	13,0	13,0
místo předmětového uzlového bodu	7,078	6,533
místo obraz. uzlového bodu	7,332	6,847
místo vstupní pupily	3,047	2,668
místo výstupní pupily	3,667	3,212

Arizona Eye Model

Name	Radius	Conic	Index	Abbe	Thickness
	7.8 mm	-0.25			
Cornea			1.377	57.1	0.55 mm
	6.5 mm	-0.25			
Aqueous			1.337	61.3	t_{aq}
	R_{ant}	K_{ant}			
Lens			n_{lens}	51.9	t_{lens}
	R_{post}	K_{post}			
Vitreous			1.336	61.1	16.713 mm
	-13.4 mm	0.00			
Retina					

$$R_{ant} = 12.0 - 0.4A$$

$$K_{ant} = -7.518749 + 1.285720A \quad A \dots$$

$$R_{post} = -5.224557 + 0.2A$$

$$K_{post} = -1.353971 - 0.431762A \quad \text{accommodation}$$

$$t_{aq} = 2.97 - 0.04A$$

$$t_{lens} = 3.767 + 0.04A$$

in diopters

$$n_{lens} = 1.42 + 0.00256A - 0.00022A^2$$

$$z = \frac{r^2 / R}{1 + \sqrt{1 - (K + 1) \frac{r^2}{R^2}}}$$

z = sag of surface

$$r^2 = x^2 + y^2$$

R = radius of curvature

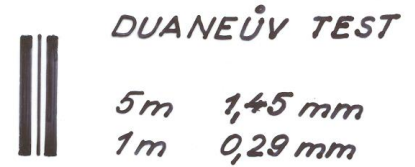
K = conic constant

$K < -1$	Hyperboloid
$K = -1$	Paraboloid
$-1 < K < 0$	Prolate Spheroid (Ellipsoid)
$K = 0$	Sphere
$K > 0$	Oblate Spheroid (Ellipsoid)

Měření akomodace

- nutný je (pseudo)emetropický stav oka
- testovací obrazec (Duaneův test, Glaserův test, zmenšená Snellenova tabule) se přibližuje až do rozmazání, nebo vzdaluje až do zaostření
- akomodační šíře je pak dána vergencí vzdálenosti blízkého bodu P od předmětové hlavní roviny oka

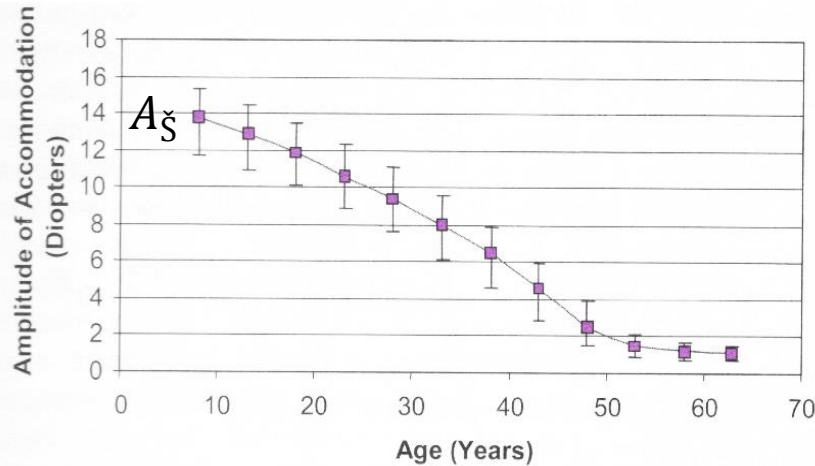
$$A_{\text{š}} = A_R - A_P = \frac{1}{a_R} - \frac{1}{a_P} = \left| \frac{1}{a_P} \right|$$



