

F4110
Kvantová fyzika atomárních soustav
letní semestr 2009 - 2010

XI.
Inversní linie čpavku: Sláva a pád

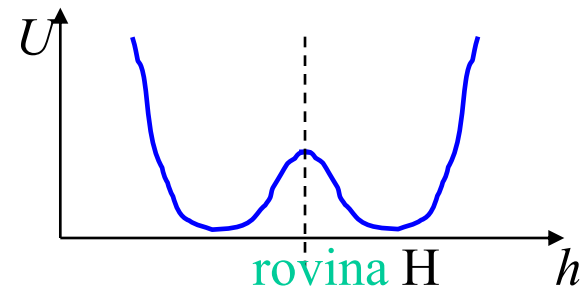
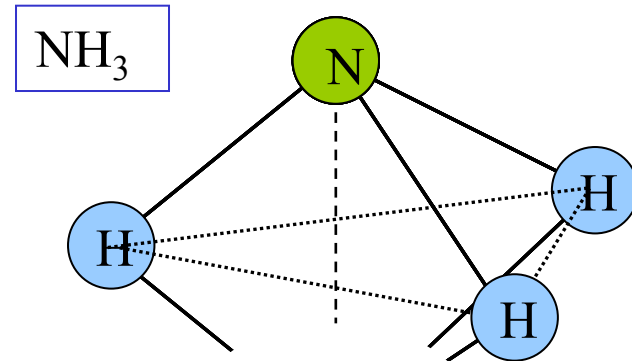
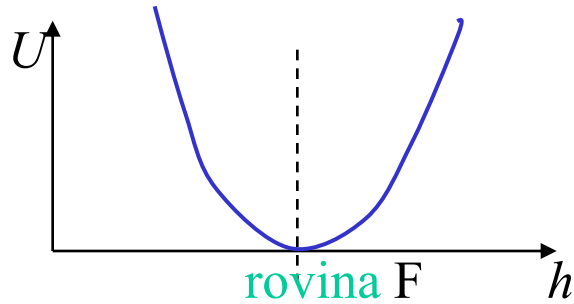
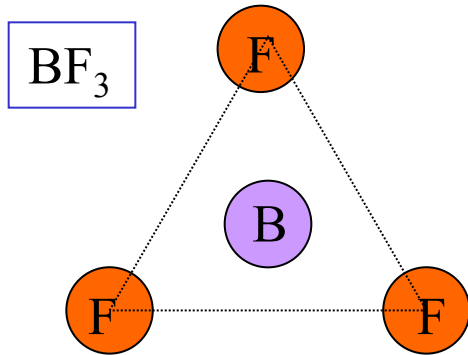
KOTLÁŘSKÁ 5. KVĚTNA 2010

Úvodem

- inverzní linie čpavku jako případ spontánního narušení symetrie
- kvantově chemický výklad tvaru molekuly čpavku
- symetrie čtyřatomových molekul
- normální kmity čpavku a dublety
- vysvětlení dubletu tunelováním napříč bariérou
- explicitní výpočet pro modely dvou typů
- čpavkové hodiny
- dvouhladinový maser

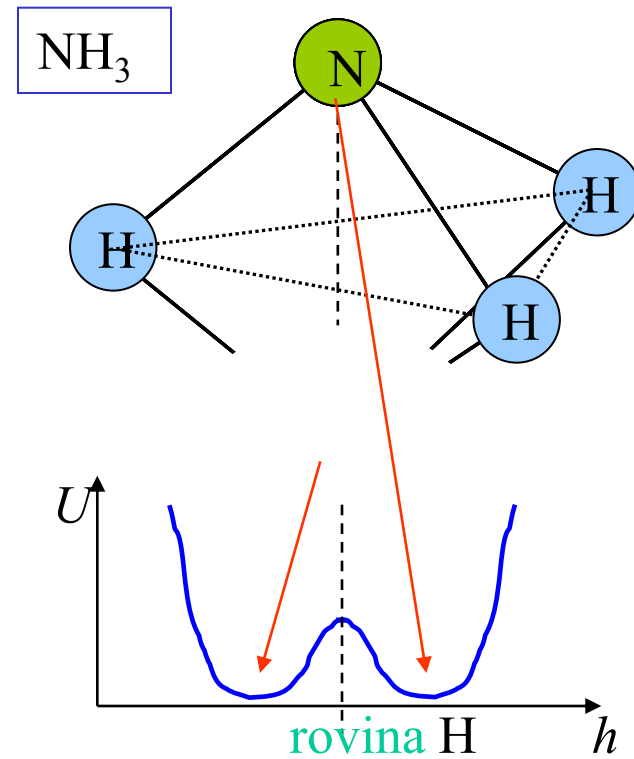
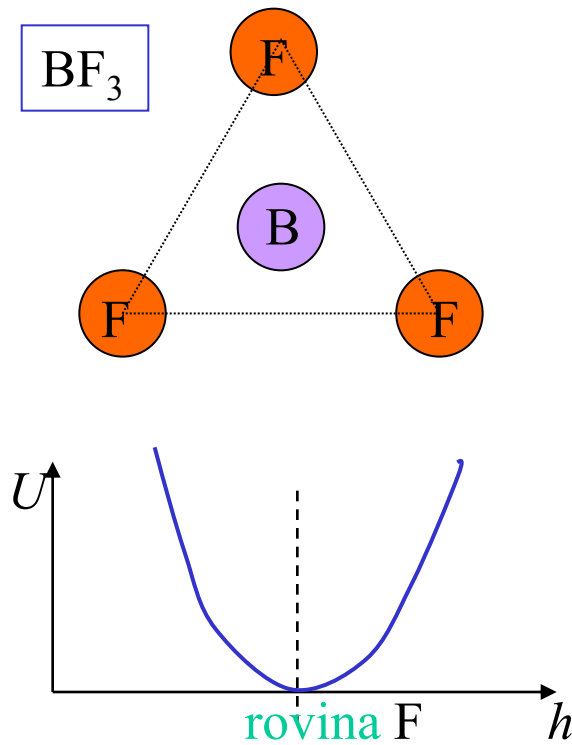
Pyramidální molekula:
případ spontánního narušení symetrie

Rovnovážná struktura molekul AB_3



U adiabatická potenciální energie

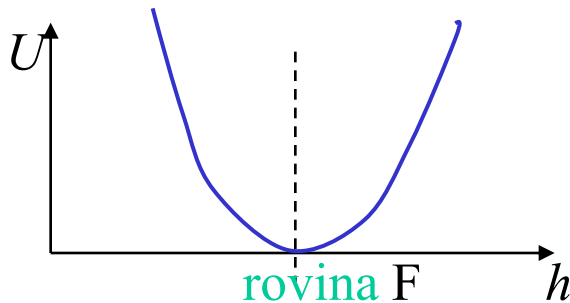
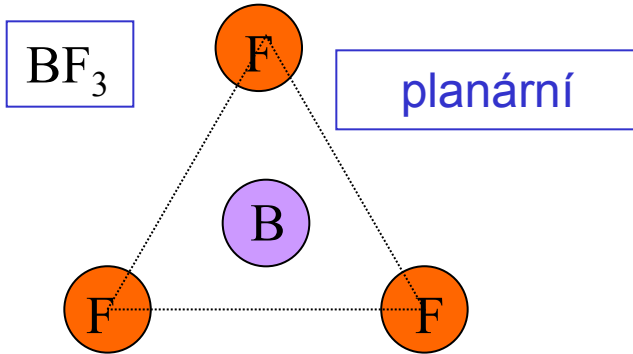
Rovnovážná struktura molekul AB_3



U adiabatická potenciální energie

PLANÁRNÍ STRUKTURA

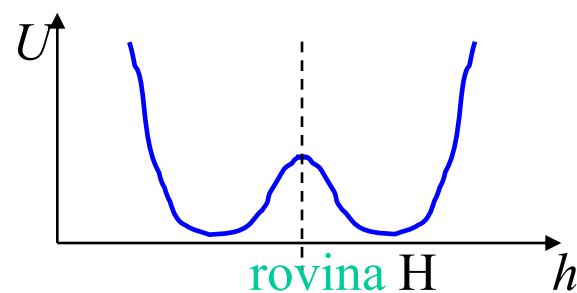
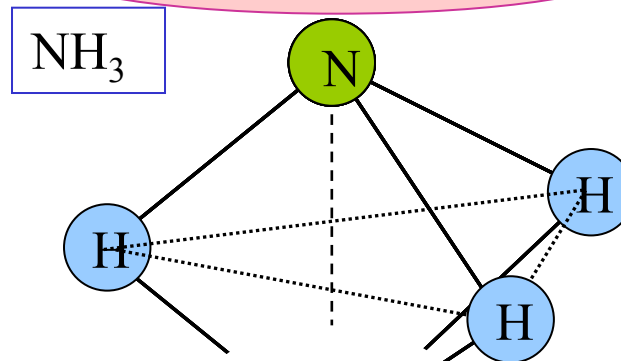
STABILNÍ



U adiabatická potenciální energie

stabilní rovnováha
nedegenerovaný
základní stav

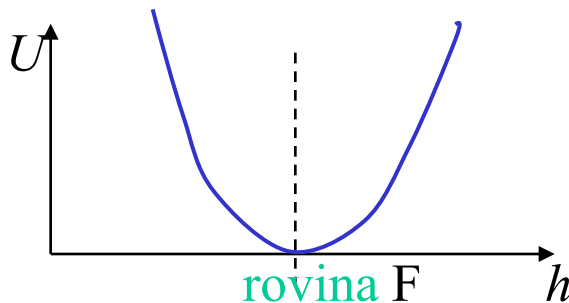
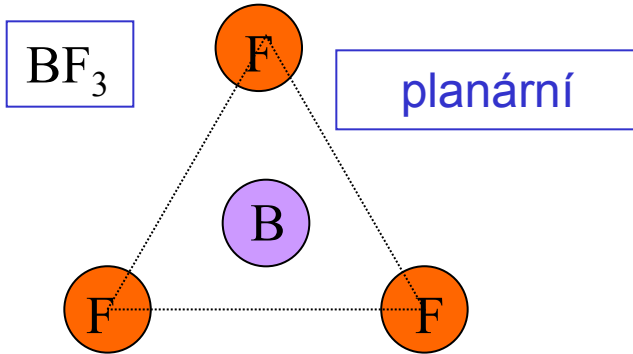
NESTABILNÍ



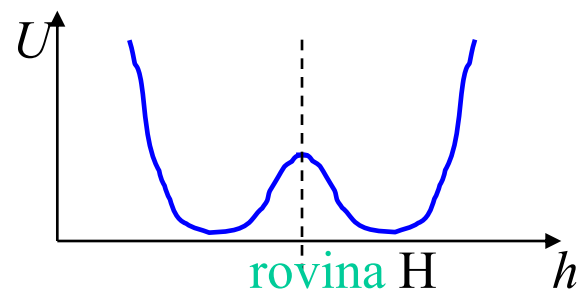
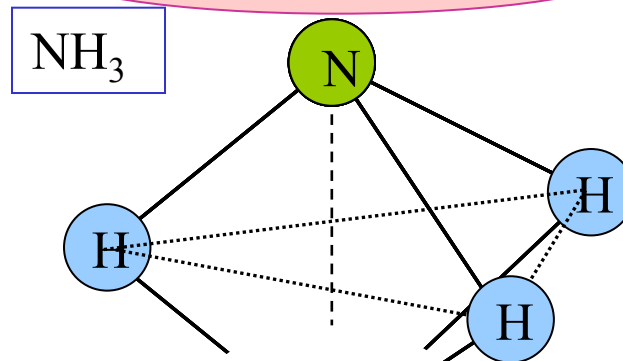
metastabilní rovnováha
degenerovaný
základní stav

PLANÁRNÍ STRUKTURA

STABILNÍ



NESTABILNÍ



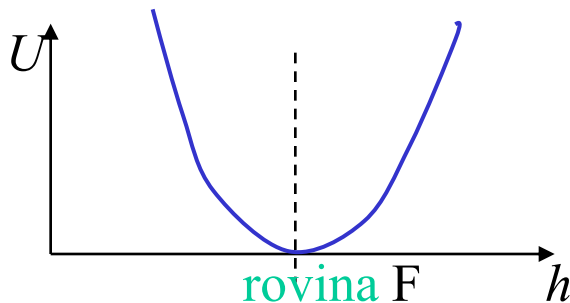
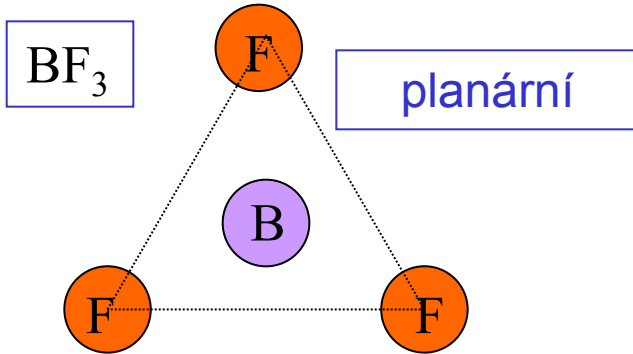
PŘÍKLAD SPONTÁNNÍHO NARUŠENÍ SYMETRIE

Dvě rovnocenné polohy atomu dusíku oddělené barierou
atomová žabka

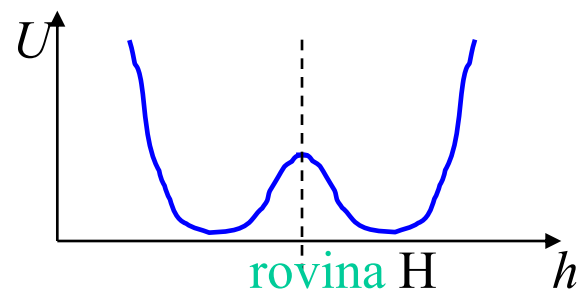
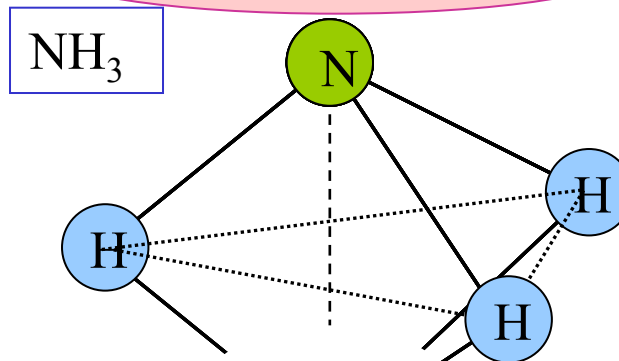
- # Každý z rovnovážných (základních) stavů má symetrii nižší než $U(h)$
- # Soubor všech (... zde obou) rovnovážných stavů má úplnou symetrii

PLANÁRNÍ STRUKTURA

STABILNÍ



NESTABILNÍ



PŘÍKLAD SPONTÁNNÍHO NARUŠENÍ SYMETRIE

Dvě rovnocenné polohy atomu dusíku oddělené bariérou
atomová žabka

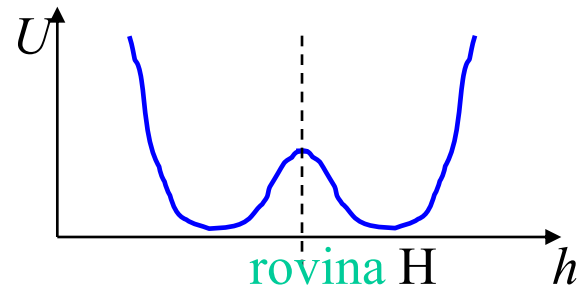
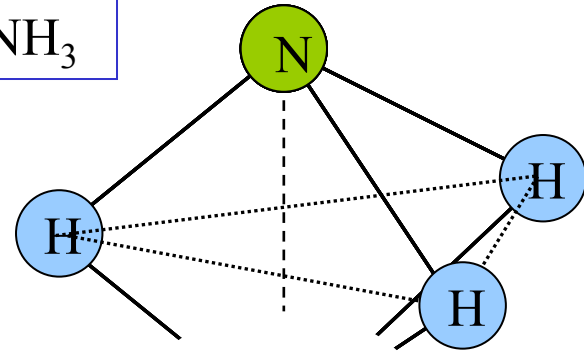
Oba stavy se dají navzájem převést také **pohybem**, např. otočením kolem vodorovné osy. Nejsou tedy dva druhy amoniaku.

Stereoisomery **L** a **D** také mají také mezi sebou bariéru, jsou však dvojí.

Rovnovážná struktura molekul AB_3

Amoniak -- příklad
pyramidální molekuly.
dvě minima
potenciální energie
mezi nimi **bariera.**

NH_3

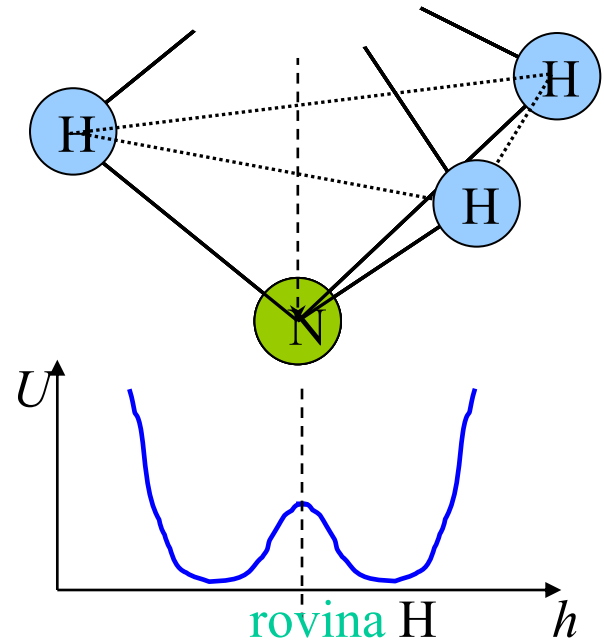


cká potenciální energie

Rovnovážná struktura molekul AB_3

Amoniak -- příklad
pyramidální molekuly.
dvě minima
potenciální energie
mezi nimi **bariera.**

NH_3



cká potenciální energie

Rovnovážná struktura molekul AB_3

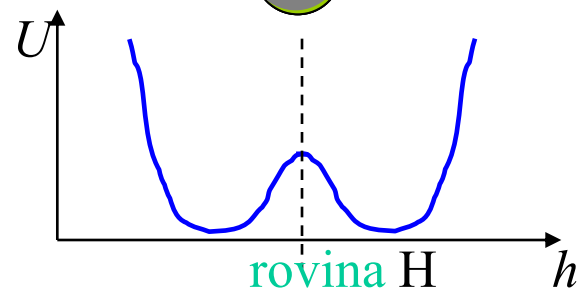
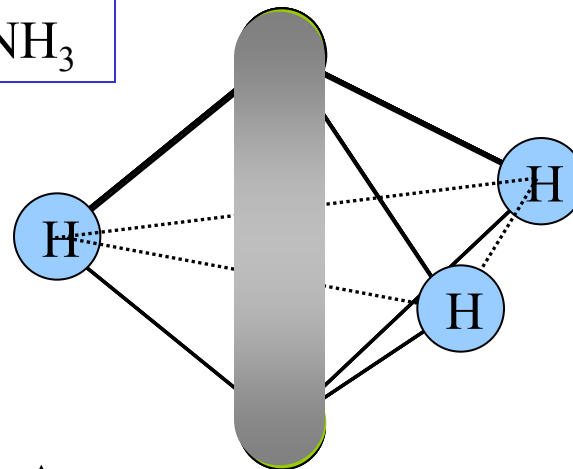
Amoniak -- příklad
pyramidální molekuly.

dvě minima
potenciální energie
mezi nimi **bariera.**

U amoniaku navíc:

*Bariera je kvantová a
dovoluje
tunelování
mezi oběma stavy. Ty
jsou nestacionární*

