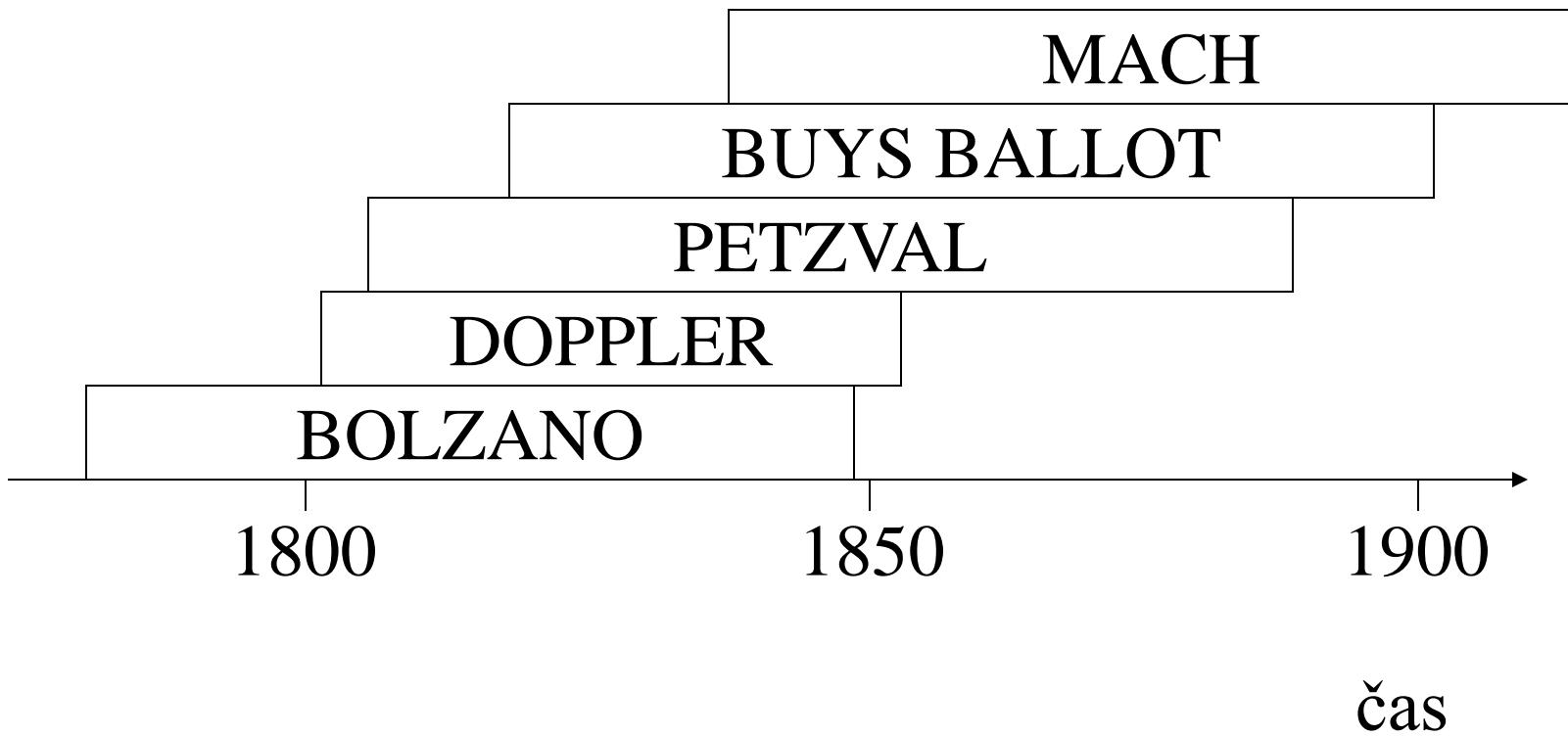


Stalno strokovno spopolnjevanje
Oddlek za fiziko Fakultete za
matematiko in fiziko

J. Strnad

ODKRITJE
DOPPLERJEVEGA
POJAVA

V razvoju fizike poudarjamo uspešne zamisli.
Fizika se izogiba napak, a jih ne kaznuje ostro.
Doppler je naredil pomembno odkritje,
a zgrešil hudo napako.





Christian Doppler

1803-1852

Doppler, rojen v Salzburgu 1803, je študiral na dunajski politehniki. Na njej je 1829 postal asistent. Prijavljal se je na razna mesta v Avstriji.