Klidová (zbytková) akomodace

- při prázdném zorném poli nebo ve tmě je mohutnost emetropického oka o 1,0 D – 1,5 D větší, než minimální, což odpovídá ostrému zobrazení ze vzdálenosti 1,0 m – 2/3 m, tj. oko je efektivně myopické
- **noční myopie** je posun k myopii při nízkém osvětlení (cca o 1,5 D, ale i více) vlivem otvorové vady při zvětšené pupile, osově barevné vady, posuvu maximální spektrální citlivosti k 500 nm (Purkyňův posuv) a nadměrné akomodace
- **přístrojová myopie** je nadměrná akomodace po použití přístrojů s okuláry

Závislost akomodační šíře na věku



J. Schwiagerling: Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics. SPIE, Bellingham 2004, str. 25.

TABLE 8-1. AMPLITUDE OF ACCOMMODATION AS A FUNCTION OF AGE

Age (years)	Typical Amplitude of Accommodation (diopters) ^a	$A_{\text{š}}$
10	12.50	
20	9.75	
30	7.25	
40	4.00	
50	2.50	
60	1.25	
70	0.50	
75	0.00	

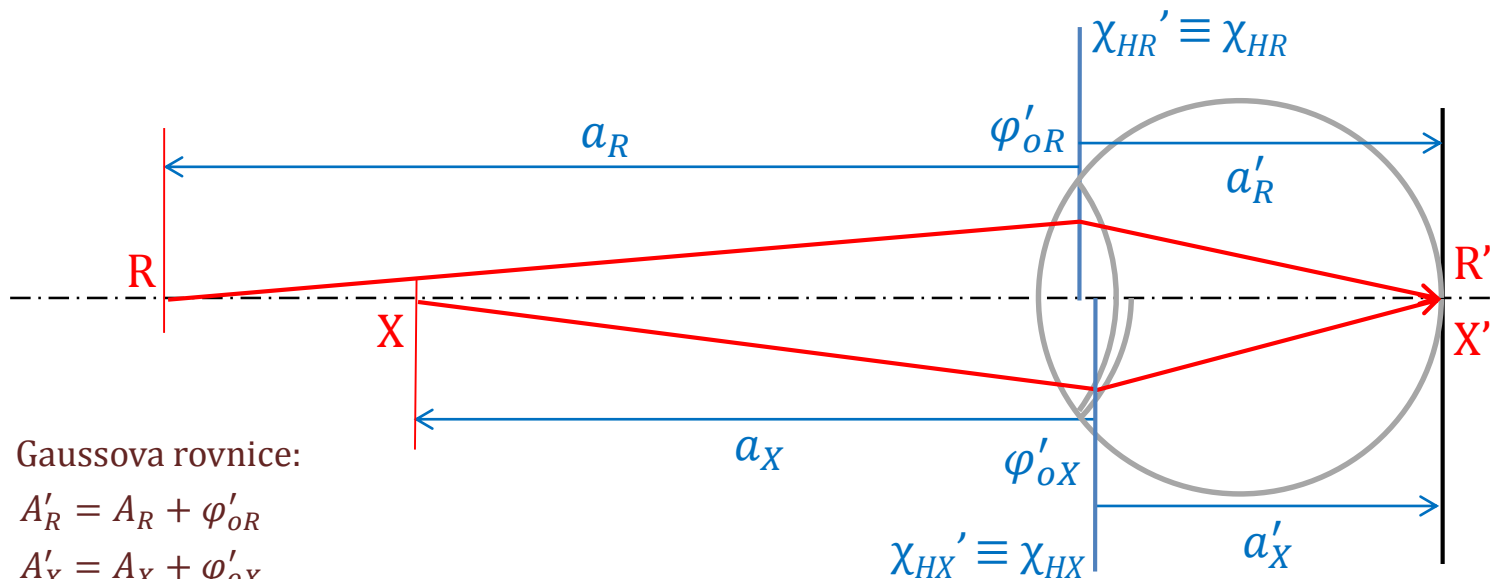
^aExtrapolated from the data of Donders (1864) and Duane (1912).