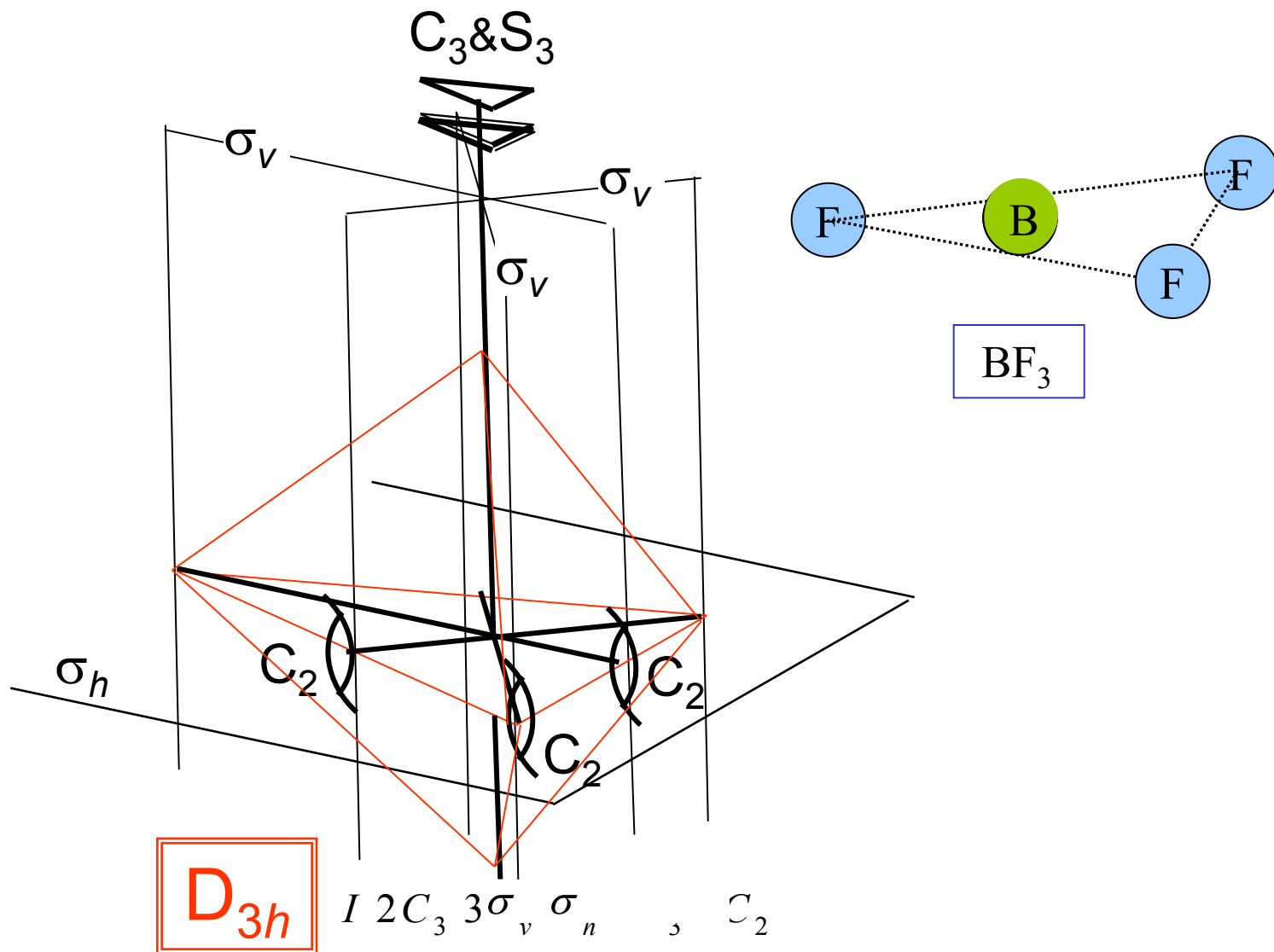
NH_3



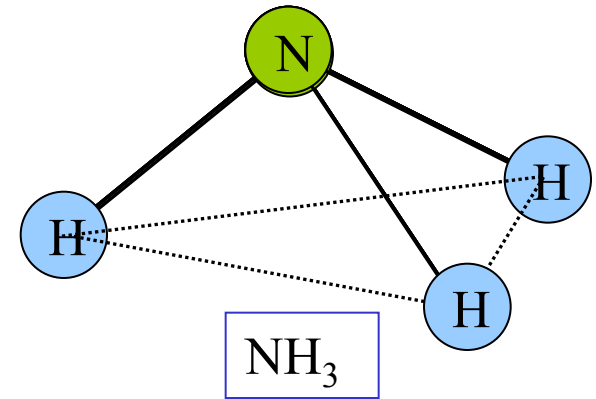
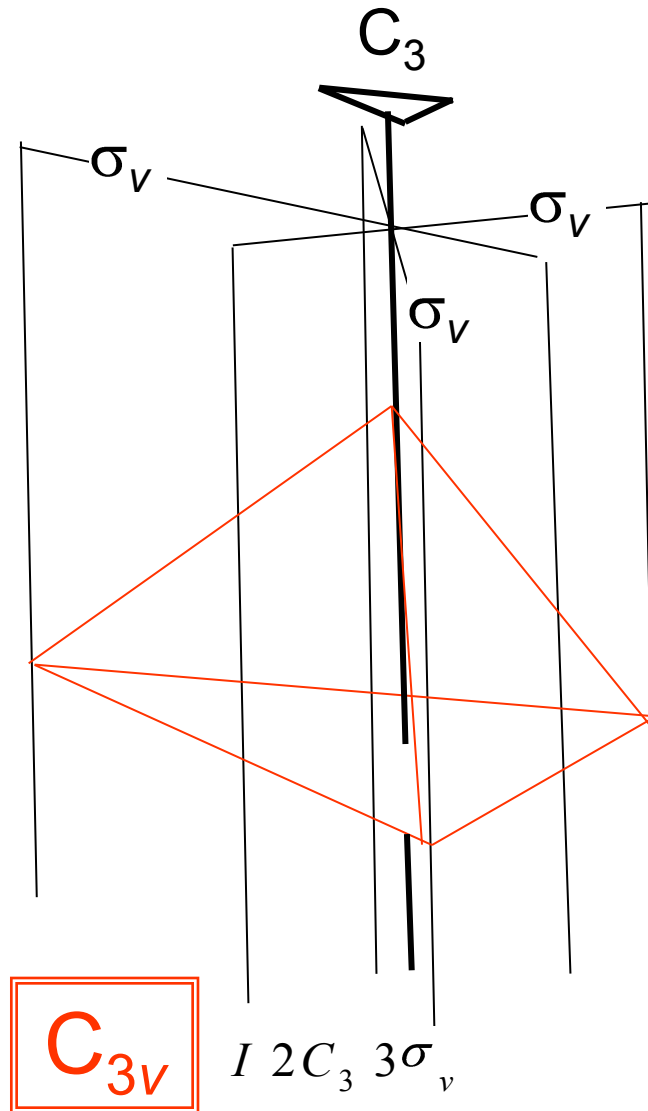
cká potenciální energie

Od planární k pyramidální molekule:
snížení bodové symetrie

BF₃: grupa symetrie bipyramidy, řád 12



NH_3 : grupa symetrie piramidy



INTERMEZZO

Fyzikální příčiny
spontánního narušení symetrie

Východiskem je periodický systém

				(4s, 3d)	(5s, 4d)	(6s, 4f, 5d)	(7s, 5f, 6d)							
		(2s)	(3s)	(4p)	(5p)	(6p)	(7p)							
(1s)	1 H	3 Li	11 Na	19 K	37 Rb	55 Cs	87 Fr	s						
	2 He	4 Be	12 Mg	20 Ca	38 Sr	56 Ba	88 Ra	s ²						
		5 B	13 Al	21 Sc	39 Y	57 La	89 Ac	s ² d						
		6 C	14 Si	22 Ti	40 Zr	1) 71 Lu	2) 103 Lr	s ² d f ^k /s ² f ^{k+1}						
		7 N	15 P	23 V	41 Nb*)	72 Hf	104 Ku	s ² d (f ¹⁴)						
		8 O	16 S	24 Cr	42 Mo	73 Ta	....	s ² d ²					
		9 F	17 Cl	25 Mn	43 Tc*)	74 W*)	....	s ² d ³ , *) s d ⁴					
		10 Ne	18 Ar	26 Fe	44 Ru*)	75 Re	....	s d ⁵ , *) s ² d ⁴					
				27 Co	45 Rh*)	76 Os	....	s ² d ⁵ , *) s d ⁶					
				28 Ni	46 Pd*)	77 Ir	....	s ² d ⁶ , *) s d ⁷					
				29 Cu	47 Ag	78 Pt**)	....	s ² d ⁷ , *) s d ⁸					
				30 Zn	48 Cd	79 Au	....	s ² d ⁸ , *) d ¹⁰ , **) s d ⁹					
				31 Ga	49 In	80 Hg	....	s d ¹⁰					
				32 Ge	50 Sn	81 Tl	....	s ² (d ¹⁰)					
				33 As	51 Sb	82 Pb	....	s ² p					
				34 Se	52 Te	83 Bi	....	s ² p ²					
				35 Br	53 I	84 Po	....	s ² p ³					
				36 Kr	54 Xe	85 At	....	s ² p ⁴					
						86 Rn	....	s ² p ⁵					
								s ² p ⁶						
1)	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	} 6s ² 4f ^{k+1} , *) 6s ² 5d 4f ^k
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd*)	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	
2)	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	} 7s ² 6d 5f ^k , *) 7s ² 5f ^{k+1}
	Th*)	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	
k = 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		

Elektronové konfigurace centrálního atomu

				(4s, 3d)	(5s, 4d)	(6s, 4f, 5d)	(7s, 5f, 6d)							
		(2s)	(3s)	(4p)	(5p)	(6p)	(7p)							
		(2p)	(3p)											
(1)	1 H	5 B	11 Na	19 K	37 Rb	55 Cs	87 Fr	s						
2	2 He	6 C	12 Mg	20 Ca	38 Sr	56 Ba	88 Ra	s ²						
	7 N	13 Al	21 Sc	29 Cu	39 Y	57 La	89 Ac	s ² d						
	8 O	14 Si	22 Ti	27 Co	41 Nb*	71 Lu	103 Lr	s ² d f ^k /s ² f ^{k+1}						
	9 F	15 P	23 V	28 Ni	43 Tc*	72 Hf	104 Ku	s ² d (f ¹⁴)						
	10 Ne	16 S	24 Cr	29 Cu	44 Ru*)	73 Ta	....	s ² d ²					
		17 Cl	25 Mn	30 Zn	45 Rh*)	74 W*)	....	s ² d ³ , *) s d ⁴					
		18 Ar	26 Fe	31 Ga	46 Pd*)	75 Re	....	s d ⁵ , *) s ² d ⁴					
			27 Co	32 Ge	47 Ag	76 Os	....	s ² d ⁵ , *) s d ⁶					
			28 Ni	33 As	48 Cd	77 Ir	....	s ² d ⁶ , *) s d ⁷					
			29 Cu	34 Se	49 In	78 Pt**)	....	s ² d ⁷ , *) s d ⁸					
			30 Zn	35 Br	50 Sn	79 Au	....	s ² d ⁸ , *)					
			31 Ga	36 Kr	51 Sb	80 Hg	....	s d ¹⁰					
			32 Ge		52 Te	81 Tl	....	s ² (d ¹⁰)					
			33 As		53 I	82 Pb	....	s ² p					
			34 Se		54 Xe	83 Bi	....	s ² p ²					
			35 Br			84 Po	....	s ² p ³					
			36 Kr			85 At	....	s ² p ⁴					
						86 Rn	....	s ² p ⁵					
								s ² p ⁶						
1)	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd*)	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	} 6s ² 4f ^{k+1} , *) 6s ² 5d 4f ^k
2)	90 Th*)	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	
k =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	

bor

3 valenční el.
konfig. s²p¹

Elektronové konfigurace centrálního atomu

				(4s, 3d)	(5s, 4d)	(6s, 4f, 5d)	(7s, 5f, 6d)							
		(2s)	(3s)	(4p)	(5p)	(6p)	(7p)							
				19 K	37 Rb	55 Cs	87 Fr	s						
				20 Ca	38 Sr	56 Ba	88 Ra	s ²						
				21 Sc	39 Y	57 La	89 Ac	s ² d						
				22 Ti	40 Zr	71 Lu	103 Lr	s ² d f ^k /s ² f ^{k+1}						
				23 V	41 Nb*	72 Hf	104 Ku	s ² d (f ¹⁴)						
				24 Cr	42 Mo	73 Ta	....	s ² d ²					
				25 Mn	43 Tc*	74 W*)	....	s ² d ³ , *) s d ⁴					
				26 Fe	44 Ru*)	75 Re	....	s d ⁵ , *) s ² d ⁴					
				27 Co	45 Rh*)	76 Os	....	s ² d ⁵ , *) s d ⁶					
				28 Ni	46 Pd*)	77 Ir	....	s ² d ⁶ , *) s d ⁷					
				29 Cu	47 Ag	78 Pt**)	....	s ² d ⁷ , *) s d ⁸					
				30 Zn	48 Cd	79 Au	....	s d ¹⁰					
				31 Ga	49 In	80 Hg	....	s ² (d ¹⁰)					
				32 Ge	50 Sn	81 Tl	....	s ² p					
				33 As	51 Sb	82 Pb	....	s ² p ²					
				34 Se	52 Te	83 Bi	....	s ² p ³					
				35 Br	53 I	84 Po	....	s ² p ⁴					
				36 Kr	54 Xe	85 At	....	s ² p ⁵					
						86 Rn	....	s ² p ⁶					
1)	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	} 6s ² 4f ^{k+1} , *) 6s ² 5d 4f ^k
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd*)	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	
2)	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	} 7s ² 6d 5f ^k , *) 7s ² 5f ^{k+1}
	Th*)	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	
k =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	

bor	dusík	3 valenční el. konfig. s ² p ¹	5 valenčních el. konfig. s ² p ³
-----	-------	---	---

Starobylá úprava periodické tabulky

Periodisches System der Elemente.

Gruppe	0	a I b	a II b	a III b	a IV b	a V b	a VI b	a VII b	VIII	0	
Höchste Wasserstoffverbindung		MH	MH ₂	MH ₃	MH ₄	MH ₃	MH ₂	MH	—	—	
Höchste Sauerstoffverbindung		M ₂ O	MO	M ₂ O ₃	MO ₂	M ₂ O ₅	MO ₃	M ₂ O ₇	wechselnd	—	
Vor-Periode		1 H 1,0080						1 H 1,0081		2 He 4,003	
kleine Perioden	1	2 He 4,003	3 Li 6,940	4 Be 9,02	5 B 10,82	6 C 12,010	7 N 14,008	8 O 16,0000	9 F 19,00	10 Ne 20,183	
	2	10 Ne 20,183	11 Na 22,997	12 Mg 24,32	13 Al 26,97	14 Si 28,06	15 P 30,98	16 S 32,06	17 Cl 35,457	18 Ar 39,944	
große Perioden	3	18 Ar 39,944	19 K 39,096 29 Cu 63,57	20 Ca 40,08 30 Zn 65,38	21 Sc 45,10 31 Ga 69,72	22 Ti 47,90 32 Ge 72,60	23 V 50,95 33 As 74,91	24 Cr 52,01 34 Se 78,96	25 Mn 54,93 35 Br 79,916	26 Fe 27 Co 28 Ni 55,85 58,94 58,69	36 Kr 83,7
	4	36 Kr 83,7	37 Rb 85,48 47 Ag 107,880	38 Sr 87,63 48 Cd 112,41	39 Y 88,92 49 In 114,76	40 Zr 91,22 50 Sn 118,70	41 Nb 92,91 51 Sb 121,76	42 Mo 95,95 52 Te 127,61	43 — 53 J 126,92	44 Ru 45 Rh 46 Pd 101,7 102,91 106,7	54 X 131,3
	5	54 X 131,3	55 Cs 132,91 79 Au 197,2	56 Ba 137,36 80 Hg 200,61	57/71 ΣLa ¹⁾ 81 Tl 204,39	72 Hf 178,6 82 Pb 207,21	73 Ta 180,88 83 Bi 209,00	74 W 183,92 84 Po	75 Re 186,31 85 —	76 Os 77 Ir 78 Pt 190,2 193,1 195,23	86 Rn 222
6	86 Rn 222	87 —	88 Ra 226,05	89 Ac	90 Th 232,12	91 Pa 231	92 U 238,07				

¹⁾ Σ La = Lanthaniden:
57 bis 71

					La
					138,92
Ce	Pr	Nd	61	Sm	Eu
140,13	140,92	144,27	—	150,43	152,0
Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
159,2	162,46	164,94	167,2	169,4	173,04
					Gd
					156,9
					Cp
					174,99

Starobylá úprava periodické tabulky

Periodisches System der Elemente.

Gruppe	0	a I b	a II b	a III b	a IV b	a V b	a VI b	a VII b	VIII	0	
Höchste Wasserstoffverbindung		MH	MH ₂	MH ₃	MH ₄	MH ₃	MH ₂	MH	—	—	
oxydy		M ₂ O	MO	M ₂ O ₃	MO ₂	M ₂ O ₅	MO ₃	M ₂ O ₇	wechselnd	—	
vor-Periode		1 H 1,0080						1 H 1,0081		2 He 4,003	
kleine Perioden	1	2 He 4,003	3 Li 6,940	4 Be 9,02	5 B 10,82	6 C 12,010	7 N 14,008	8 O 16,0000	9 F 19,00	10 Ne 20,183	
	2	18 Ar 39,944	11 Na 22,997	12 Mg 24,32	13 Al 26,97	14 Si 28,06	15 P 30,98	16 S 32,06	17 Cl 35,457	18 Ar 39,944	
große Perioden	3	18 Ar 39,944	19 K 39,096 29 Cu 63,57	20 Ca 40,08 30 Zn 65,38	21 Sc 45,10 31 Ga 69,72	22 Ti 47,90 32 Ge 72,60	23 V 50,95 33 As 74,91	24 Cr 52,01 34 Se 78,96	25 Mn 54,93 35 Br 79,916	26 Fe 55,85 27 Co 58,94 28 Ni 58,69	36 Kr 83,7
	4	36 Kr 83,7	37 Rb 85,48 47 Ag 107,880	38 Sr 87,63 48 Cd 112,41	39 Y 88,92 49 In 114,76	40 Zr 91,22 50 Sn 118,70	41 Nb 92,91 51 Sb 121,76	42 Mo 95,95 52 Te 127,61	43 — 53 J 126,92	44 Ru 101,7 45 Rh 102,91 46 Pd 106,7	54 X 131,3
	5	54 X 131,3	55 Cs 132,91 79 Au 197,2	56 Ba 137,36 80 Hg 200,61	57/71 ΣLa ¹⁾ 81 Tl 204,39	72 Hf 178,6 82 Pb 207,21	73 Ta 180,88 83 Bi 209,00	74 W 183,92 84 Po	75 Re 186,31 85 —	76 Os 190,2 77 Ir 193,1 78 Pt 195,23	86 Rn 222
6	86 Rn 222	87 —	88 Ra 226,05	89 Ac	90 Th 232,12	91 Pa 231	92 U 238,07				

1) Σ La = Lanthaniden:
57 bis 71

					La	
					138,92	
Ce	Pr	Nd	61	Sm	Eu	Gd
140,13	140,92	144,27	—	150,43	152,0	156,9
Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Cp
159,2	162,46	164,94	167,2	169,4	173,04	174,99

Starobylá úprava periodické tabulky

Periodisches System der Elemente.

Gruppe	0	a I b	a II b	a III b	a IV b	a V b	a VI b	a VII b	VIII	0																		
		MH	MH ₂	MH ₃	MH ₄	MH ₃	MH ₂	MH	—	—																		
		M ₂ O	MO	M ₂ O ₃	MO ₂	M ₂ O ₅	MO ₃	M ₂ O ₇	wechselnd	—																		
vor-Periode		1 H 1,0080						1 H 1,0081		2 He 4,003																		
kleine Perioden	1	2 He 4,003	3 Li 6,940	4 Be 9,02	5 B 10,82	6 C 12,010	7 N 14,008	8 O 16,0000	9 F 19,00	10 Ne 20,183																		
	2	18 Ar 39,944	11 Na 22,997	12 Mg 24,32	13 Al 26,97	14 Si 28,06	15 P 30,98	16 S 32,06	17 Cl 35,457	18 Ar 39,944																		
große Perioden	3	19 K 39,096	20 Ca 40,08	21 Sc 45,10	22 Ti 47,90	23 V 50,95	24 Cr 52,01	25 Mn 54,93	26 Fe 55,85	27 Co 58,94	28 Ni 58,69																	
	4	36 Kr 83,7	29 Cu 63,57	30 Zn 65,38	31 Ga 69,72	32 Ge 72,60	33 As 74,91	34 Se 78,96	35 Br 79,916	36 Kr 83,7	37 Rb 85,48	38 Sr 87,63	39 Y 88,92	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,95	43 —	44 Ru 101,7	45 Rh 102,91	46 Pd 106,7								
	5	54 X 131,3	47 Ag 107,880	48 Cd 112,41	49 In 114,76	50 Sn 118,70	51 Sb 121,76	52 Te 127,61	53 J 126,92	54 X 131,3	55 Cs 132,91	56 Ba 137,36	57/71 ΣLa ¹⁾	58 Ce 140,13	59 Pr 140,92	60 Nd 144,27	61 —	62 Sm 150,43	63 Eu 152,0	64 Gd 156,9	65 Tb 159,2	66 Dy 162,46	67 Ho 164,94	68 Er 167,2	69 Tm 169,4	70 Yb 173,04	71 Cp 174,99	
6	86 Rn 222	79 Au 197,2	80 Hg 200,61	81 Tl 204,39	82 Pb 207,21	83 Bi 209,00	84 Po	85 —	86 Rn 222	87 —	88 Ra 226,05	89 Ac	90 Th 232,12	91 Pa 231	92 U 238,07													

1) Σ La = Lanthaniden: 57 bis 71

hydridy
oxidy

Souvislost s elektronovou strukturou

Periodisches System der Elemente.

e	0	a I b	a II b	a III b	a IV b	a V b	a VI b	a VII b
e Wasser- bindung		MH	MH ₂	MH ₃	MH ₄	MH ₃	MH ₂	MH
e Sauer- bindung		M ₂ O	MO	M ₂ O ₃	MO ₂	M ₂ O ₅	MO ₃	M ₂ O ₇
	1 H 1,0080							1 H 1,0081
	2 He 4,003	3 Li 6,940	4 Be 9,02	5 B 10,82	6 C 12,010	7 N 14,008	8 O 16,0000	9 F 19,00
	10 Ne 20,183	11 Na 22,997	12 Mg 24,32	13 Al 26,97	14 Si 28,06	15 P 30,98	16 S 32,06	17 Cl 35,457

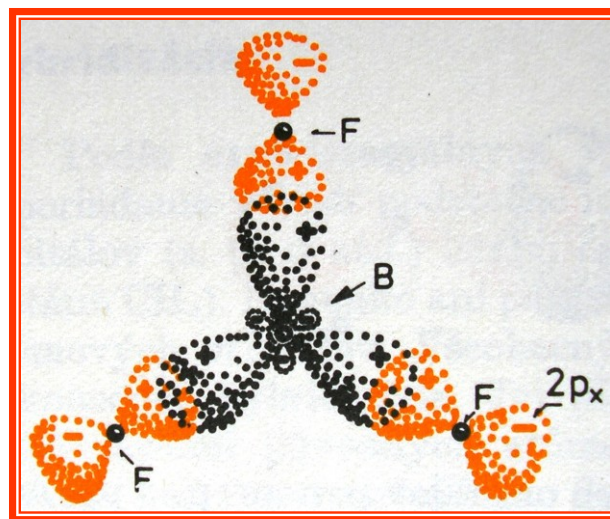
konfigurace	s ¹	s ²	s ² p ¹	s ² p ²	s ² p ³	s ² p ⁴	s ² p ⁵
hybridizace	s	sp	sp ²	sp ³	sp ³	sp ³	s, p ³
volné el. páry					1	2	3