Poldrugo leto je bil računovodja v tekstilni tovarni. Nameraval se je izseliti v ZDA. 1835 je dobil mesto na srednji tehniški šoli v Pragi. 1841 je postal profesor na politehniški šoli in 1840 izredni ter 1843 redni član Kraljeve češke znanstvene družbe. 1847 je postal profesor na akademiji za rudnike in mostove v Banski Štiavnici. 1848 je pred Madžari zbežal na Dunaj.

Tam je bil profesor na politehniki in član akademije. 1850 je postal prvi direktor fizikalnega inštituta in bil to do 1852. Leta 1853 umrl v Benetkah.

UEBER DAS
FARBIGE LICHT DER DOPPELSTERNE
UND ANDERE ASTRONOMISCHE
GESTIRNE DES HIMMELS.

VERSOUCH EINER DAS BRADLEYSCHE ABBERRATIONS-THEOREM ALS ENTSTEHUNGS-THEIL IN SITTEN SCHOLESSCHEN ALGEMEINER THEORIE.

1868

CHRISTIAN DOPPLER.

PROFESSOR DER MATHEMATIK UND PHYSIKALISCHE GEOMETRIE IN THIENENSCHER INSTITUTTE
AN UNIVERSITÄTEN, MÜNCHEN,
DIE WISSENSCHAFTLICHE VERWALTUNG DER UNIVERSITÄTEN.

ZUR FEIER
SEINES HUNDERTSTEN GEBURTSTAGES

ALS ERSTER WIEDERHOLDENDEN VON SEINER 1843 ERFAßTEN

PHYSIKALISCHEN PRINCIPS

MIT BEACHTENDEINEN

DR. F. J. STUDNICKA,

A. K. PROFESSOR, PROFESSOR DER MATHEMATIK IN DER WISSENSCHAFTLICHEN

(MIT DOPPLER'S PORTRAIT.)

PRAG 1902.

VORLÄG DER KÖNIGL. PREU. GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.
DR. ED. GRÜFF & CO. DRUCKEREI IN PRAG.

Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels.

(Gelesen bei der königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Prag, in der naturwissenschaftlichen Sectionssitzung vom 25. Mai 1842.)

§ 1.

Die Undulationstheorie des Lichthes, sowie sie *Euler* und *Huygens* allererst aufstellten und mit vielem Scharfsinne gegen die erklärtesten Gegner derselben vertheidigten, ist im Verlaufe ihrer weiteren Ausbildung bekanntlich auf Schwierigkeiten gestossen, welche spätere ausgezeichnete Gelehrte, wie *Young*, *Fresnel*, *Cauchy* u. A. dahin vermochten, von der ursprünglichen, wie es scheint nur allein naturgemässen und einfachen Voraussetzung sphärischer oder longitudinaler Aetherschwingungen abzugehen und sich zur Annahme bloss derartiger transversaler Schwingungen zu verstehen. Die glänzenden Erfolge dieser neuen Voraussetzung haben seitdem auch mehrere derjenigen Physiker, wenn auch nicht eben überzeugt doch vorläufig einigermassen beruhigt, welche sich von allem Anfange her nur höchst ungern und mit sichtlichem Widerstreben dieser neuen Ansicht über die Natur des Lichthes hingaben. Und so ist es denn gekommen, dass während diese Ansicht den feinsten analytischen Untersuchungen fortwährend zum Grunde gelegt wird, und zu mehr oder minder glücklichen Resultaten führet, man die Untersuchung und jegliche Discussion über die Zulässigkeit und innere Wahrscheinlichkeit dieser neuen Hypothese vor der Hand so gut wie fallen liess. Auf eine vollständige und erschöpfende Erklärung sämtlicher bisher

V predavanju 25. maja 1842 *O barvasti svetlobi dvojnih zvezd in nekaterih drugih nebesnih teles* pred Kraljevo družbo se Doppler ni mogel odločiti za transverzalno naravo svetlobe. Mislil je, da nadaljuje Bradleyevo razpravo iz leta 1729 o zvezdni aberaciji, ki da jo je mogoče pojasniti le z longitudinalno sliko.