S. H. Schwartz : Geometrical and Visual Optics – A Clinical Introduction. McGraw Hill, New York 2002, str. 97.

- výsledky měření značně záleží na použité metodě
- akomodační šíře se zmenšuje asi o 0,25 D ročně od 20 let věku
- příčinou je zejména:
 - ztráta elasticity kapsule
 - růst čočky s věkem
 - redukce prostoru mezi ciliárním tělískem a okrajem čočky (růst čočky, hypertrofie ciliárního svalu), která vede ke snížení napětí zonulí
 - asi od 30 let věku začíná jádro čočky tuhnut

(Tunnacliffe)

Přesný optický rozbor



Gaussova rovnice:

$$A'_R = A_R + \varphi'_{oR}$$

$$A'_X = A_X + \varphi'_{oX}$$



$$A_R - A_X = \varphi'_{oX} - \varphi'_{oR} - (A'_X - A'_R) = A_{kX} - \Delta A'_X$$

(**nezanedbáváme** posun hlavních rovin oka při akomodaci: $a'_X \neq \text{konst}$)

předpokládejme:

$$\Delta A'_X \approx \text{konst} \cdot A_{kX}$$

Gullstr. oko, X .. blízký bod:

$$A_R - A_P \approx 11 \text{ D}$$

$$\varphi'_{oP} - \varphi'_{oR} \approx 12,2 \text{ D}$$

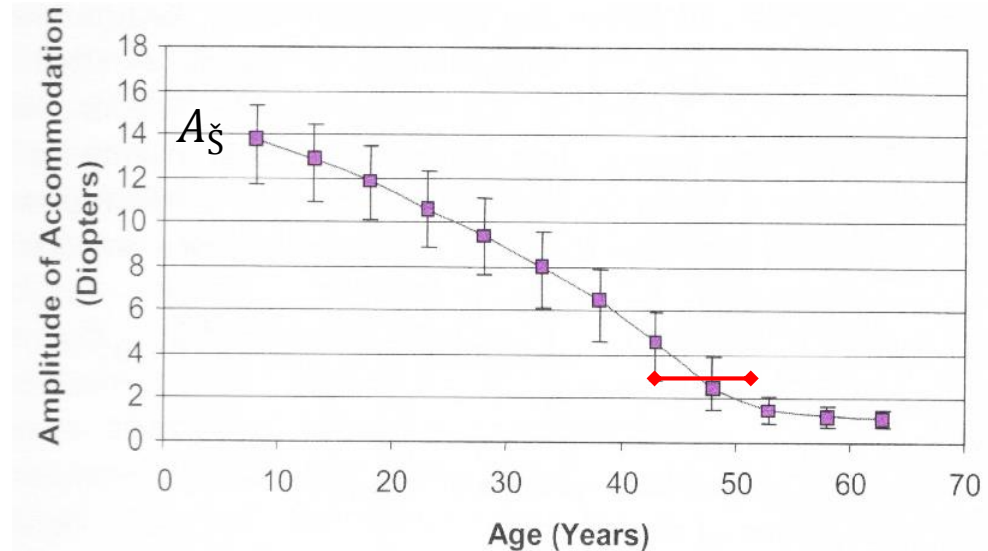
$$\Delta A'_P \approx 1,2 \text{ D}$$

$$\text{konst} \approx 0,1$$

$$A_R - A_X = A_{kX} - 0,1A_{kX} = 0,9A_{kX}$$

Graeffův faktor

Presbyopie



J. Schwiererling: Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics. SPIE, Bellingham 2004, str. 25.

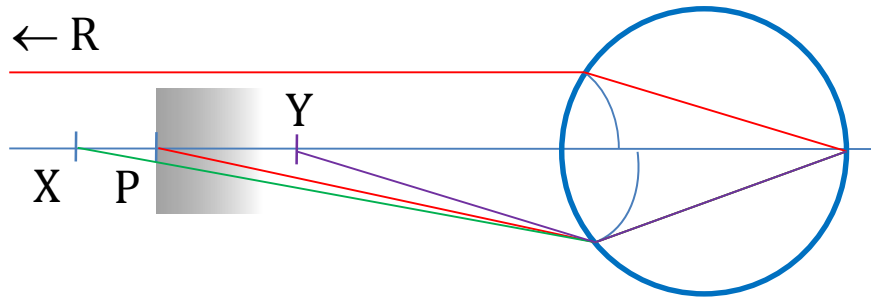
- pokles akomodační šíře pod cca 3 dioptrie (Tunnacliffe)
- blízký bod je pak vzdálen o více než 33 cm od oka
- koriguje se tzv. přídávkem do blízka (adící) Add, o nějž se zvyšuje přirozená akomodace oka, tj. platí $A'_k \approx A_k + Add$
- v tomto případě postačuje přibližný výpočet, tj. nepřepočítáváme lámavost podle vzdálenosti brýlové čočky