Levá polovina periody

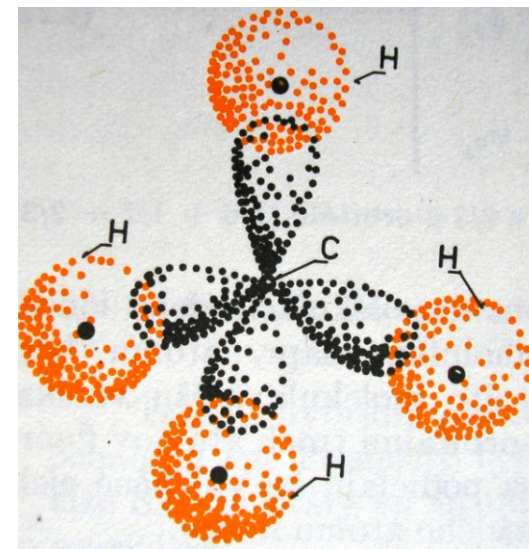
sp



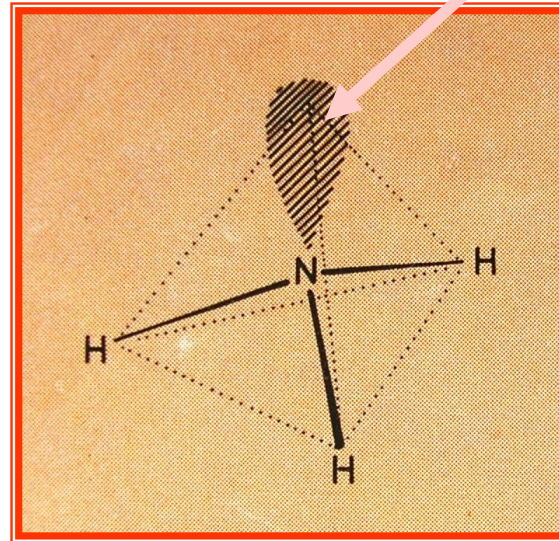
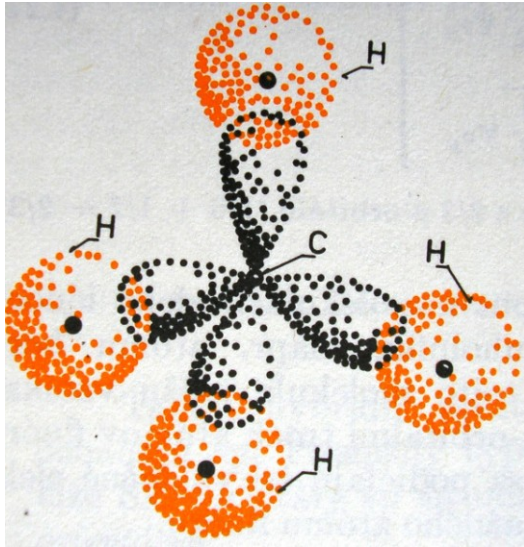
sp^2



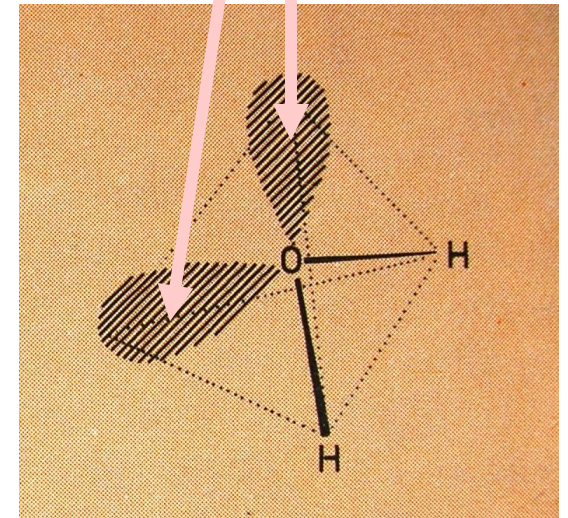
sp^3



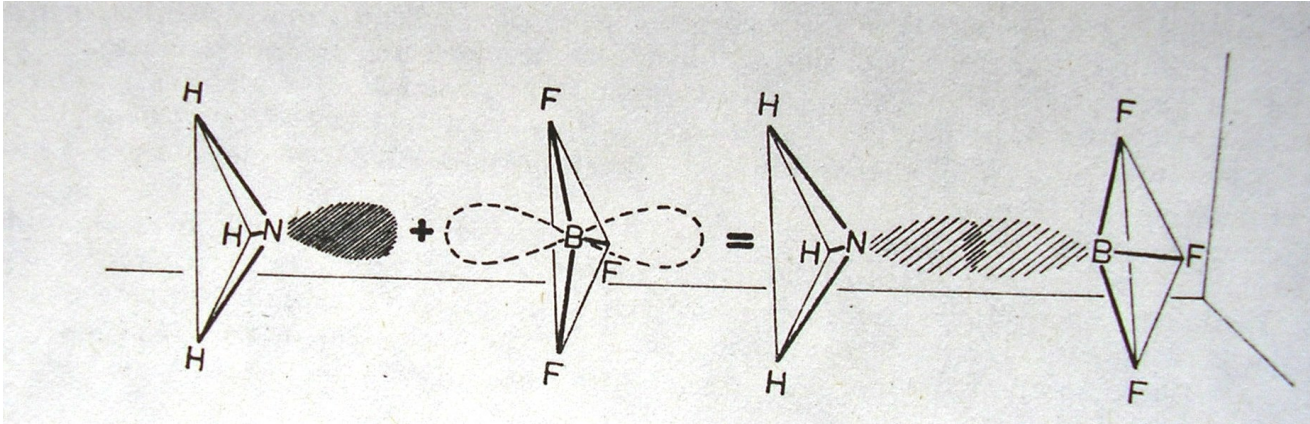
Pravá polovina periody



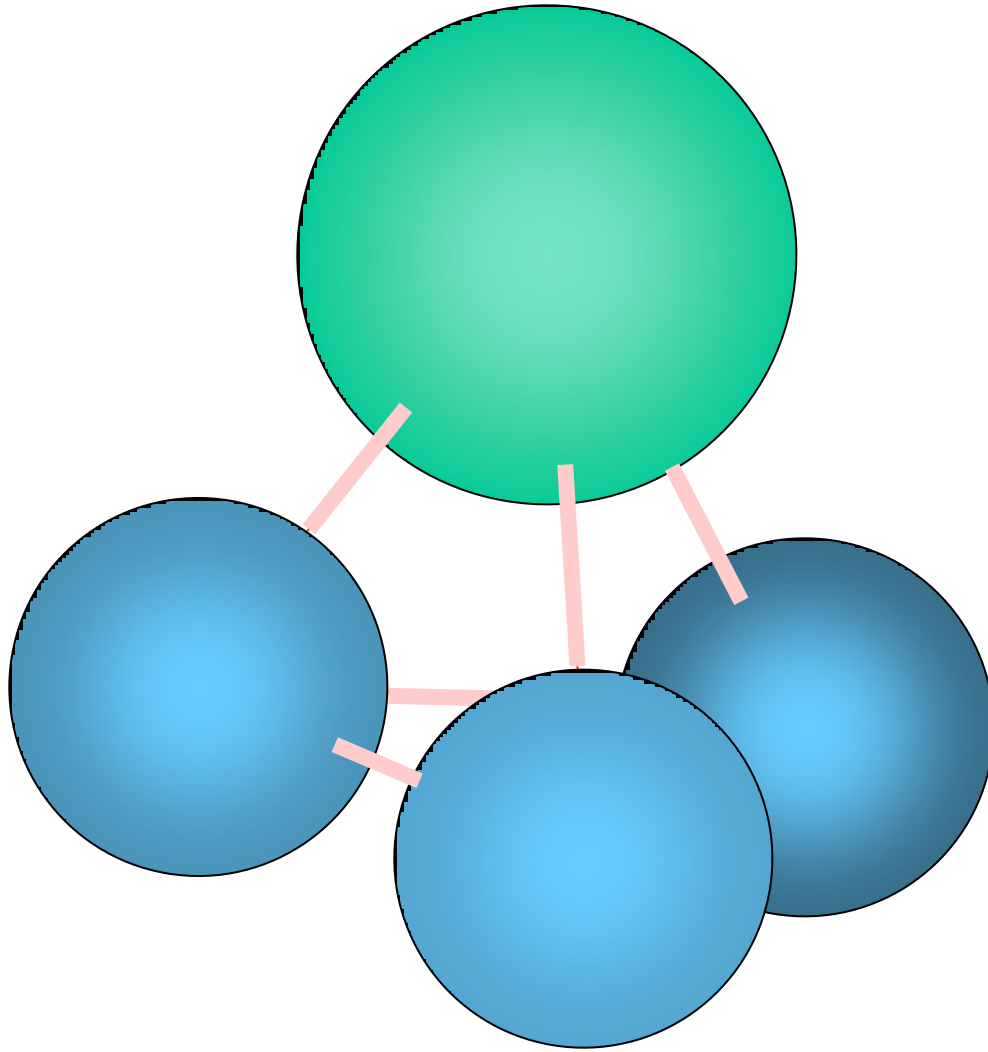
volný pár

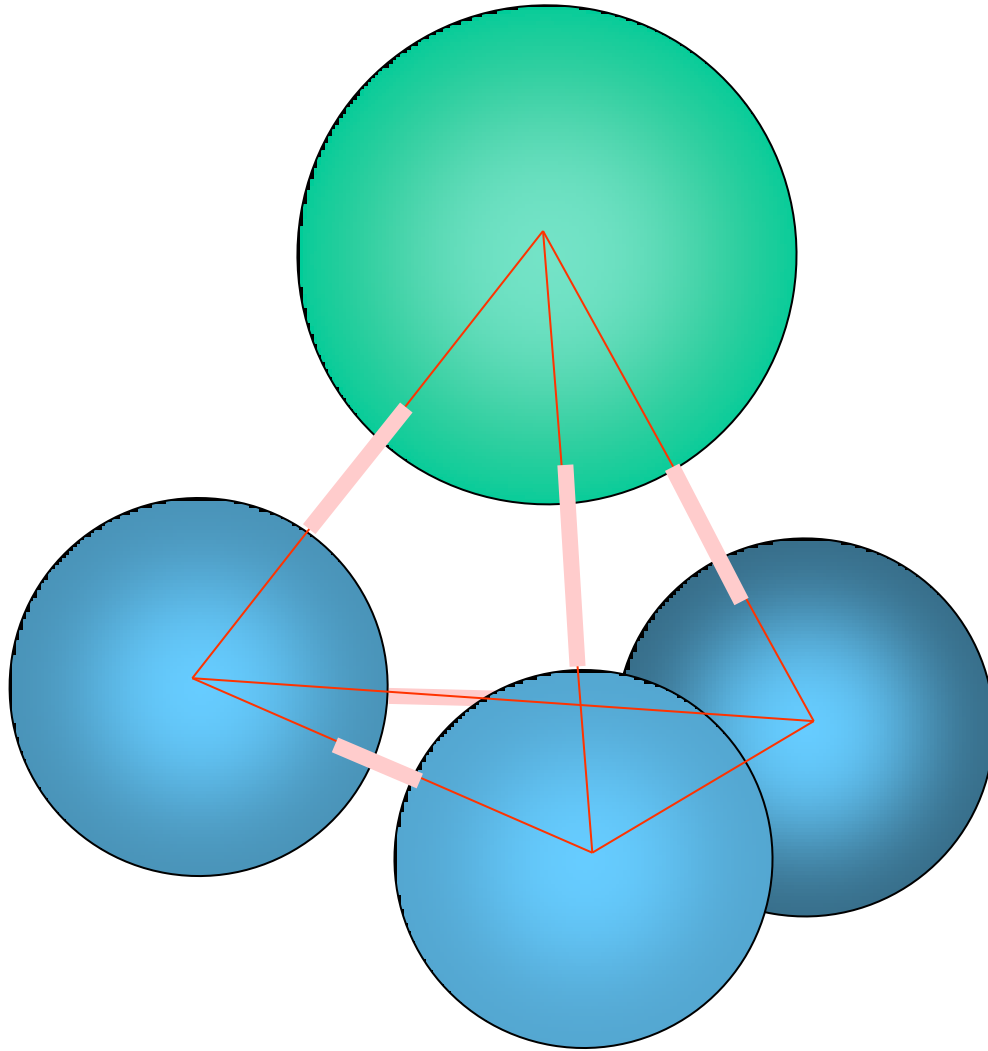


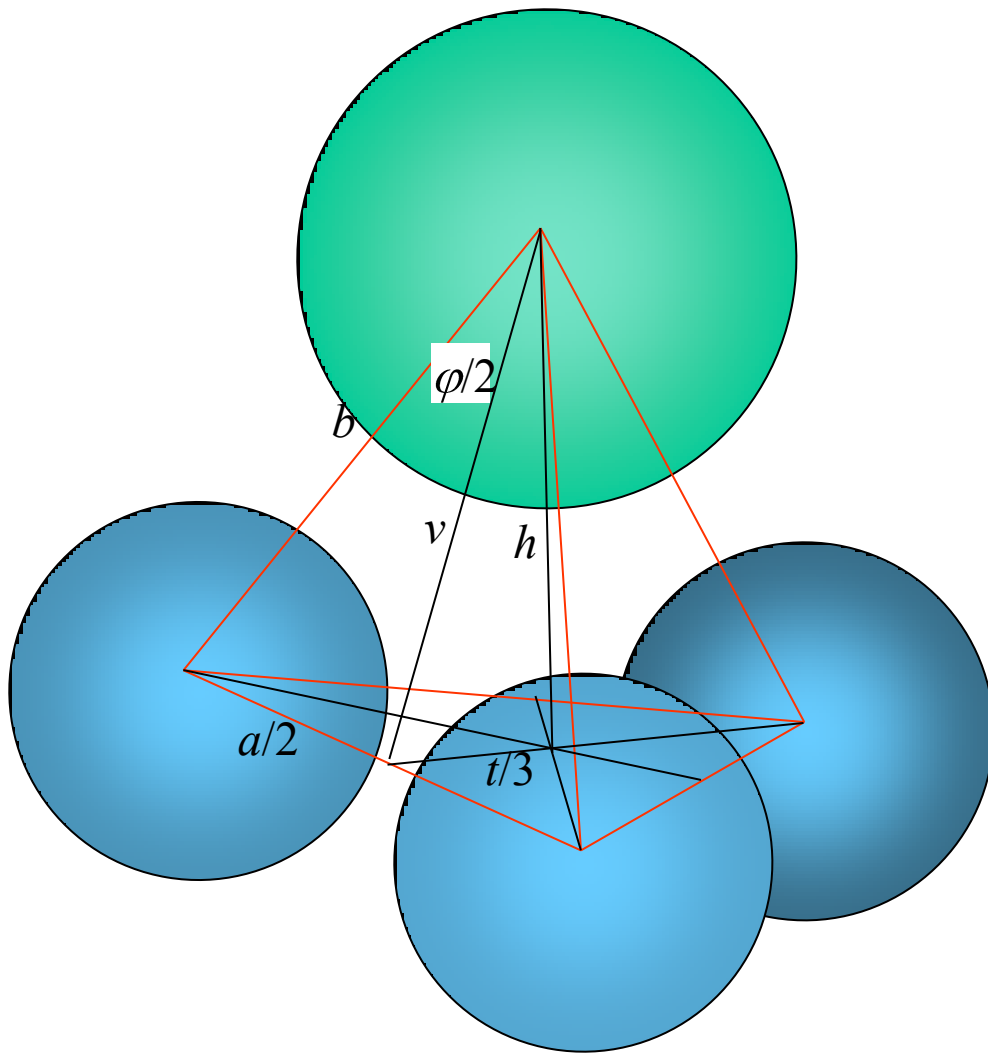
Komplex $\text{NH}_3 \text{BF}_3$



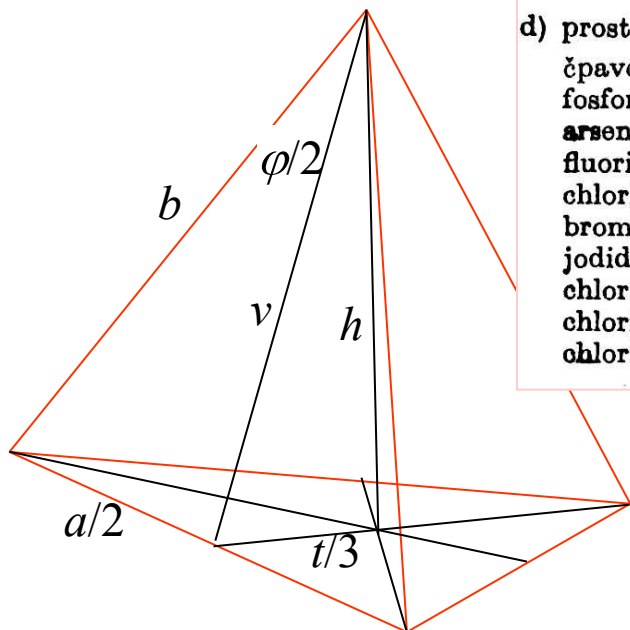
Pyramidální molekula:
geometrická struktura







Výška pyramidy



d) prostorové jehlanovitě

čpavek	NH ₃
fosforovodík	PH ₃
arsenovodík	AsH ₃
fluorid fosforitý	PF ₃
chlorid fosforitý	PCl ₃
bromid fosforitý	PBr ₃
jodid fosforitý	PI ₃
chlorid arsenitý	AsCl ₃
chlorid antimonitý	SbCl ₃
chlorid bismutitý	BiCl ₃

	N—H	1,014	HNH 106°47'
	P—H	1,41	HPH 93°
	As—H	1,52	HAsH 92°
	P—F	1,546	FPF 104°
	P—Cl	2,04	ClPCl 99,9°
	P—Br	2,18	BrPBr 101,5°
	P—I	2,49	IPI 102°
	As—Cl	2,17	ClAsCl 103°
	Sb—Cl	2,32	ClSbCl 99°
	Bi—Cl	2,48	ClBiCl 100°

$$h = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{a}{2} \right)^2 + \left(\frac{t}{3} \right)^2}$$

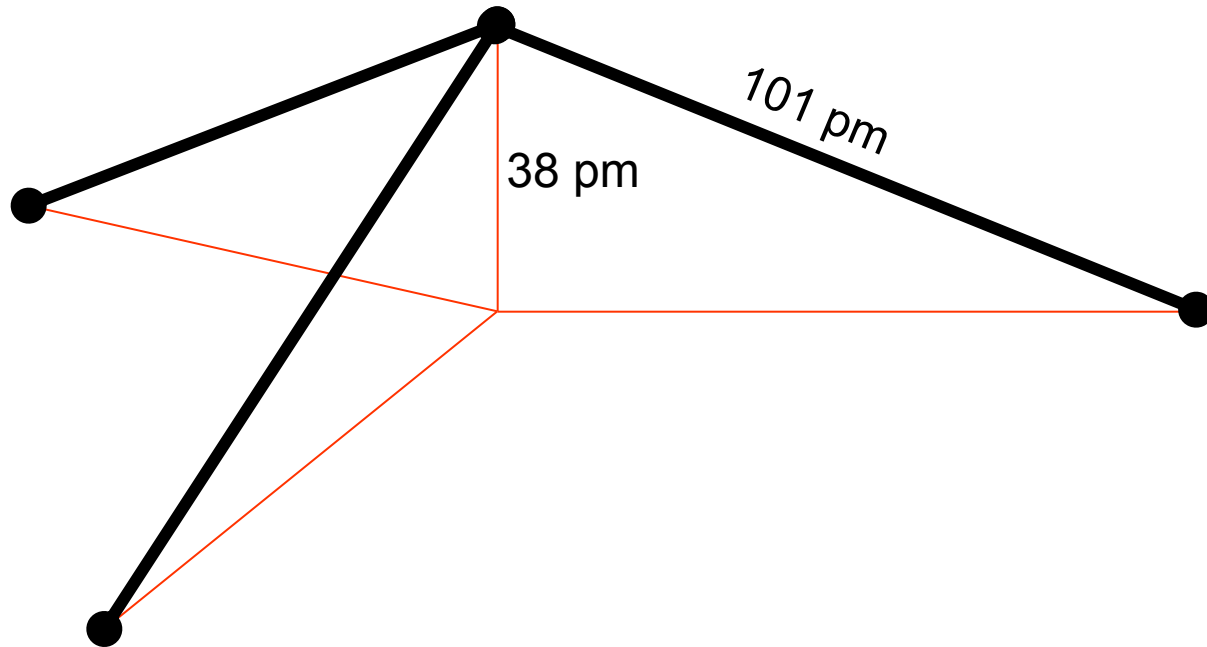
$$\frac{a}{2} = \frac{a}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \frac{a\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}$$

$$\frac{t}{3} = \frac{t}{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \frac{t\sqrt{3}}{3\sqrt{3}}$$