“Doslej ne v nauku o svetlobi ne v nauku o zvoku in ne v nauku o splošnem valovanju ... niso posvetili domala nobene pozornosti pomembni okoliščini. Kaže, da so popolnoma prezrli , da se moramo, če govorimo o svetlobnih in zvočnih valovih kot vzrokih za svetlobne občutke in ne zgolj kot o objektivnih pojavih, vprašati, ne samo v kakšnih časovnih razmikih in s kakšno jakostjo poteka nastanek valov, ampak tudi, v kakšnih časovnih razmikih in s kakšno jakostjo ta etrska ali zvočna nihanja zajame in zazna oko ali uho kakega opazovalca. Od teh čisto subjektivnih ugotovitev, ne pa od objektivne vsebine sta odvisna barva in jakost svetlobnega občutka ali višina in jakost kakega zvoka.”

Doppler je obravnaval pojave, pri katerih se izvir in sprejemnik gibljeta drug glede na drugega. Omejil se je na gibanje po premici, češ da je vlogo kotov pri pojavu pojasnil Bradley. Najprej je obdelal primer, da se sprejemnik giblje in izvir miruje v tekočini, nato pa primer, da se izvir giblje in sprejemnik miruje v tekočini. Z enačbami je opravil zelo hitro.

Za prvi primer je zapisal: “Naj bo hitrost, s katero potujejo valovi a in O in A (slika 1 in 2) pomenita začetek in konec vala, Q pa oddaljeni izvir. Dalje naj bo n število sekund, ki jih val porabi, da pride od A do O , to pomeni, da prepotuje valovno dolžino, in x'' čas, ki ga potrebuje, da doseže opazovalca O , ki se giblje proti A ali od njega. Pri tem imamo za primer približevanja opazovalca k njemu kot oddaljevanja od njega”:

$$ax'' \pm \alpha x = an''$$

$$x'' = an / (a \pm \alpha)$$

$$\alpha = \pm (1 - n'' / x'') a$$

Za drugi primer je zapisal: “Če pa je opazovalec pri miru in se s hitrostjo α izvir giblje proti opazovalcu ali od njega, moramo predvsem upoštevati vpliv tega gibanja na naslednji val ob izviru, ker posamezni nastali valovi potujejo, kot ponazarjata sliki 3 in 4, na popolnoma nespremenjen način do oddaljenega opazovalca v O. Medtem ko je torej prvi val od Q prišel do Q' in pri tem opravil pot αn , drugi val potrebuje prav tolikšen čas, da preteče razdaljo, to je ustrezno valovno dolžino Q' . A. Zato imamo za oba primera”:

$$\alpha n'' \mp \alpha n' = \alpha x''$$

$$x = (Q \mp \alpha / a)n$$

$$\alpha = \pm (x / n - 1)a''$$

V prvem primeru v zadnji enačbi
 n'' nadomestimo s T in x'' s T' ter a s c in α z v .
Dobimo:

$$T / T' = 1 \pm v / c$$

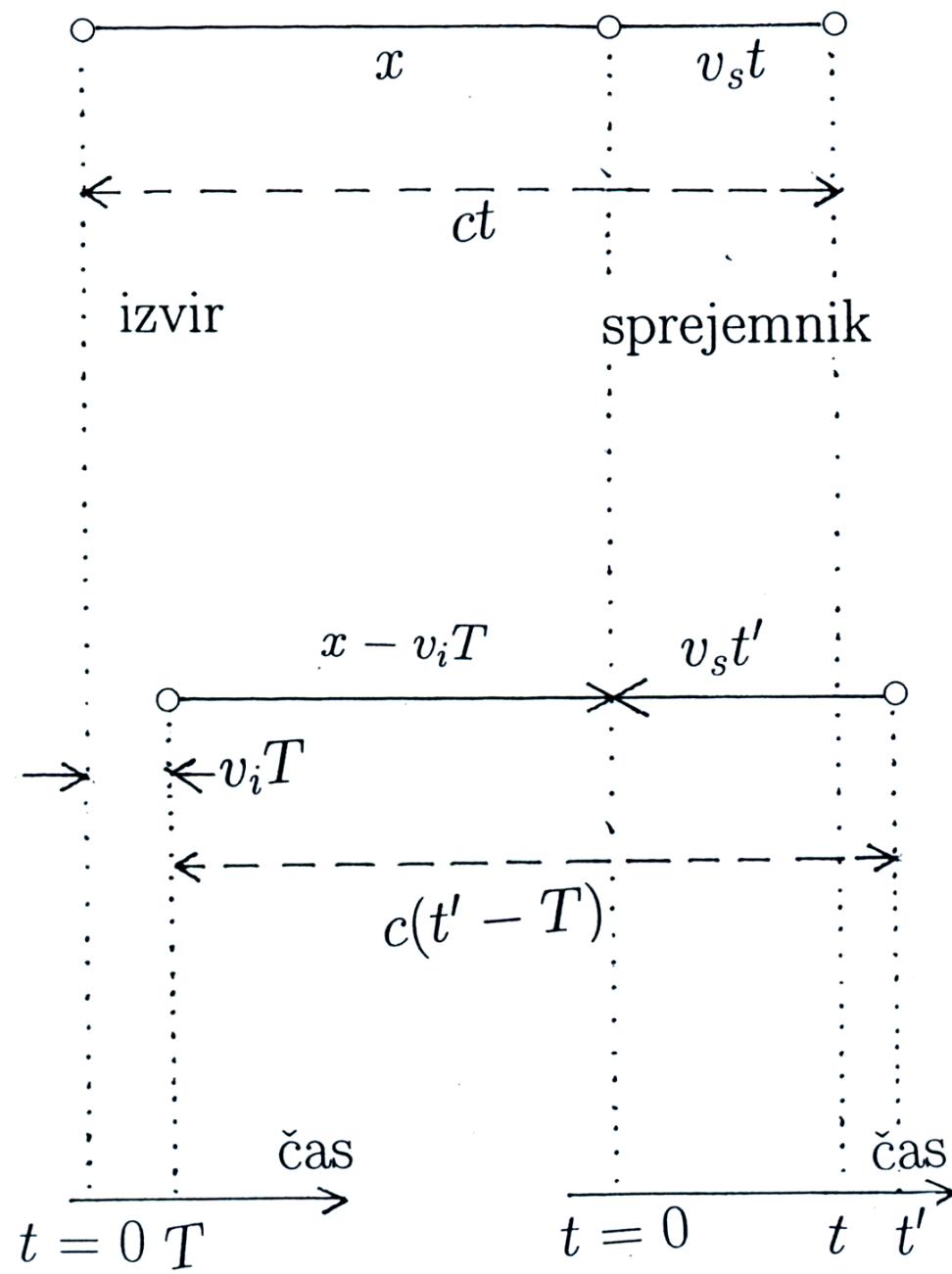
in

$$s \quad T / T' = \nu' / \nu$$

$$\nu' = \nu(1 \mp v / c).$$

V drugem primeru na podoben način dobimo:

$$\nu' = \nu / (1 \pm v/c).$$



Doppler je vedel, kaj dela. Vendar bi si najbrž prihranil marsikateri očitek, če bi uporabil enolične znake in z nekaj besedami opisal, kako potuje valovanje in kako se gibljeta sprejemnik in izvir.

Mach: “Dopplerjev način obravnavanja predmeta po danih namigih ne zadovoljuje zahtev stroge znanosti, ampak lahko velja le za prvi poskus teorije... Četudi Dopplerjeva izpeljava ni natančna, pa se zdi, da je rezultat pravi.”

V nadaljevanju je Doppler predvsem hotel ugotoviti, ali bi bilo napovedani pojav mogoče opazovati. Za hitrost zvoka je privzel 333 m/s. Ugotovil je: slišali bi ton D s frekvenco 64 Hz kot ton C s frekvenco 72 Hz, če bi se izviru bližali s hitrostjo 41,6 m/s. Za razliko četrtine tona, kar naj bi glasbeniki še razločevali, je potrebna hitrost 5,5 m/s.

Pri svetlobi je trdil, da zvezde, ki se približuje s hitrostjo $0,45c$, sploh ne bi videli. Mislil je, da bi spremembo svetlobe opazili, če bi bila hitrost zvezde vsaj $0,008c$.

Predavanje je končal preroško:

“Skoraj z gotovostjo moramo sprejeti, da bo ta [teorija] v ne tako oddaljeni prihodnosti astronomom dala dobrodošlo orodje, s katerim bo mogoče ugotoviti gibanja in oddaljenosti nebesnih teles, za katere zaradi njihovih neizmernih oddaljenosti od nas in s tem povezano majhnostjo paralaksnih kotov v sedanjem trenutku komaj upamo, da bi opravili taka merjenja in določitve.”