Korekce presbyopie

Technické možnosti korekce presbyopie:

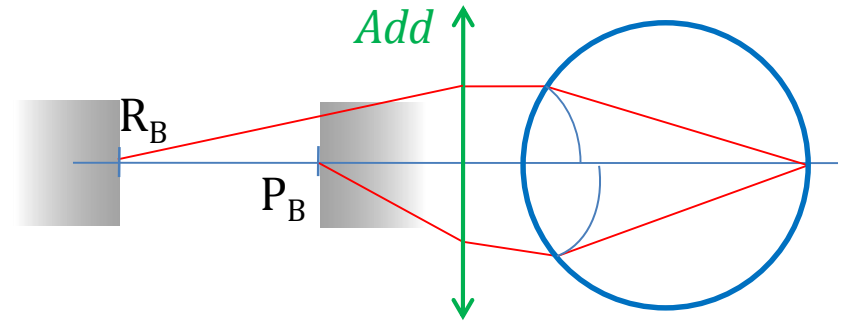
- spojná (pozitivní) čočka
- bifokální, trifokální brýle (pro ametropa, dolní část obsahuje přídavek do blízka)
- „monovision“ (brýlové, kontaktní nebo nitrooční čočky, na jednom oku na blízko, na druhém do dálky)
- progresivní čočky (brýlové čočky s mohutností proměnnou ve vertikálním směru)
- akomodující nitrooční čočky (změna tvaru)
- difrakční kontaktní a nitrooční čočky (mají několik ohnisek, umožňují současné vidění do různých vzdáleností)
- multizonální refraktivní kontaktní a nitrooční čočky (mají několik oblastí, obvykle anulárních, s různými mohutnostmi pro současné vidění)

Korekce presbyopie pro emetropické oko



$$\begin{aligned} 1/a_R &= 0 \\ 1/a_X &= -A_k \\ 1/a_P &= -A_\xi \\ 1/a_Y &= -A_k - Add \end{aligned}$$

- při pozorování bodu X v konečné vzdálenosti je nutná akomodace A_k
- pro blízký bod P je nutná maximální akomodace A_ξ
- chceme-li pozorovat ještě bližší bod Y, musíme akomodaci uměle zvětšit o přídavek Add



$$\begin{aligned} 1/a_{PB} &= -Add - A_\xi \\ 1/a_{RB} &= -Add \end{aligned}$$

- tím se blízký bod odpovídající maximální akomodaci A_ξ s přídavkem Add přesouvá blíže oku do pozice P_B
- vzdálenost dalekého bodu pak odpovídá pouhému přídavku Add , který má význam uměle doplněné akomodace
- interval ostrého vidění je pak $(a_{RB}, a_{PB}) = \left(-\frac{1}{Add}, -\frac{1}{Add+A_\xi}\right)$

Vhodná volba adice

rozhoduje poloha hlavního pracovního bodu HPB, jeho vzdálenost h od oka

$$a_{RB} = -1/Add \quad a_{PB} = -1/(Add + A_{\xi})$$

$$Add = -1/h \quad (\text{extrém})$$



$$Add = -1/h - A_{\xi}/2$$



$$Add = -1/h - 2A_{\xi}/3$$



$$Add = -1/h - A_{\xi} \quad (\text{extrém})$$



$Add = age/8 - 5,00 \pm 0,25$
(pro zajímavost, za předpokladu 40 cm
pracovní vzdálenosti, W. F. Long 1992)

$$(h = -20 \text{ cm} \quad A_{\xi} = 3,0 \text{ D})$$