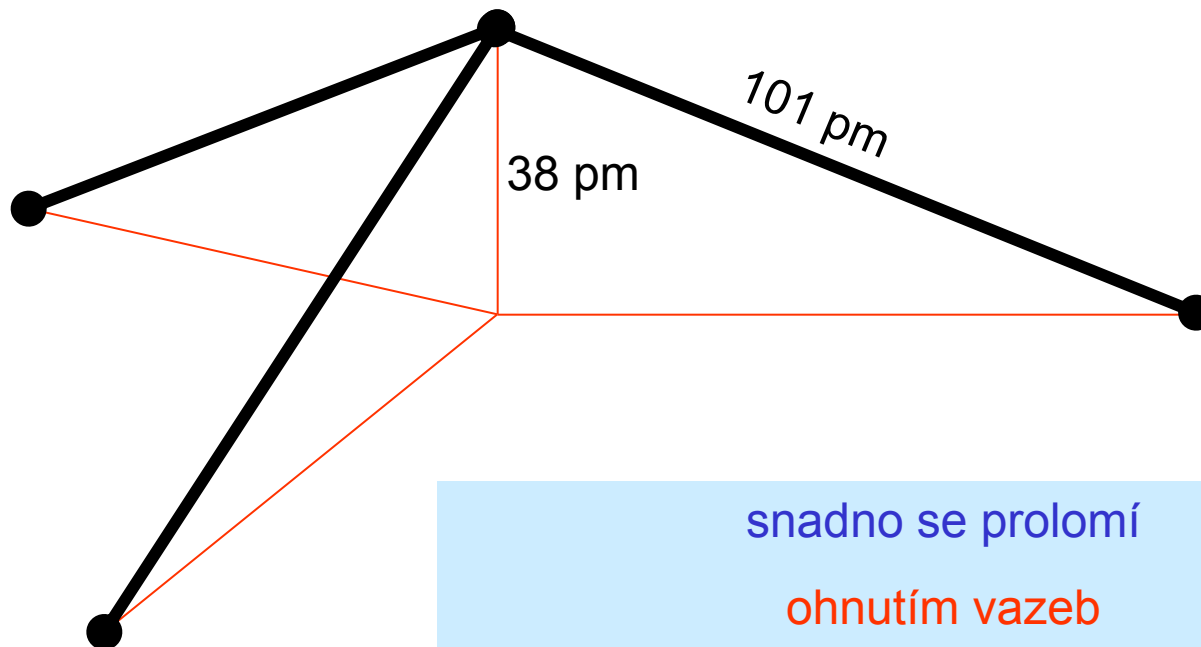
$$h = \sqrt{\left(\frac{a\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{t\sqrt{3}}{3\sqrt{3}} \right)^2}$$

molekula	h/Å
NH ₃	0.38
PH ₃	0.77
AsH ₃	0.85

Skutečný tvar molekuly NH₃

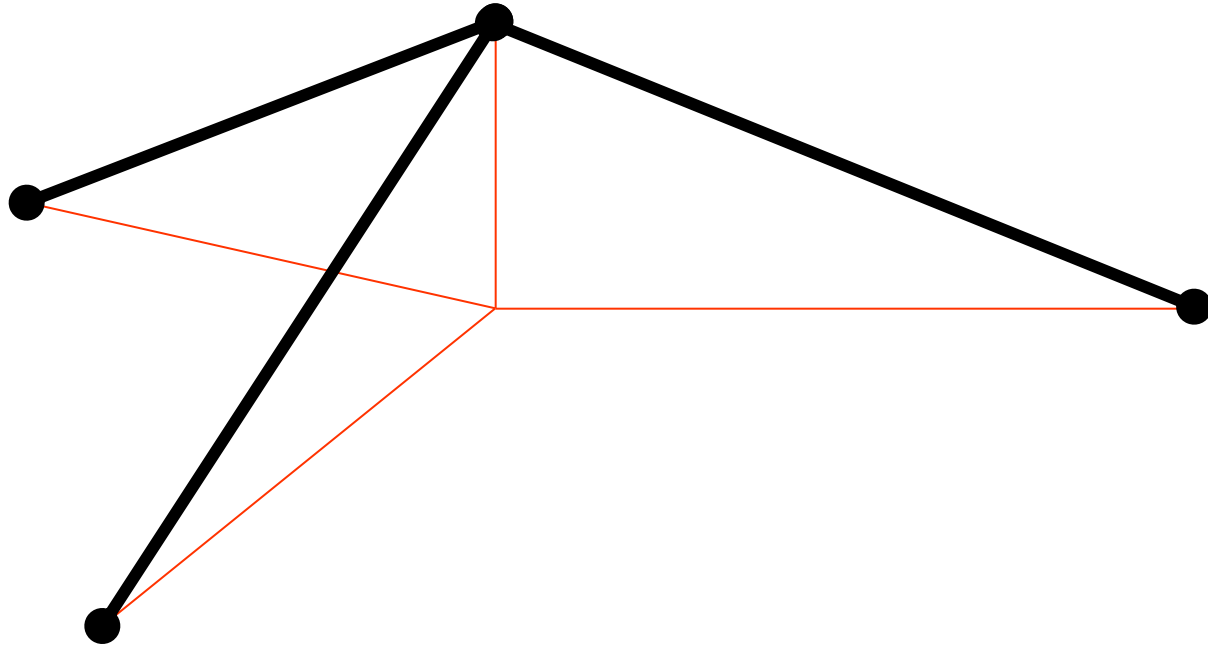


Skutečný tvar molekuly NH_3

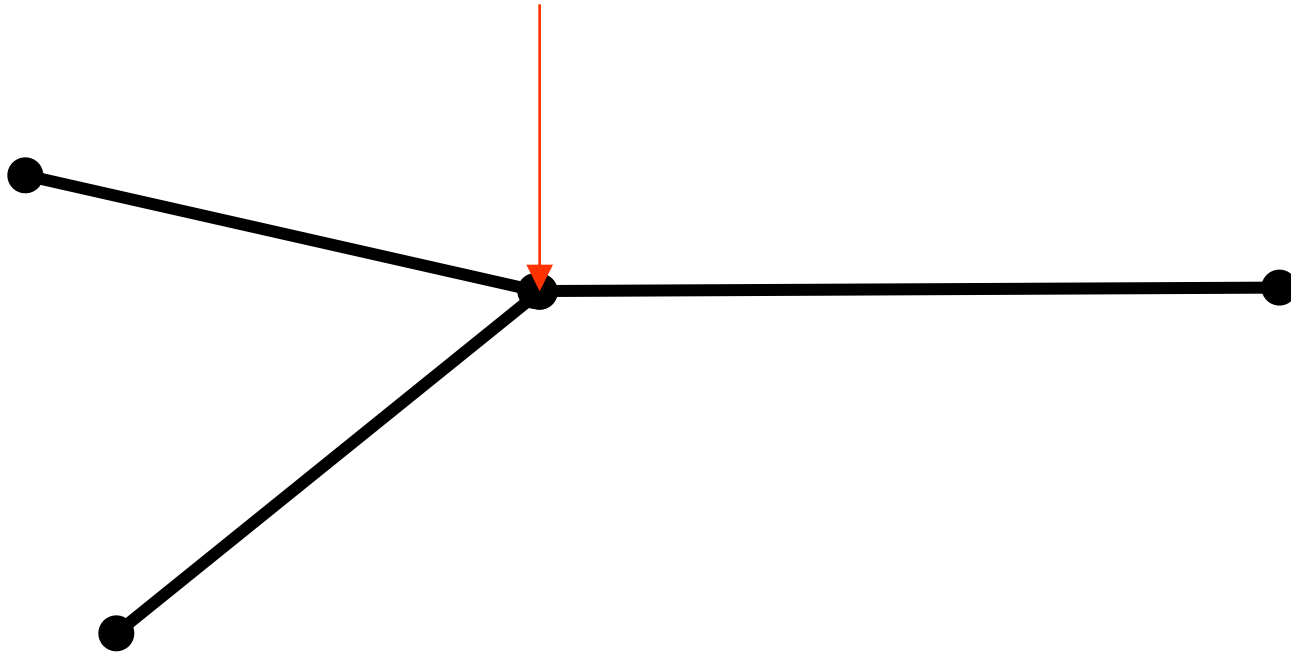


snadno se prolomí
ohnutím vazeb
(„ deštníkový mód “)

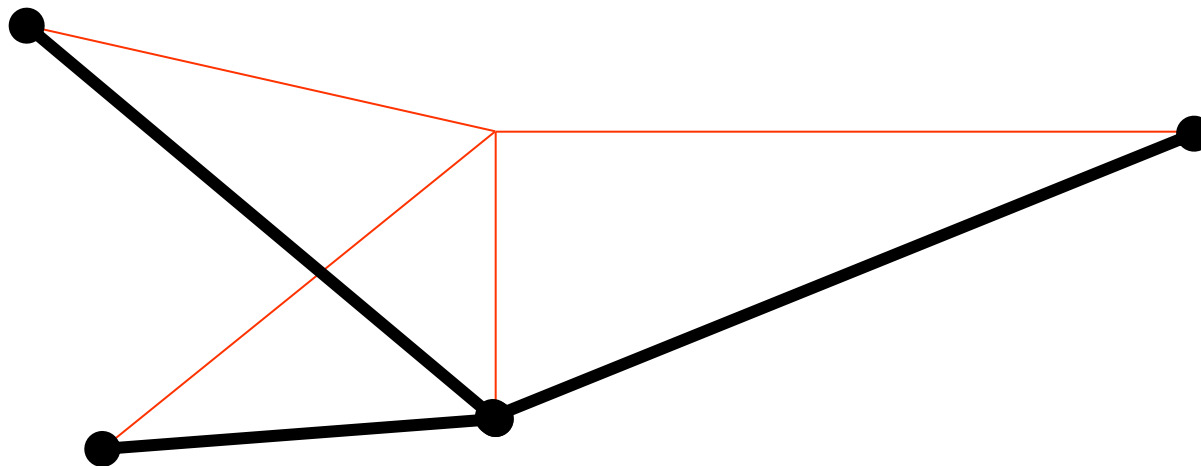
Skutečný tvar molekuly NH₃



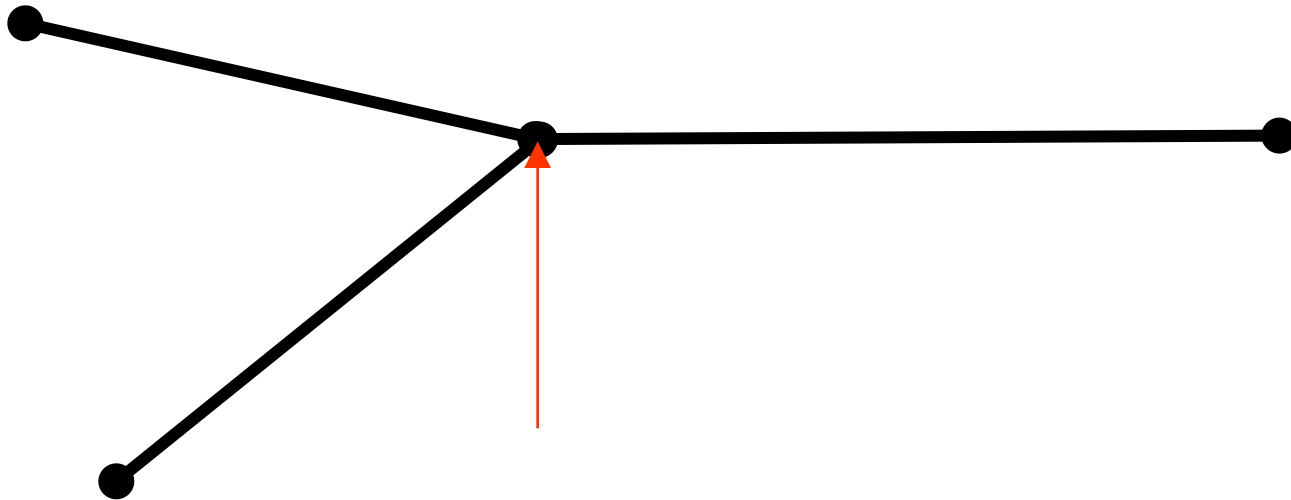
Skutečný tvar molekuly NH₃



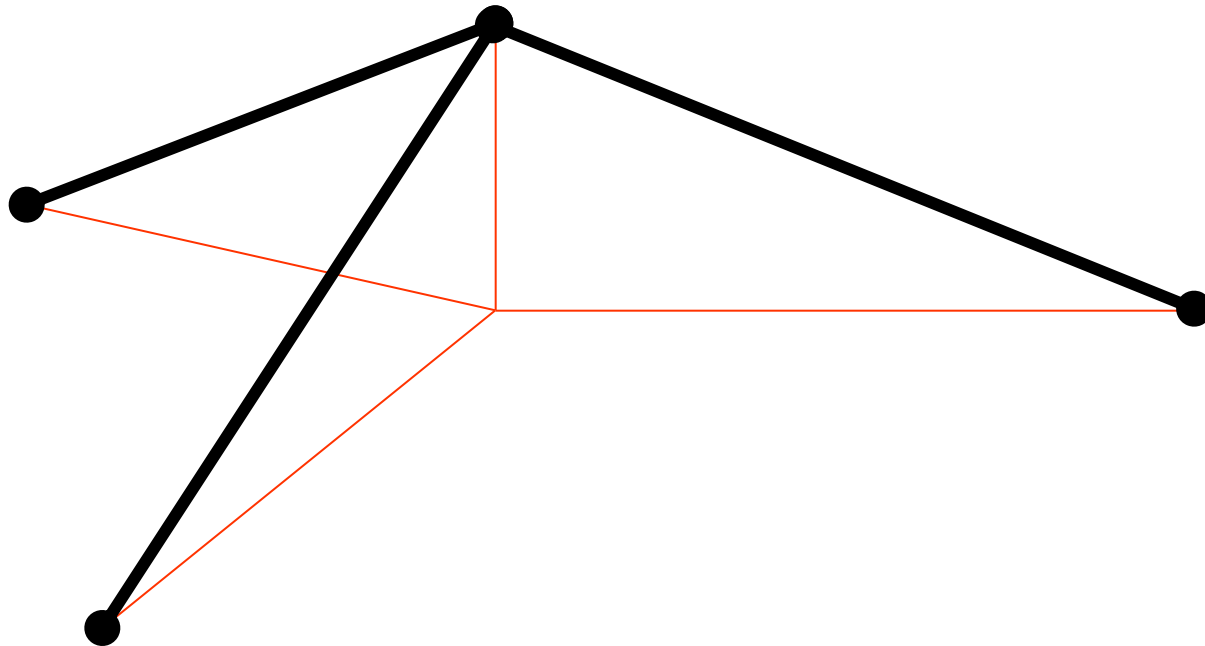
Skutečný tvar molekuly NH₃



Skutečný tvar molekuly NH₃



Skutečný tvar molekuly NH₃



Pyramidální molekula:
normální kmity

Vibrace pyramidálních molekul v harmonickém přiblížení

4 atomy ... 12 stupňů volnosti

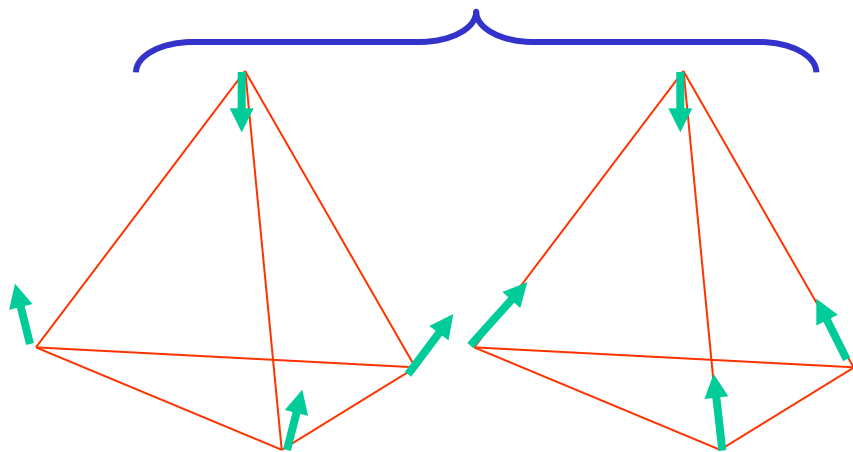
3 translace, 3 tuhé rotace ...

6 normálních kmitů

symetrie molekuly je C_{3v} ... tvar normálních kmitů

Normální kmity pyramidálních molekul typu amoniaku

symetrie A_1 , osová



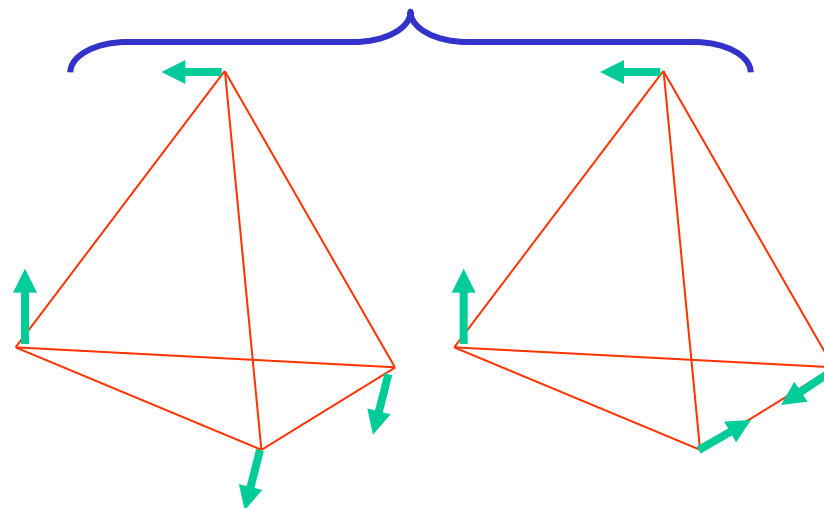
kmit ν_1

bond bending

kmit ν_3

bond stretching

symetrie E , 2x degenerovaná



kmit ν_2

nemá C_3 , degenerace

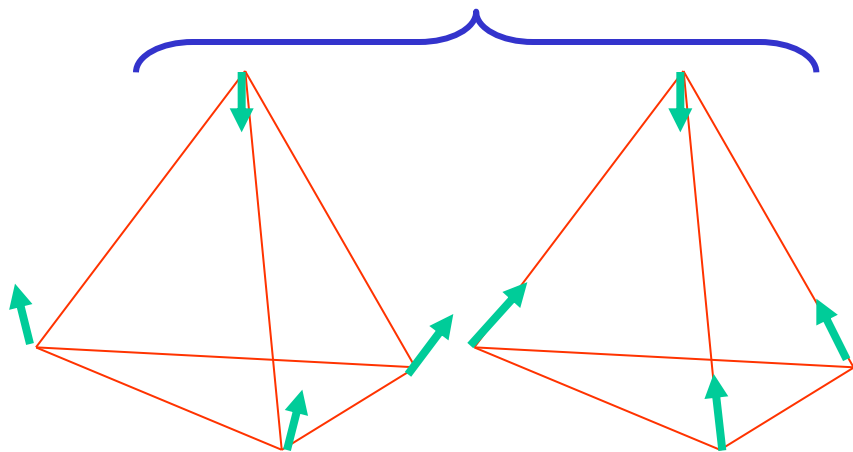
kmit ν_4

obdobné

Normální kmity pyramidálních molekul typu amoniaku

symetrie A_1 , osová

symetrie E , 2x degenerovaná

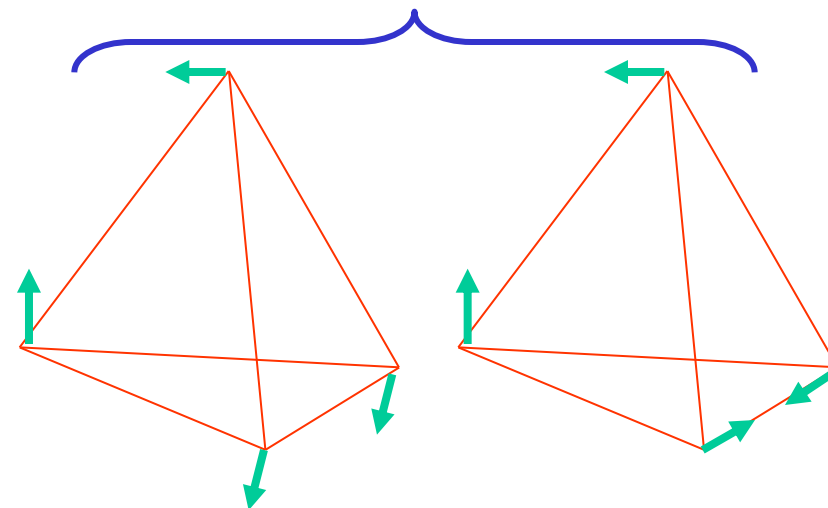


kmit ν_1

bond bending

kmit ν_3

bond stretching



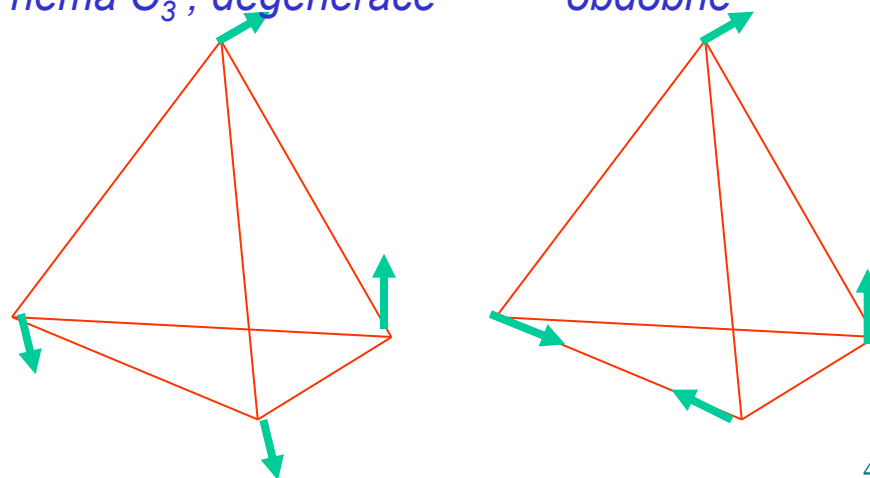
kmit ν_2

nemá C_3 , degenerace

kmit ν_4

obdobné

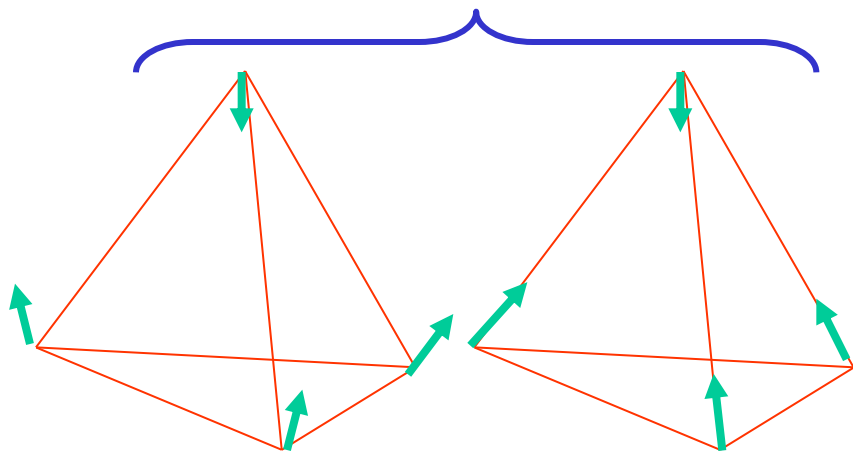
otočení o 120°



Normální kmity pyramidálních molekul typu amoniaku

symetrie A_1 , osová

symetrie E , 2x degenerovaná

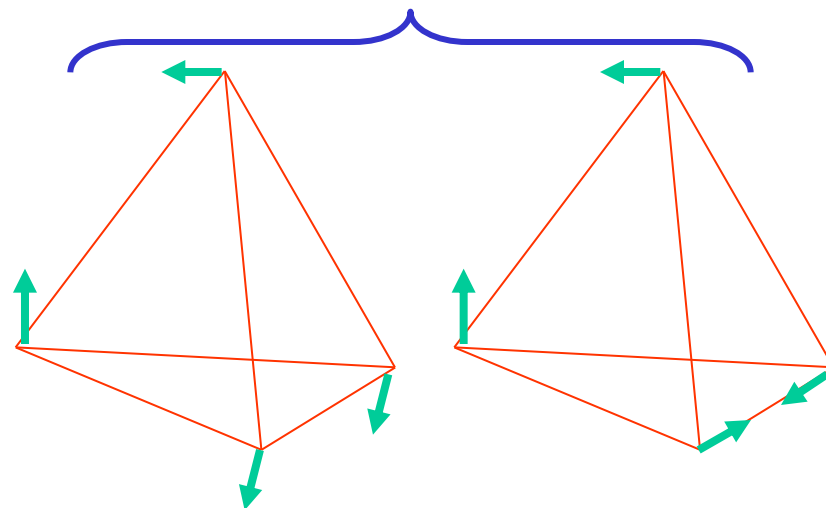


kmit ν_1

bond bending

kmit ν_3

bond stretching



kmit ν_2

nemá C_3 , degenerace

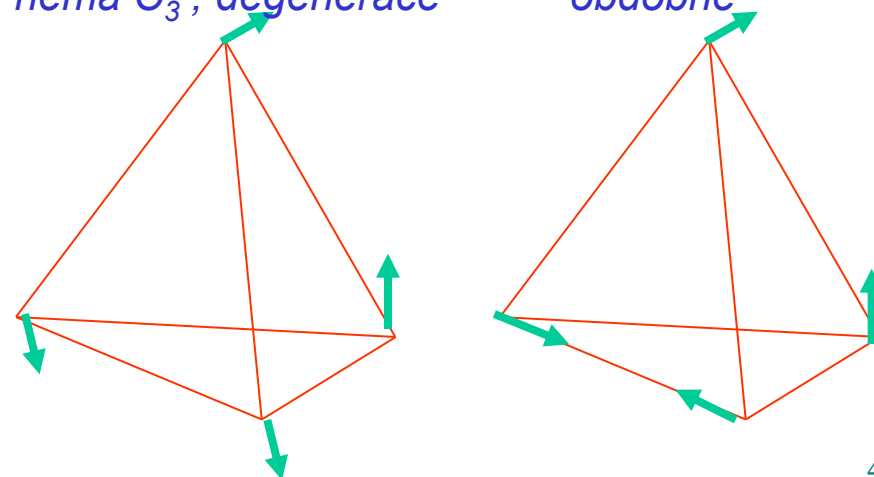
kmit ν_4

obdobné

otočení o 120°

otočení o 240°

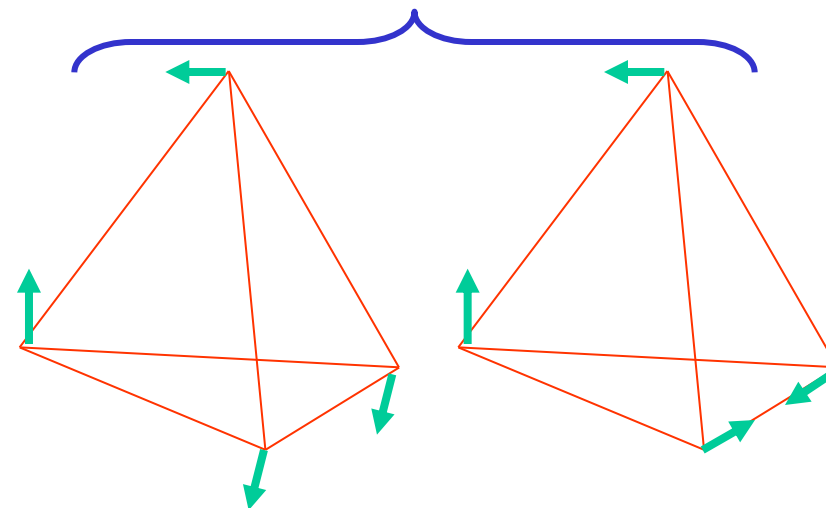
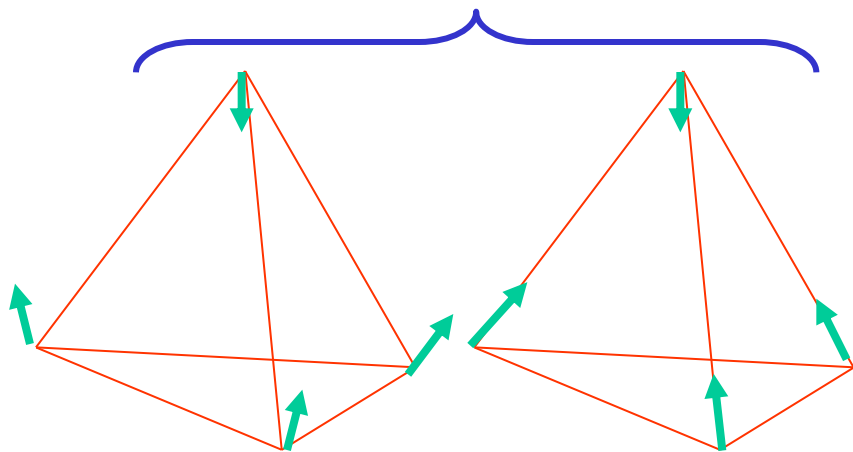
Ize složit z prvních dvou



Normální kmity pyramidálních molekul typu amoniaku

symetrie A_1 , osová

symetrie E , 2x degenerovaná



kmit ν_1

kmit ν_3

kmit ν_2

kmit ν_4

bond bending

bond stretching

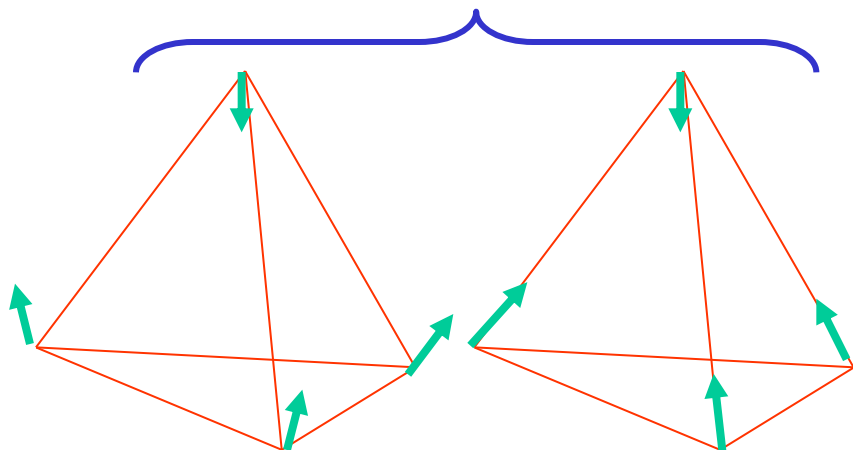
Experimentálně určené kmity

kmit	vlnočet/cm ⁻¹	vlnová délka/ μm
ν_1	950	10.5
ν_2	1627.5	6.1
ν_3	3336.0	3.0
ν_4	3414.0	2.9

Normální kmity pyramidálních molekul typu amoniaku

symetrie A_1 , osová

symetrie E , 2x degenerovaná

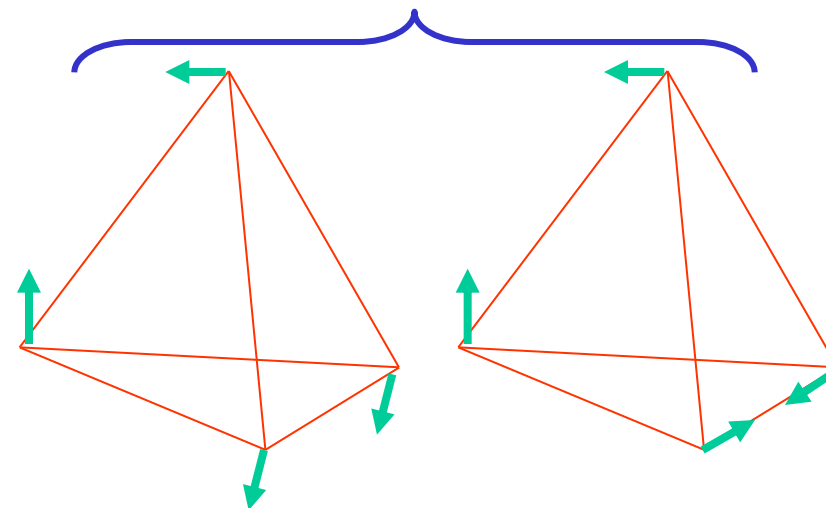


kmit ν_1

bond bending

kmit ν_3

bond stretching



kmit ν_2

kmit ν_4

Experimentálně určené kmity

kmit	vlnočet/cm ⁻¹	vlnová délka/μm
ν_1	950	10.5
ν_2	1627.5	6.1
ν_3	3336.0	3.0
ν_4	3414.0	2.9

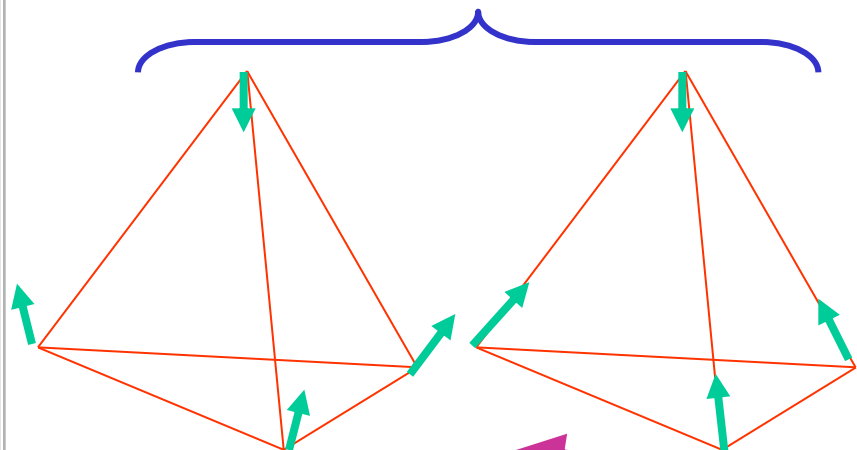
TAJEMNÝ DUBLET

931.58 968.08

3335.9 3337.5

Normální kmity pyramidálních molekul typu amoniaku

symetrie A_1 , osová



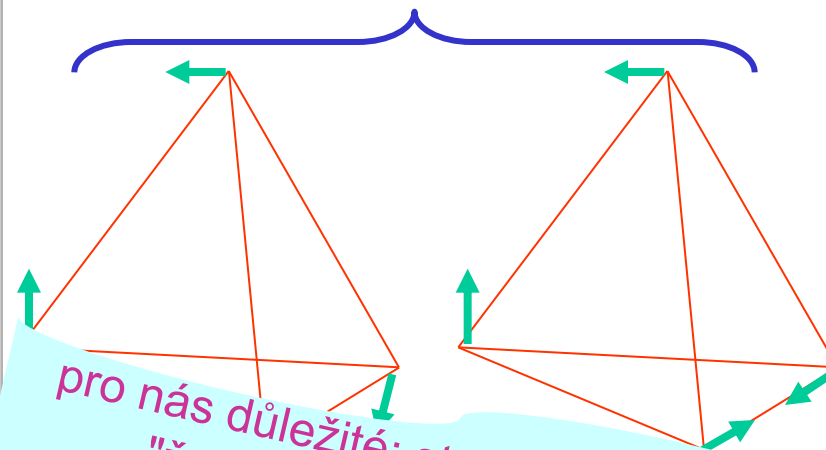
kmit ν_1

bond bending

kmit ν_3

bond stretching

symetrie E , 2x degenerovaná



pro nás důležité: stejná symetrie, jako "žabkový" tunelový přeskok, souvisí

Experimentálně určené kmity

kmit	vlnočet/cm ⁻¹	vlnová délka/μm
ν_1	950	10.5
ν_2	1627.5	6.1
ν_3	3336.0	3.0
ν_4	3414.0	2.9

TAJEMNÝ DUBLET

931.58 968.08

3335.9 3337.5

Pyramidální molekula:
tunelování

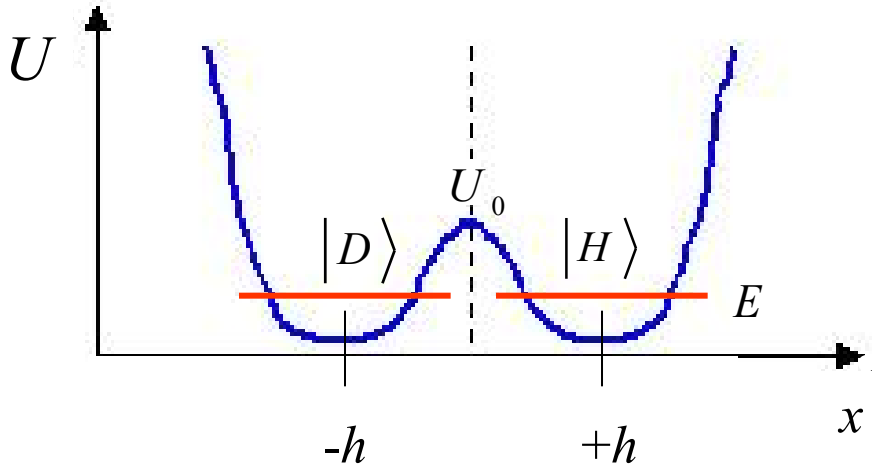
Role tunelování v IR spektroskopii amoniaku

KVALITATIVNÍ ÚVAHA

V klasické fyzice jsou při energiích

$$E < U_0$$

obě jámy odděleny. Kvantově však může např. stav $|D\rangle$ pronikat do horní jámy. Není tedy stacionární



MOŽNÉ PŘÍSTUPY

- ab initio výpočet zahrnující jádra i adiabaticky se měnící elektronové rozdělení
- modelové výpočty: ⌘ symetrie A_1 , ⌘ jednorozměrná úloha, ⌘ reduk. hmotnost zhruba odp. jednomu N a třem H v protipohybu, ⌘ modelová konstrukce $U(x)$ – známe frekvence vibrací a vzdálenost minim $2h$, ⌘ z rozštěpení dubletu fitujeme bariery
- abstraktní přístup: dynamiku systému zkoumáme jako dynamiku dvou navzájem propojených stavů.

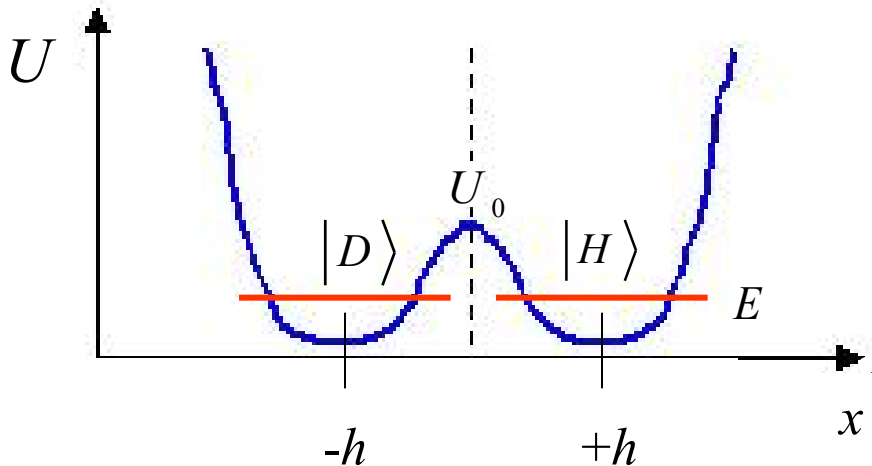
Role tunelování v IR spektroskopii amoniaku

KVALITATIVNÍ ÚVAHA

V klasické fyzice jsou při energiích

$$E < U_0$$

obě jámy odděleny. Kvantově však může např. stav $|D\rangle$ pronikat do horní jámy. Není tedy stacionární



MOŽNÉ PŘÍSTUPY

- ab initio výpočet zahrnující jádra i a to dnes NE měnící elektronové rozdělení

• modelové výpočty: ⌘ symetrie A_1 , ⌘ jednorozměrná úloha, ⌘ reduk. hmotnost zhruba odp. jednomu N a třem H v protipohybu, ⌘ modelová konstrukce $U(x)$ – známe frekvence vibrací a vzdálenost minim $2h$, ⌘ z rozštěpení dubletu fitujeme bariéru

NYNÍ PROVEDEME

- abstraktní přístup: dynamiku systému zkoumáme jako dynamiku dvou navzájem propojených stavů.

Příklad modelového výpočtu

Implementace modelového postupu podle E. Merzbachera

- redukovaná hmotnost

$$m = \frac{1}{\frac{1}{3m_H} + \frac{1}{m_x}} = \dots$$

- modelová potenciální energie

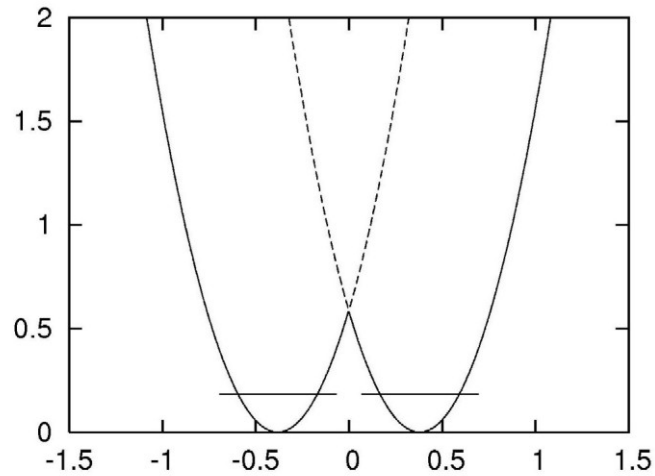
$$U(x) = \frac{1}{2} k x^2 + V_0 \left(1 - \cos\left(\frac{x}{a}\right) \right)$$

deštníkový kmit V_0

všechno je tu známo, bariera je zcela určena. Její výška se rovná

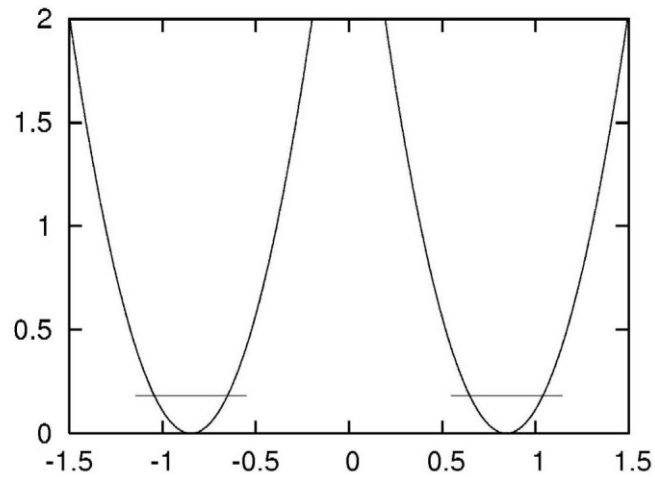
$$V_0 = \dots = \dots$$

Modelové potenciály pro amoniak a arsan



$$h = \quad \times$$

$$\eta =$$



$$h = \quad \times$$

$$\eta =$$

Příklad modelového výpočtu

Implementace modelového postupu podle E. Merzbachera

- redukováná hmotnost

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_p m_n}{m_p + m_n}$$

- modelová potenciální energie

$$U(x) = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 + V_0 \exp(-\lambda |x|)$$

deštníkový kmit V_0

všechno je tu známo, bariera je zcela určena. Její výška se rovná

$$V_0 = \frac{1}{2} m \omega^2 x_0^2$$

- na každé polopřímce $x < 0$, $x > 0$ přechází Schrödingerova rovnici na posunutý lineární oscilátor:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{1}{2} m \omega^2 (x + x_0)^2 \psi = E \psi \quad x < 0$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{1}{2} m \omega^2 (x - x_0)^2 \psi = E \psi \quad x > 0$$

- na hranici obou poloos se provede sešití dílčích řešení.

Řešení a výsledky modelového výpočtu

- Použití speciálních funkcí

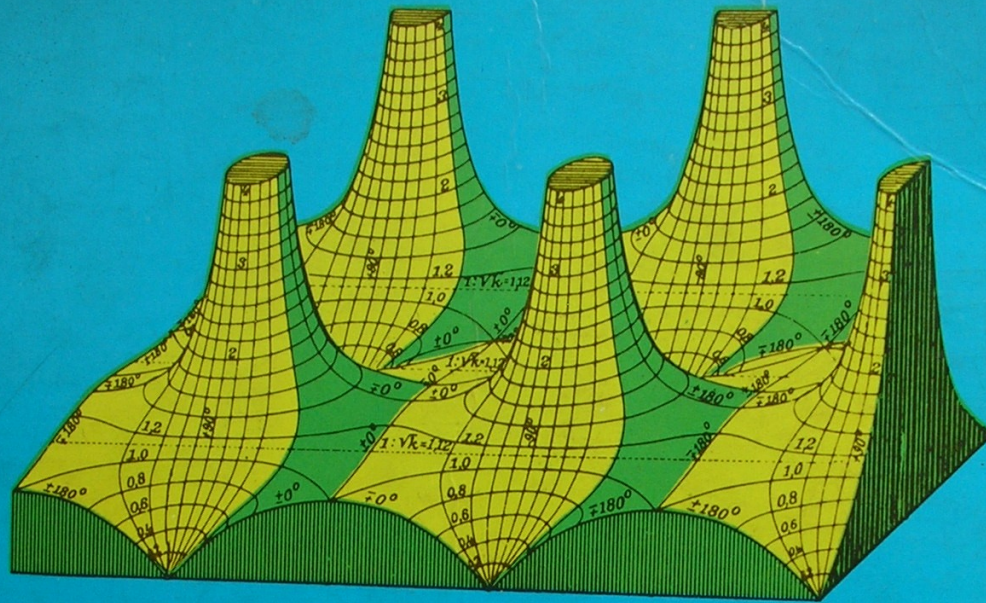
Pro obecnou hodnotu energie je SR pro lineární oscilátor řešena tzv. *funkcemi parabolického cylindru*

$$x = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega_0}} \xi$$

Partikulární řešení se správnou asymptotikou při $\xi \rightarrow \infty$ je

$$D_{-\frac{1}{2}}(\xi) \approx e^{-\xi^2/4}$$

Všechno se najde v příručkách, jako je Abramowicz&Stegun, nebo v Mathematica, ...



HANDBOOK OF MATHEMATICAL FUNCTIONS.

with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables

Edited by Milton Abramowitz and Irene A. Stegun

Powers and roots n^k • Common logarithms • Circular sines and
cosines for radian arguments • Exponential Integrals $E_n(x)$
• Tetragamma

Řešení a výsledky modelového výpočtu

- Použití speciálních funkcí

Pro obecnou hodnotu energie je SR pro lineární oscilátor řešena tzv. *funkcemi parabolického cylindru*

$$x = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega_0}} \xi$$

Partikulární řešení se správnou asymptotikou při $\xi \rightarrow \infty$ je

$$D_{-\nu}(\xi) \sim e^{-\xi^2/2} \xi^{-\nu}$$

Všechno se najde v příručkách, jako je Abramowicz&Stegun, nebo v Mathematica, ...

- Použití symetrie

systém je symetrický vůči počátku, řešení jsou tedy buď lichá, nebo sudá .

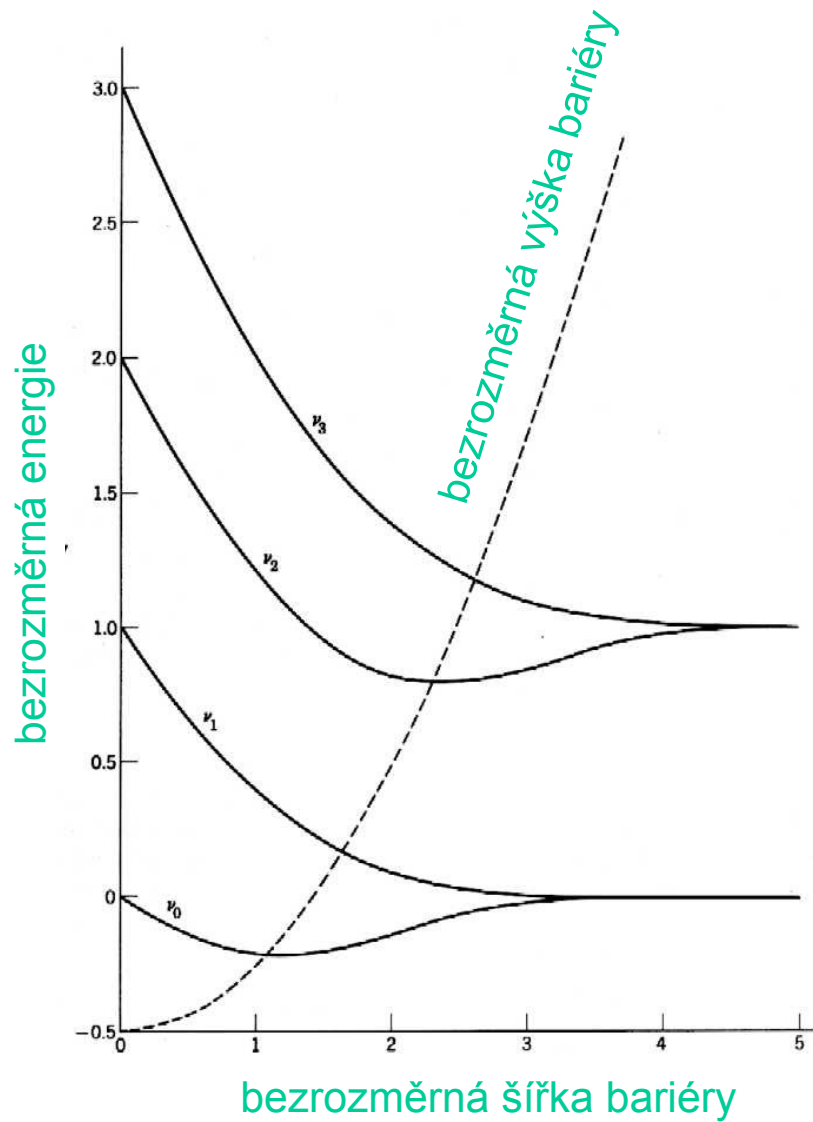
- Sešití při $x = 0$

$$\psi_{-}(\xi) = \dots = + \dots = - \dots = + \dots$$

$$\psi_{-}(\xi) < 0 = \dots - \dots + \dots > 0 = \pm \dots + \dots - \dots$$

$$h = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega_0}} \cdot \text{bezrozměrná šířka bariéry}$$

Hladiny energie v závislosti na h



Vlnové funkce v závislosti na h

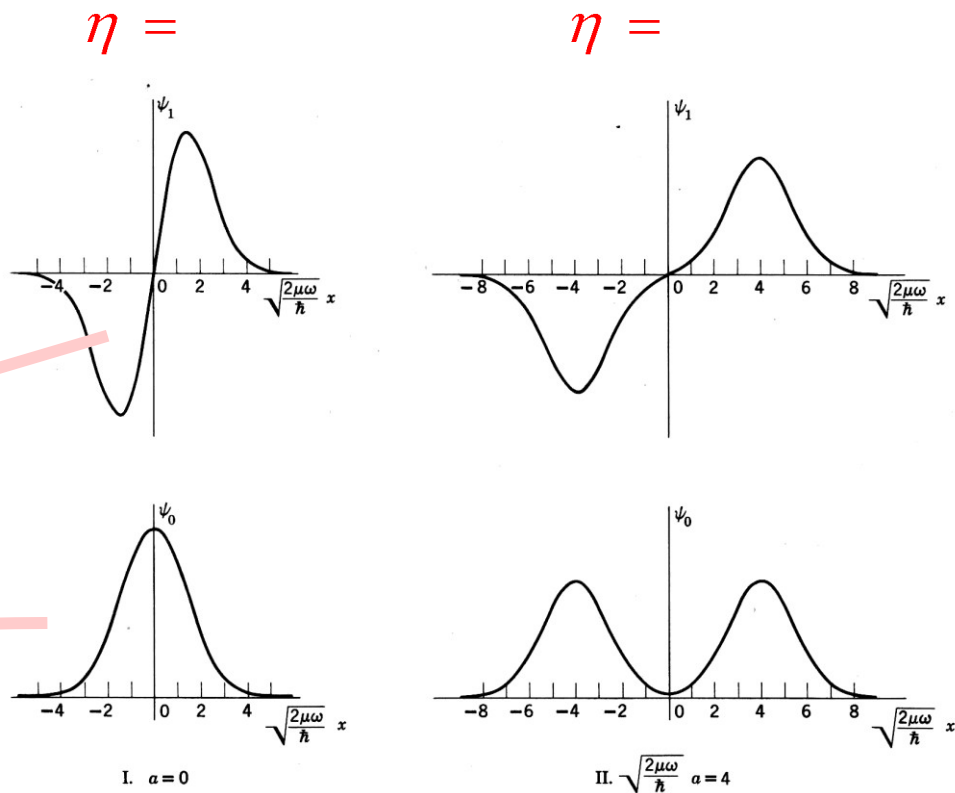
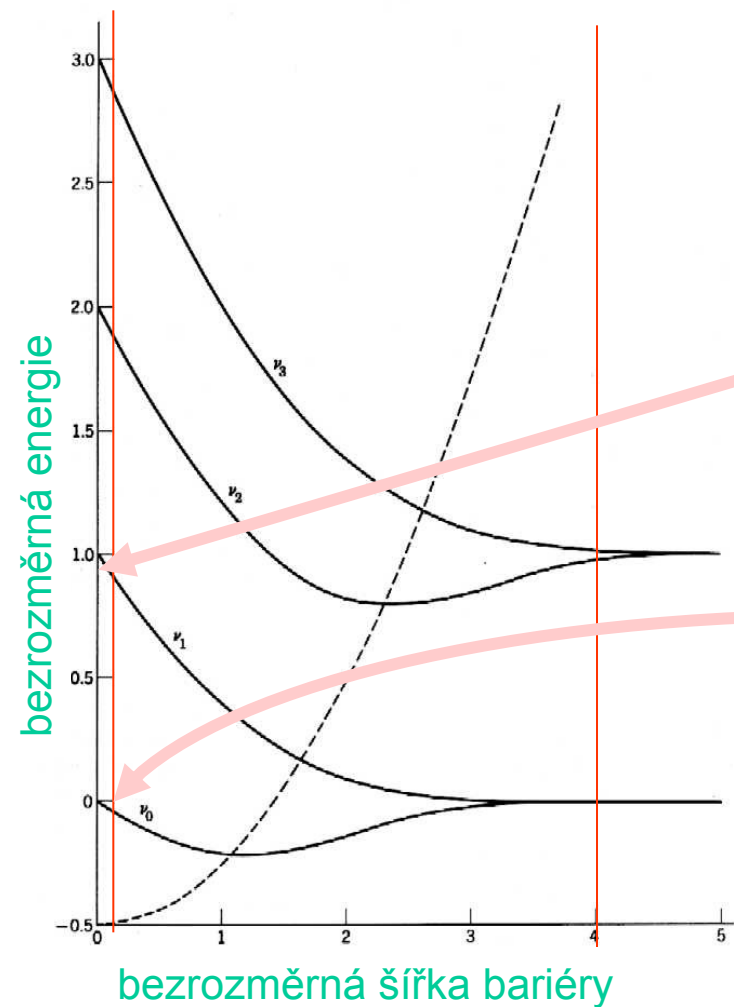


Figure 5.3. The two lowest energy eigenfunctions ψ_0 and ψ_1 . In case I ($a = 0$) we have a simple harmonic oscillator, no barrier, and $E_1 - E_0 = \hbar\omega$. In case II ($\sqrt{2\mu\omega/\hbar} a = 4$) the double oscillator has a high barrier, and $E_1 - E_0 \approx 10^{-3}\hbar\omega$. The number of nodes characterizes the eigenfunctions.

Vlnové funkce v závislosti na h

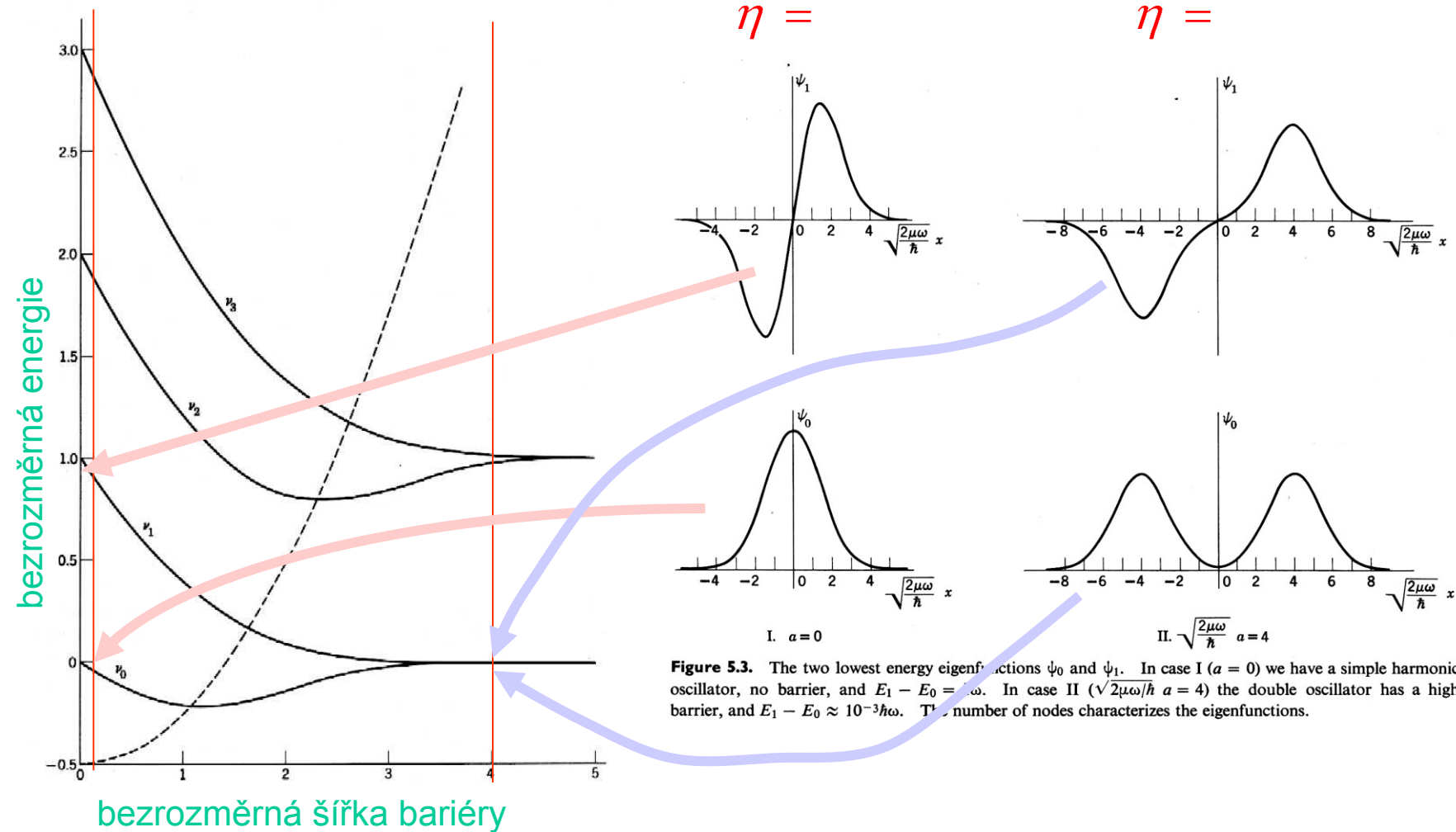
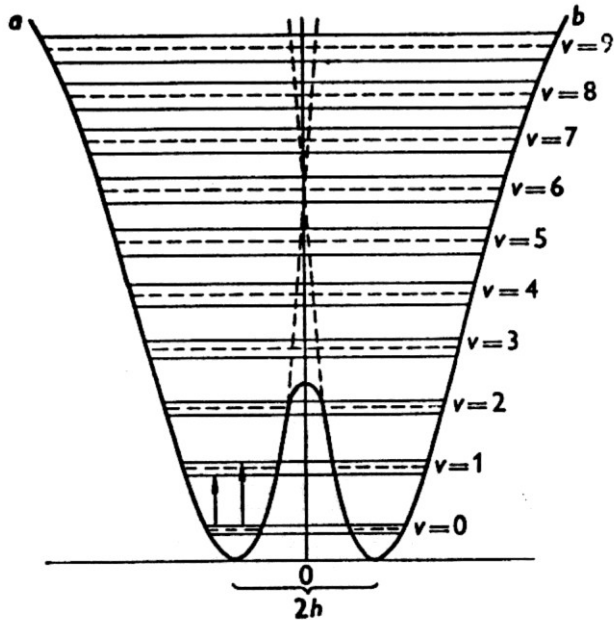


Figure 5.3. The two lowest energy eigenfunctions ψ_0 and ψ_1 . In case I ($a = 0$) we have a simple harmonic oscillator, no barrier, and $E_1 - E_0 = \hbar\omega$. In case II ($\sqrt{2\mu\omega/\hbar} a = 4$) the double oscillator has a high barrier, and $E_1 - E_0 \approx 10^{-3}\hbar\omega$. The number of nodes characterizes the eigenfunctions.

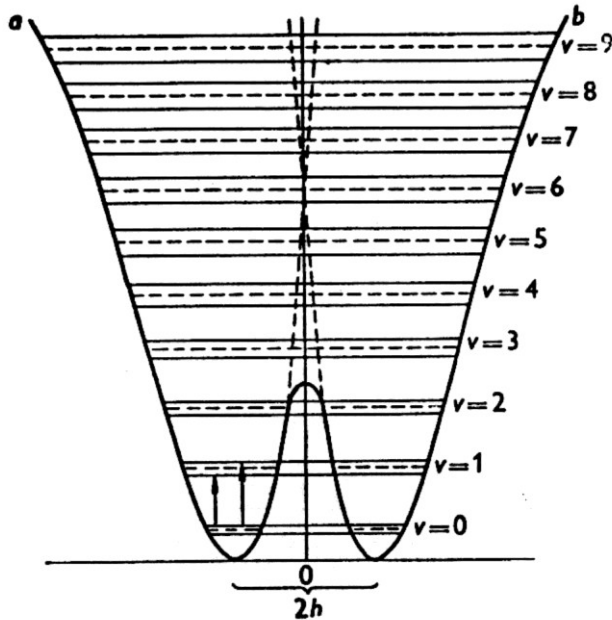
Interpretace výsledků a jejich zobecnění



HLADINY PRO REALISTIČTĚJŠÍ POTENCIÁL

- anharmonicitu pro vysoké energie
- asymetrii jámy pro nízké energie
- snížení bariery proti prostému průsečíku
- dva režimy: nad bariérou a pod bariérou (naše)
- degenerované hladiny se rozštěpí
- málo pro základní stav, více pro excitované stavy
- jeden stav je vždy sudý, jeden lichý
- pro optické přechody jsou výběrová pravidla
změna kvantového čísla jedné jámy o 1
v dubletech přechod sudý \leftrightarrow lichý

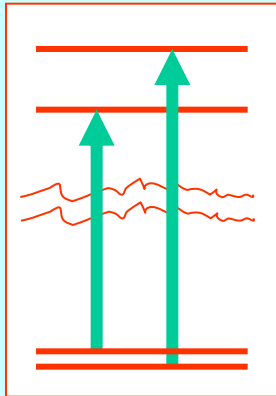
Interpretace výsledků a jejich zobecnění



HLADINY PRO REALISTIČTĚJŠÍ POTENCIÁL

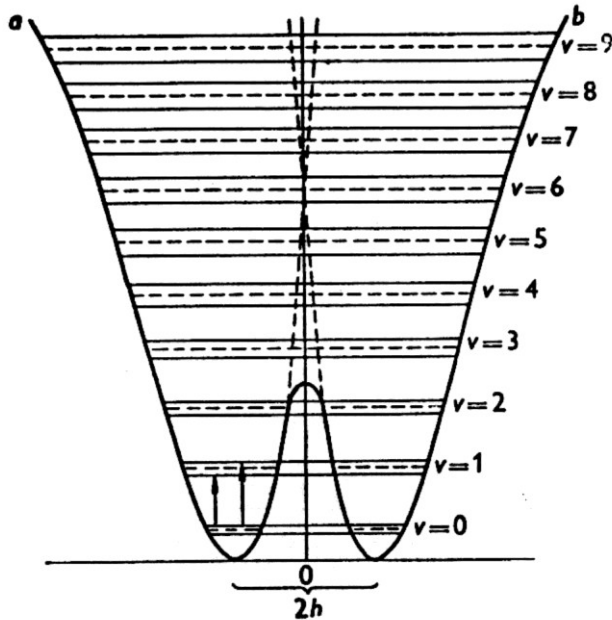
- anharmonicitu pro vysoké energie
- asymetrii jámy pro nízké energie
- snížení bariery proti prostému průsečíku
- dva režimy: nad bariérou a pod bariérou (naše)
- degenerované hladiny se rozštěpí
- málo pro základní stav, více pro excitované stavy
- jeden stav je vždy sudý, jeden lichý
- pro optické přechody jsou výběrová pravidla
změna kvantového čísla jedné jámy o 1
v dubletech přechod sudý \leftrightarrow lichý

PŘECHODY V AMONIÁKU



IR přechody, dublet pochází od rozštěpení horní hladiny zhruba 36 inverzních centimetrů kolem 950 cm^{-1}

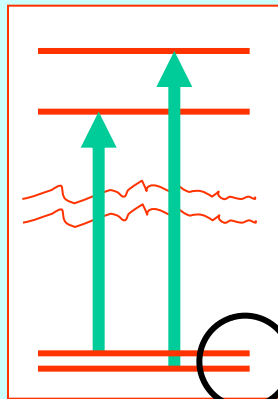
Interpretace výsledků a jejich zobecnění



HLADINY PRO REALISTIČTĚJŠÍ POTENCIÁL

- anharmonicitu pro vysoké energie
- asymetrie jámy pro nízké energie
- snížení bariery proti prostému průsečíku
- dva režimy: nad bariérou a pod bariérou (naše)
- degenerované hladiny se rozštěpí
- málo pro základní stav, více pro excitované stavy
- jeden stav je vždy sudý, jeden lichý
- pro optické přechody jsou výběrová pravidla změna kvantového čísla jedné jámy o 1 v dubletech přechod sudý \leftrightarrow lichý

PŘECHODY V AMONIÁKU

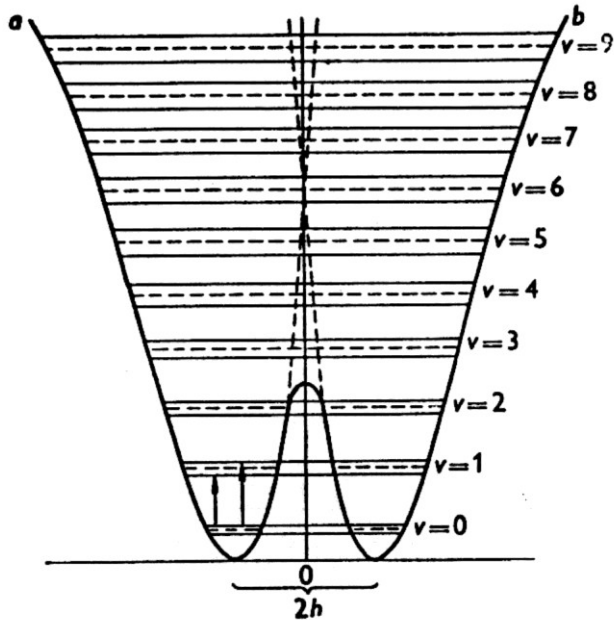


IR přechody, dublet pochází od rozštěpení horní hladiny zhruba 36 inverzních centimetrů kolem 950 cm^{-1}

mikrovlnný přechod 23800 MHz, tj. 0.79 cm^{-1}
Ten je odpovědný za inverzní čáru atd.

$\lambda =$

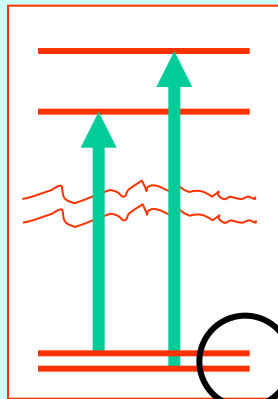
Interpretace výsledků a jejich zobecnění



HLADINY PRO REALISTIČTĚJŠÍ POTENCIÁL

- anharmonicitu pro vysoké energie
- asymetrie jámy pro nízké energie
- snížení bariery proti prostému průsečíku
- dva režimy: nad bariérou a pod bariérou (naše)
- degenerované hladiny se rozštěpí
- málo pro základní stav, více pro excitované stavy
- jeden stav je vždy sudý, jeden lichý
- pro optické přechody jsou výběrová pravidla změna kvantového čísla jedné jámy o 1 v dubletech přechod sudý \leftrightarrow lichý

PŘECHODY V AMONIAKU



DVOUHLADINOVÝ PODSYSTÉM

mikrovlnný přechod 23800 MHz, tj. 0.79 cm^{-1}
Ten je odpovědný za inverzní čáru atd.

Dynamika dvouhladinového systému

Schrödingerova rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle, \quad |\Psi_{t=0}\rangle = |\Psi_0\rangle$$

Dvoustavový systém (zvolený model)

$$|\Psi\rangle = |D\rangle + |H\rangle$$

$$|\Psi_0\rangle = |D\rangle + |H\rangle$$

$$1 = |D\rangle + |H\rangle$$

Systém vázaných rovnic pro koeficienty ekvivalentní se SR

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} c_D = H_{DD} c_D + H_{DH} c_H$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} c_H = H_{HD} c_D + H_{HH} c_H$$

$$H_{DD} = H_{HH} = \epsilon_0$$

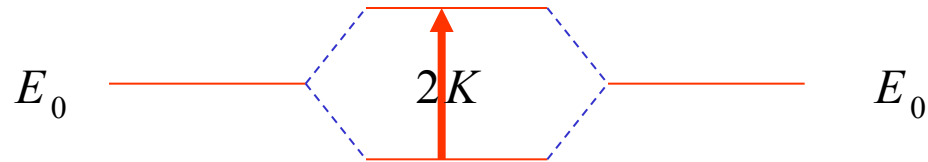
$$H_{DH} = H_{HD} = -\epsilon_0 \lambda >$$

Dynamika dvouhladinového systému

Stacionární stavy

$$\begin{aligned}
 c_\alpha &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hbar}{\hbar} = \frac{1}{\sqrt{2}} \\
 |S\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hbar}{\hbar} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hbar}{\hbar} = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \\
 |A\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hbar}{\hbar} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hbar}{\hbar} = \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}}
 \end{aligned}$$

ve shodě s modelovým výpočtem podle Merbachera



Dynamika dvouhladinového systému

Časově závislé řešení řešení začínající zdola

$$c_D(0) = \dots =$$

$$c_S(0) = \dots =$$

$$|\Psi\rangle = \dots \hbar \dots \hbar \dots \hbar \dots$$

$$|c_D|^2 = \dots + \dots / \hbar \dots$$

$$|c_H|^2 = \dots - \dots / \hbar \dots$$

$$\frac{2K}{\hbar} = \dots \pi \dots = \dots \boxed{2K}$$

Dynamika dvouhladinového systému

Časově závislé řešení řešení začínající zdola

$$c_D(0) = \dots =$$

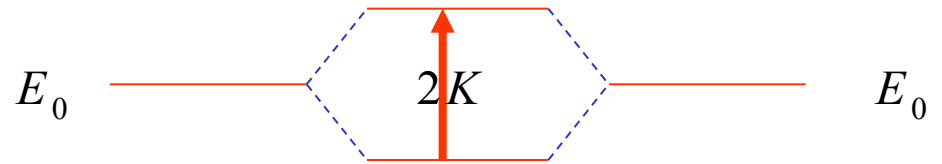
$$c_S(0) = \dots =$$

$$|\Psi\rangle = \dots \hbar \dots \hbar \dots \hbar \dots$$

$$|c_D|^2 = \dots + \dots / \hbar \dots$$

$$|c_H|^2 = \dots - \dots / \hbar \dots$$

$$\frac{2K}{\hbar} = \dots \pi \dots = \dots \boxed{2K}$$



frekvence oscilací odpovídá rozštěpení hladin

Čpavkové hodiny:
první „atomové hodiny“

Oficiální zdůvodnění pro stavbu čpavkových hodin v NBS

The Bureau atomic clock program sought to provide a spectroscopic standard capable of being used as a new atomic standard of time and frequency to replace the mean solar day and so change the arbitrary units of time to atomic ones. With such a clock, new precise values might be found for the velocity of light; new measurements of the rotation of the earth would provide a new tool for geophysicists; and new measurements of the mean sidereal year might test whether Newtonian and atomic time are the same, yielding important results for relativity theory and cosmology.

Program atomových hodin NBS usiloval o získání spektroskopického standardu který by mohl být využit jako nový atomový standard času a frekvence, nahrazující střední sluneční den a tak zaměňující libovolné jednotky času atomovými. S takovými hodinami by mohly být stanoveny nové přesné hodnoty rychlosti světla; nová měření rotace Země by nabídly nový nástroj pro geofysiku; nová měření středního siderického roku by mohla ověřit rovnost newtonovského a atomového času s významnými důsledky pro teorii relativity a kosmologii.

Čpavkové hodiny

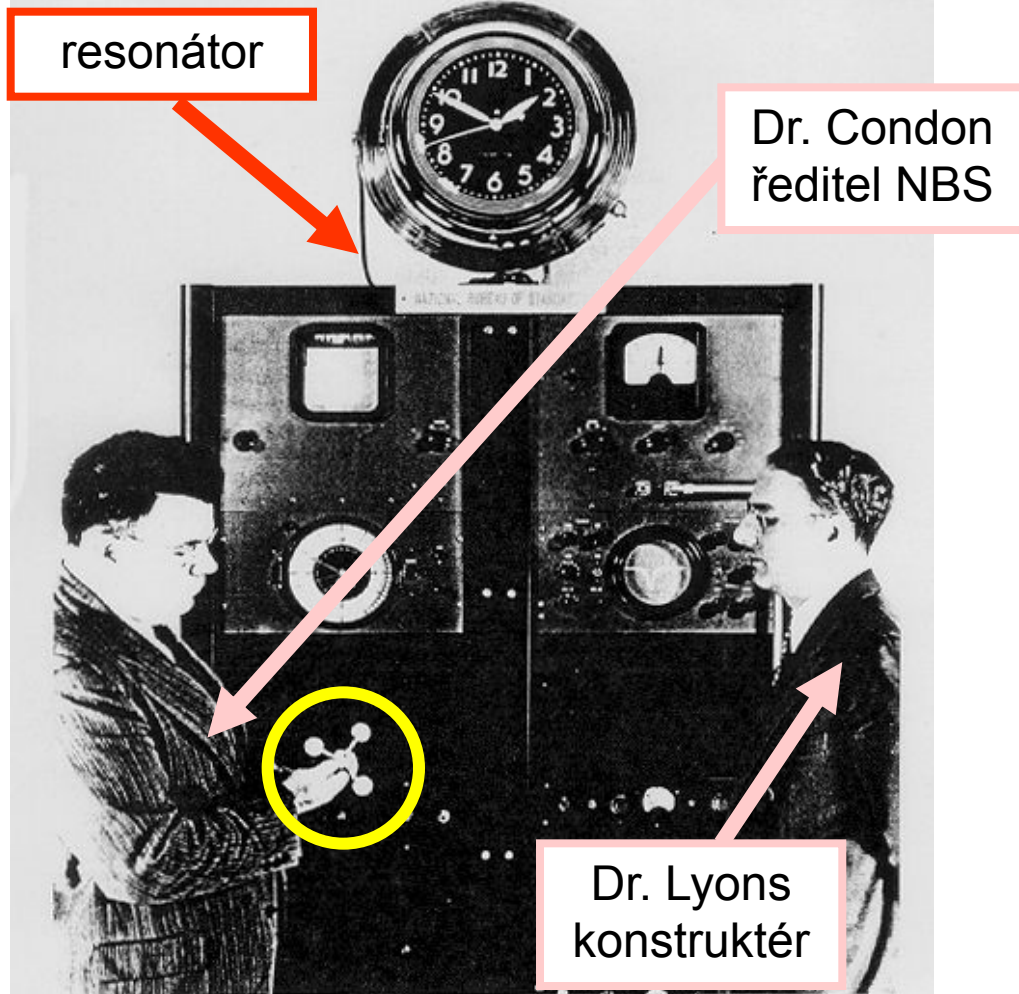


Figure 1: The World's first atomic clock; the ammonia absorption cell atomic clock at the National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology) first operated in August 1948. Dr. Harold Lyons, inventor, is at the right; Dr. Edward U. Condon, Director of NBS, is at the left. The ammonia absorption cell is the coil of waveguide surrounding the clock face.

Trochu divná historie

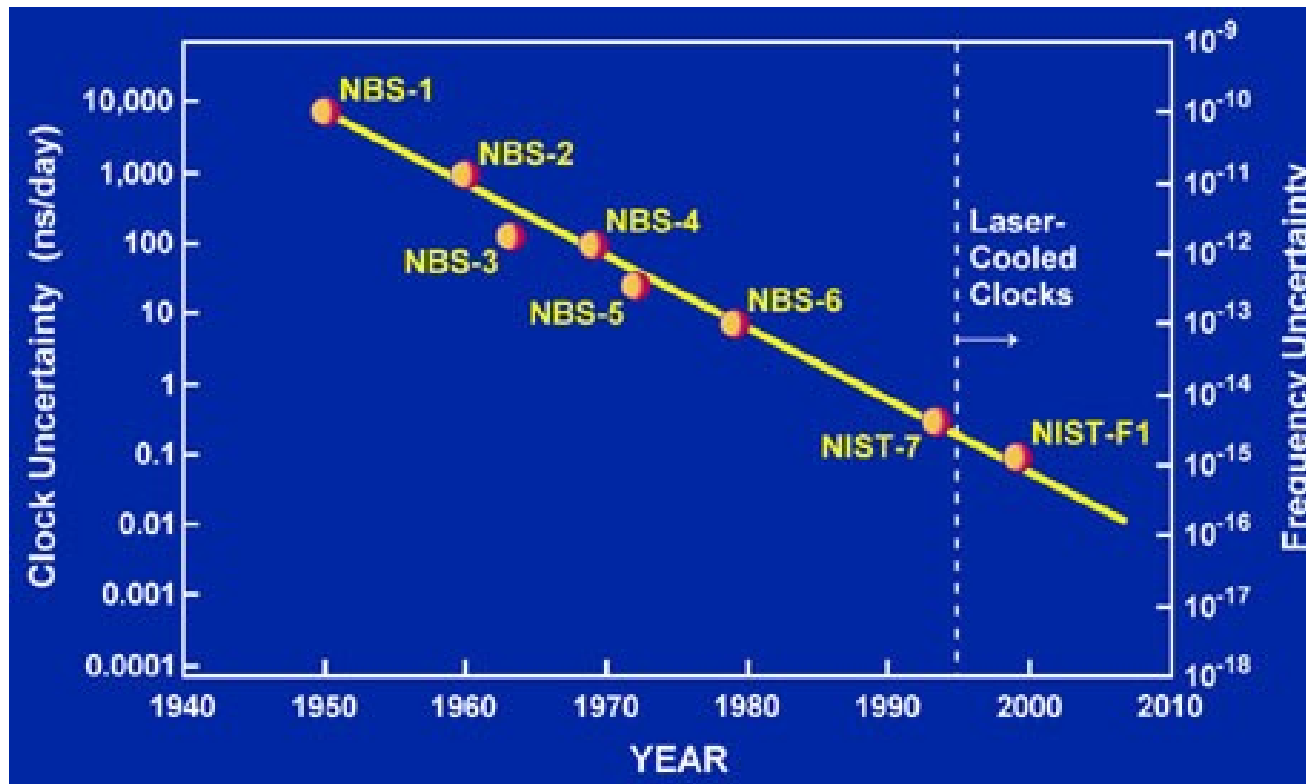
Stabilisace parami amoniaku byla známa pro klystrony už za války a možná i dřív.

Po válce se rozpoutala soutěž o "atomový" časový standard.

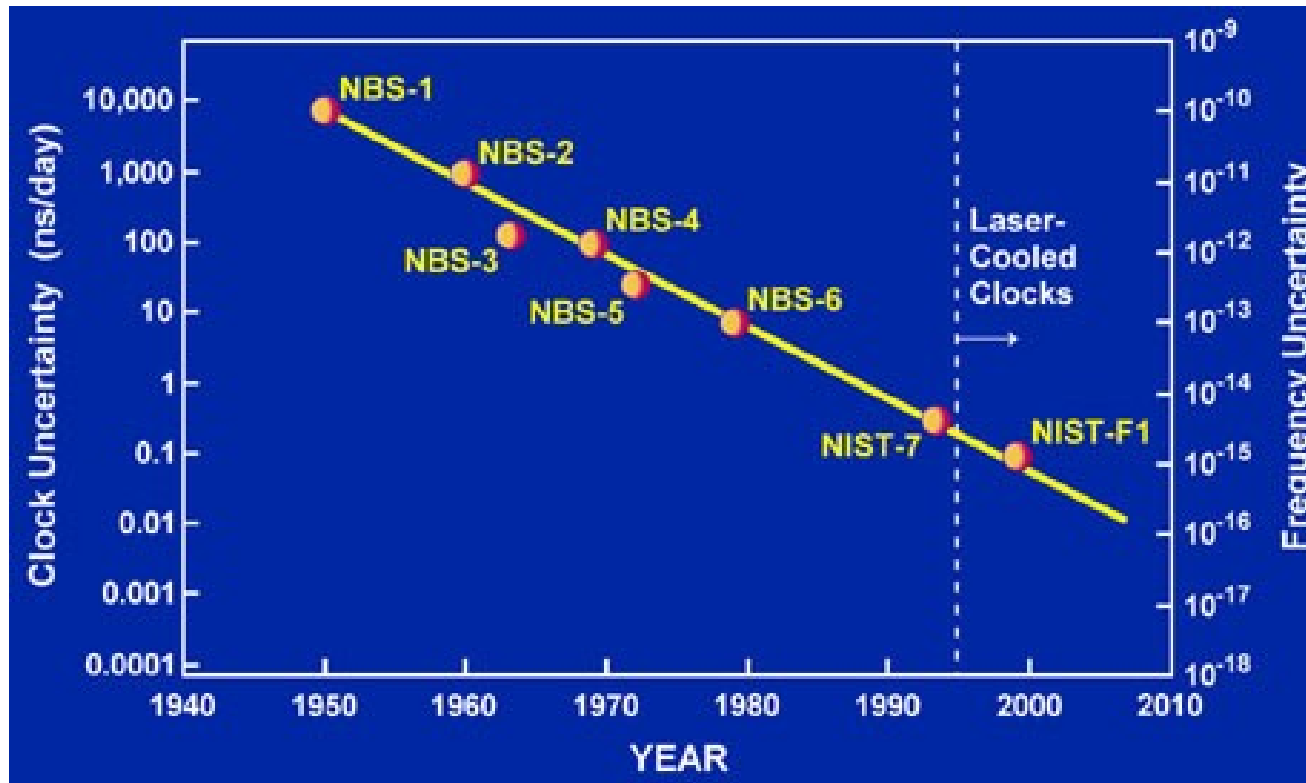
NBS (nyní NIST) se rozhodl pro rychlou akci a použít amoniaku k řízení křemenných hodin, ač se vědělo, že perspektivní jsou spíš elektronové přechody v parách alkalických kovů.

Sám přechod měl šířku čáry jen 1kHz, to bylo slibné. Problém ale nastal s Dopplerovým rozšířením a také s tlakovou závislostí šířky čáry. Nikdy nebyla přesnost lepší než 10^{-8} a proto nebyla předstížena časomíra odvozená od tropického roku, ačkoli denní cyklus Slunce byl zhruba srovnatelný.

Další vývoj (v NBS – NIST)



Další vývoj (v NBS – NIST)



Srovnatelné, nebo lepší výsledky

PTB Braunschweig, Německo

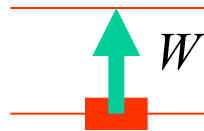
Laboratoire Primaire du Temps et des Frequences (LPTF)

Objev maseru

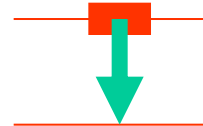
PREHISTORIE: POJEM STIMULOVANÉ EMISE

- Začalo to *Einsteinem*. Ten zavedl (1916) představu **stimulované emise**. Na systém dopadá elektromagnetické záření. To s určitou pravděpodobností ovlivní **každý atom**:

deexcitovaný systém
foton se pohltí
systém se excituje

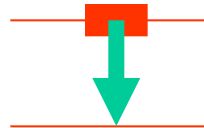


b
 a



excitovaný systém
foton se vyzáří
systém se deexcituje

- Vedle toho tu byla **spontánní emise**:

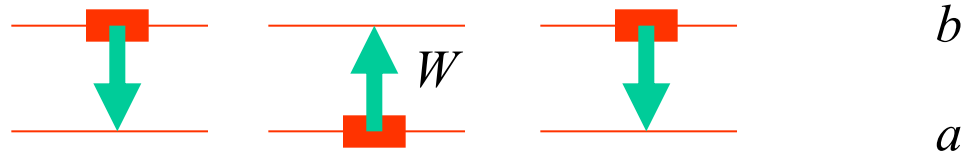


excitovaný atomární systém není stabilní,
ani když by byl plně izolovaný od světa.
Spontánně se vyzáří foton a systém se
deexcituje.
Tomu odpovídá "přirozená šířka linie".

Fyzikální příčina: vše pronikající
elektromagnetické vakuum
a jeho kvantové fluktuace

POJEM STIMULOVANÉ EMISE

- Celkově máme tři souběžné procesy



- Bilanční rovnice:

	spontánní emise	absorpce	stimulovaná emise	
$\frac{dI}{dt} =$	$A_{ab} \cdot N_b -$	$B_{ba} \cdot N_a \cdot I +$	$B_{ab} \cdot N_b \cdot I$	$B_{ba} = B_{ab}$
$A, B \dots$		eínovy koeficienty		
$N_{a,b} \dots$		ta molekul ve stavu a, b		
$I \dots$		ta elektromagn. energie		

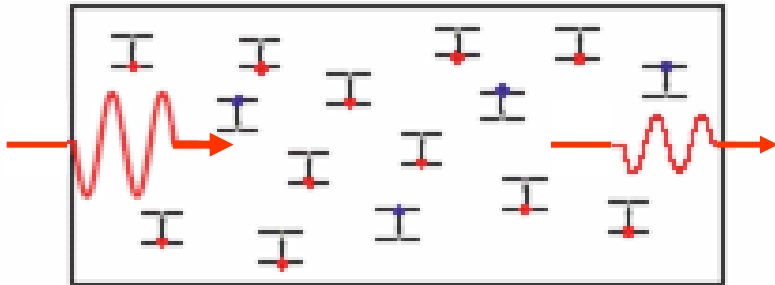
První maser

ZESÍLENÍ SVĚTLA VLIVEM STIMULOVANÉ EMISE

- Brzo vznikla myšlenka, že v plynu, kde převáží excitované molekuly, může dojít k zesílení světla stimulovalou emisí:

$$\frac{dI}{dt} = \dots + \dots - \dots$$

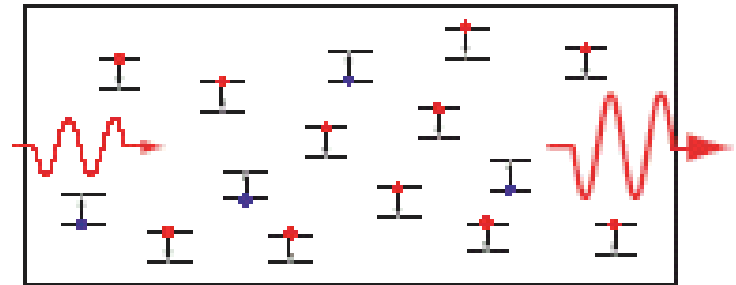
ROVNOVÁŽNÝ STAV: ZESLABENÍ



$$N_b = \dots, \quad \dots <$$

obyčejný Boltzmannův faktor
absorpční ztráty převládají

NEROVNOVÁŽNÝ STAV: ZESÍLENÍ



$$N_b = \dots, \quad \dots >$$

inversní populace hladin
„záporná teplota“
převládá stimulovalá emise

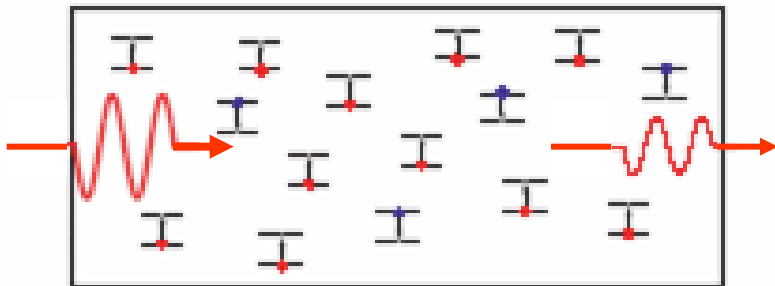
První maser

ZESÍLENÍ SVĚTLA VLIVEM STIMULOVANÉ EMISE

- Brzo vznikla myšlenka, že v plynu, kde převáží excitované molekuly, může dojít k zesílení světla stimulovalou emisí:

$$\frac{dI}{dt} = \dots + \dots - \dots$$

ROVNOVÁŽNÝ STAV: ZESLABENÍ

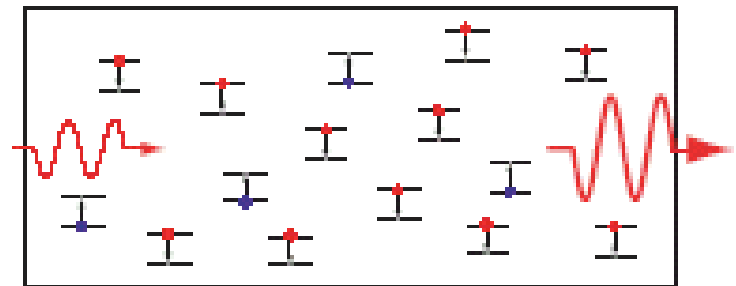


$$N_b = \dots, \quad \dots <$$

obyčejný Boltzmannův faktor
absorpční ztráty převládají

"obyčejná" situace
sama se udržuje

NEROVNOVÁŽNÝ STAV: ZESÍLENÍ



$$N_b = \dots, \quad \dots >$$

inversní populace hladin
„záporná teplota“
převládá stimulovalá emise

inversní populaci
nutno obnovovat

První maser

Jak toho ale dosáhnout?

První, spíše demonstrační realizace vznikla v laboratoři C.H. Townese (*Columbia U.*).

Myšlenka v r. 1951, realizace v r. 1954.

- Také zde vycházeli z válečných poznatků (CHT byl radarový specialista)
- Záření uzavřít do kvalitního resonátoru, jen slabý přebytek výkonu vyvádět
- Hlavní problém: stálá obnova inverzní populace
 - ... průtokovým uspořádáním
- Kde inverzní populaci získat
 - ... separátorem

Čpavkový maser

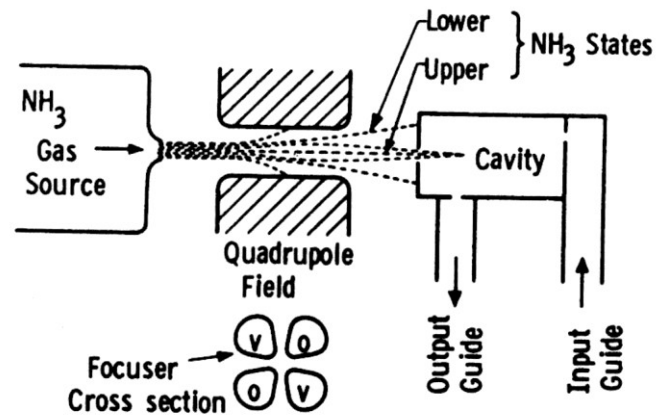


FIG. 6.7. Level separation of ammonia molecular beam in electric quadrupolar field [according to J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and C. H. Townes, *Phys. Rev.* 95, 282 (1954)].

Čpavkový maser

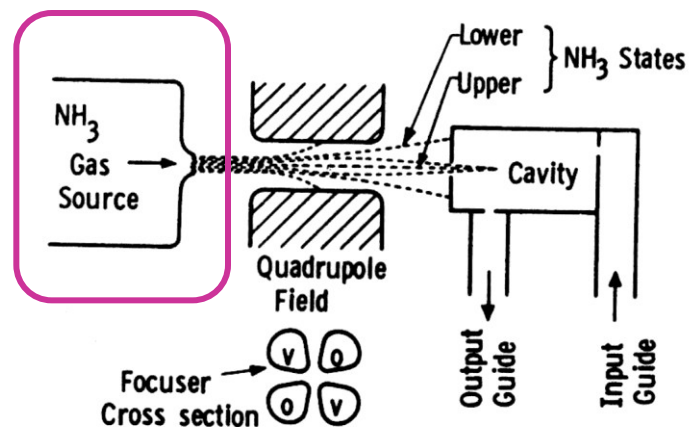


FIG. 6.7. Level separation of ammonia molecular beam in electric quadrupolar field [according to J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and C. H. Townes, *Phys. Rev.* 95, 282 (1954)].

ZDROJ

dával směs
excitovaných a
deexcitovaných
molekul, zhruba se
stejnou vahou

Čpavkový maser

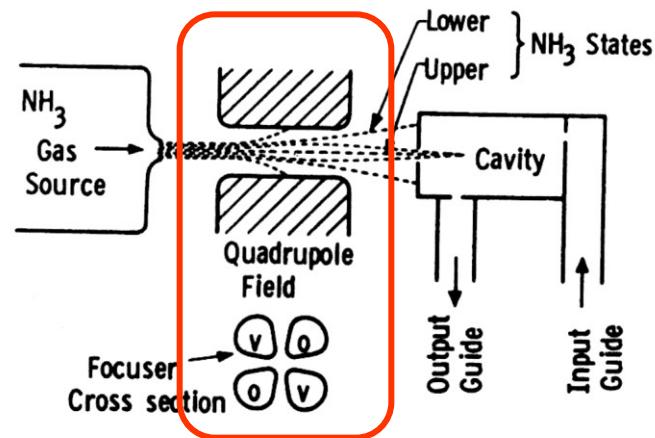


FIG. 6.7. Level separation of ammonia molecular beam in electric quadrupolar field [according to J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and C. H. Townes, *Phys. Rev.* 95, 282 (1954)].

ZDROJ

dával směs
excitovaných a
deexcitovaných
molekul, zhruba se
stejnou vahou

SEPARÁTOR

byl klíčovou částí. Molekuly v symetrickém a antisymetrickém stavu měly různé elektrické dipólové momenty. V nehomogenním poli kvadrupólových elektrod byly excitované antisym. stavy vtahovány k ose svazku, sym. stavy byly odstraněny

Čpavkový maser

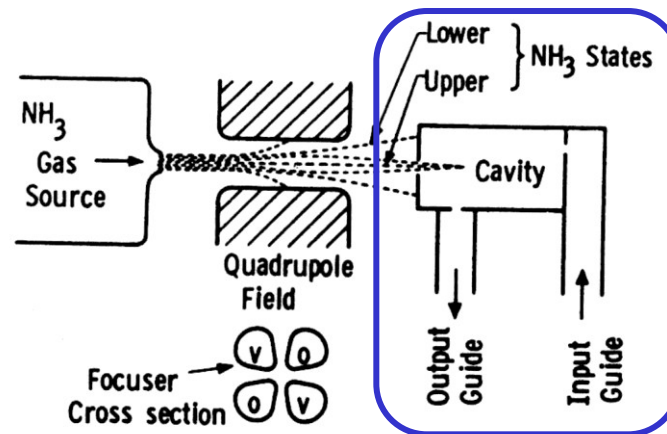


FIG. 6.7. Level separation of ammonia molecular beam in electric quadrupolar field [according to J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and C. H. Townes, *Phys. Rev.* 95, 282 (1954)].

ZDROJ

dával směs excitovaných a deexcitovaných molekul, zhruba se stejnou vahou

SEPARÁTOR

byl klíčovou částí. Molekuly v symetrickém a antisymetrickém stavu měly různé elektrické dipólové momenty. V nehomogenním poli kvadrupólových elektrod byly excitované antisym. stavy vtahovány k ose svazku, sym. stavy byly odstraněny

RESONÁTOR

byl protékán excitovaným plynem a napájen z klystronu budícím zářením. Skutečně došlo k stimulované emisi a zesílení signálu

Čpavkový maser

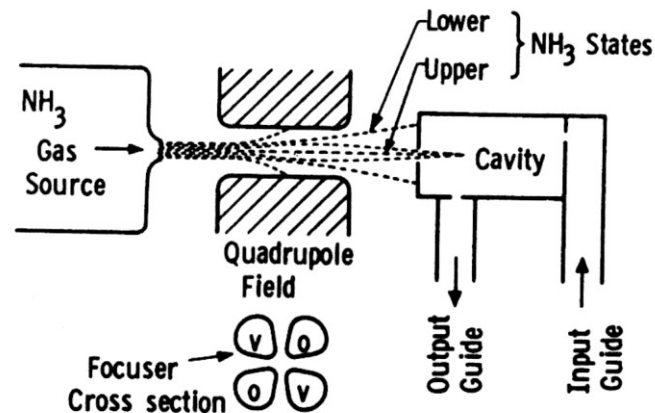


FIG. 6.7. Level separation of ammonia molecular beam in electric quadrupole field [according to J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and C. H. Townes, *Phys. Rev.* 95, 282 (1954)].

ZDROJ

dával směs excitovaných a deexcitovaných molekul, zhruba se stejnou vahou

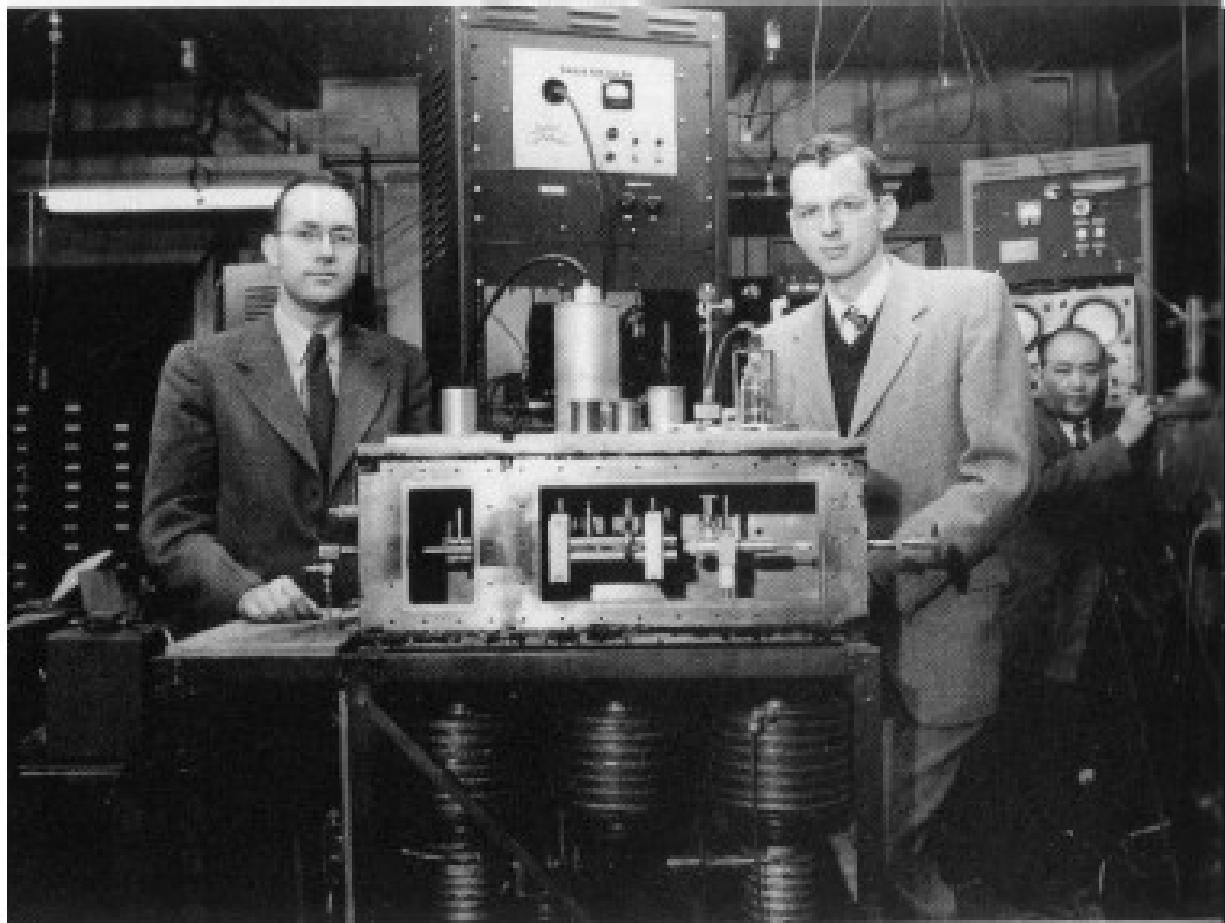
SEPARÁTOR

byl klíčovou částí. Molekuly v symetrickém a antisymetrickém stavu měly různé elektrické dipólové momenty. V nehomogenním poli kvadrupólových elektrod byly excitované antisym. stavy vtahovány k ose svazku, sym. stavy byly odstraněny

RESONÁTOR

byl protékán excitovaným plynem a napájen z klystronu budícím zářením. Skutečně došlo k stimulované emisi a zesílení signálu

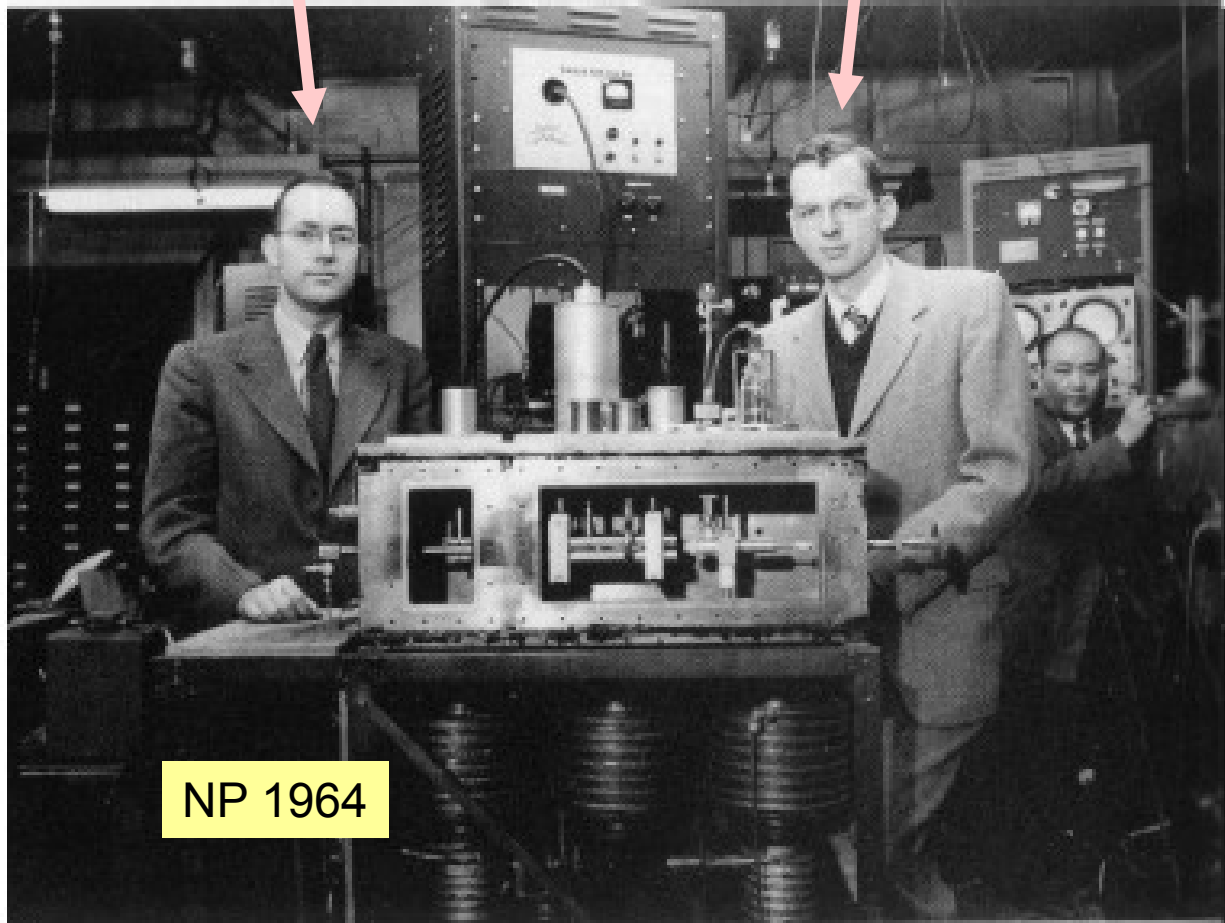
Townes a Gordon se svým maserem



Townes

maser

Gordon



NP 1964

Vznik slova "Maser": až ve druhém sdělení

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 99, NUMBER 4

AUGUST 15, 1955

The Maser—New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer*†

J. P. GORDON,‡ H. J. ZEIGER,§ AND C. H. TOWNES
Columbia University, New York, New York

(Received May 4, 1955)

We call an apparatus utilizing this technique a "maser," which is an acronym for "microwave amplification by stimulated emission of radiation."

Co pozorovali

- zesílení mikrovlnného signálu – původní plán
- při průtoku amoniaku nad kritickou hodnotu systém fungoval jako generátor záření (autoři říkají oscilátor), tj. zářil i bez pomocné stimulace vnějším polem
- vyzařovaná čára byla velmi ostrá ... šířka 2kHz při 23.8 GHz vlastně tedy koherentní záření
- s tím souvisel i mimořádně malý šum

Co pozorovali

- zesílení mikrovlnného signálu – původní plán
- při průtoku amoniaku nad kritickou hodnotu systém fungoval jako generátor záření (autoři říkají oscilátor), tj. zářil i bez pomocné stimulace vnějším polem
- vyzařovaná čára byla velmi ostrá ... šířka 2kHz při 23.8 GHz vlastně tedy koherentní záření
- s tím souvisel i mimořádně malý šum

základní charakteristiky maserů a laserů

Další vývoj

I zde první, a to naprosto úspěšný pokus, ale pokračování bylo jen krátké

Problém: jde o dvouhladinový systém, obnova inverzní populace obtížná

Již 1956 Nico Bloembergen (NP 1982) přichází s tříhladinovým systémem, kde kontinuální provoz je mnohem snazší

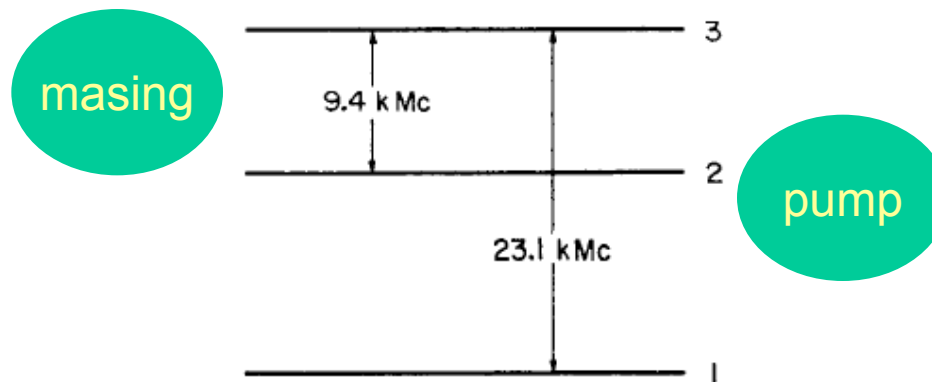


Fig. 2. Energy levels of Cr³⁺ in ruby with a particular crystalline orientation in a magnetic field of 3900 oersteds. For a three-level maser, 23.1 kMc (23.110³Mc) is the frequency of the pumping field and 9.4 kMc is the frequency of amplification or oscillation.

a odtud pokračuje další vývoj, zejména směrem k laserům

The end