Odzivi na Dopplerjevo predavanje:
Karl Kreil: podprl natis. V Astronomsko-meteorološkem zborniku za leto 1844 dodal poljuden članek o Dopplerjevem pojavu.

Bernhard Bolzano je v Annalen der Physik objavil članek *Nekaj pripomb o novi teoriji gospoda profesorja Ch. Dopplerja* 1845.

Dopplerjeva ralaga velja enako za longitudinalno kot za transverzalno valovanje.

Zvezde v vesolju ne morejo biti pri miru in se najbrž gibljejo z veliki hitrostmi.



Bernhard Bolzano
1781-1848

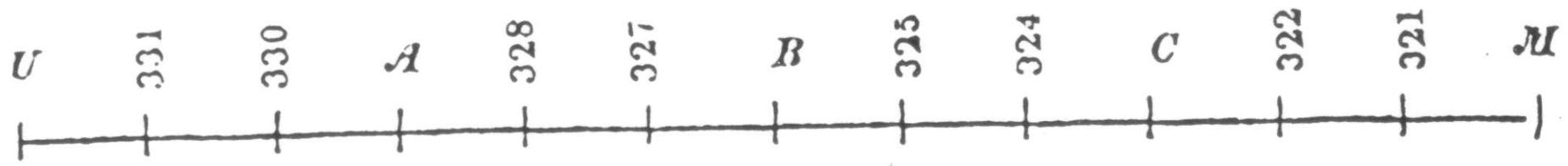
Bernhard Johann Bolzano, rojen 1781 v Pragi, je tam študiral matematiko, fiziko in filozofijo ter teologijo. 1804 je postal katoliški duhovnik. Zavzemal se je za spremembo gospodarskega sistema in izrecno nasprotoval vojni. 1819 je izgubil mesto. 1842 se je vrnil v Prago in postal tajnik matematično-fizikalnega oddelka Kraljeve češke znanstvene družbe. Vseskozi je podpiral Dopplerja.

Christophorus Buys Ballot je leta 1845 v Annalen der Physik objavil članek *Akustični poskusi na nizozemski železnici poleg priložnostnih pripomb na teorijo gospoda profesorja Chr. Dopplerja*

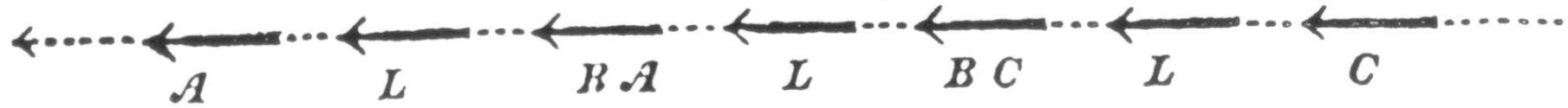
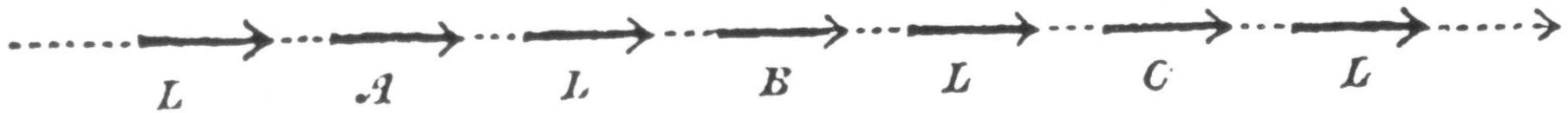
Christophorus Buys Ballot je bil rojen 1817 v Kloetingu. Študiral je na univerzi v Utrechtu. Po doktoratu 1844 je tam postal profesor za mineralogijo, geologijo, teoretično kemijo (1846), matematiko (1847) in fiziko (1867). Obravnaval je periodične pojave v ozračju. Postavil je izrek o geostrofskem vetru: opazovalec, ki mu veter piha v hrbet, ima območje z majhnim tlakom na levi. 1845 je ustanovil nizozemski meteorološki inštitut. 1873 je postal prvi predsednik Mednarodne meteorološke organizacije, predhodnice WMO. Umrl je 1890 v Utrechtu.



Christophorus Buys Ballot
1817-1890



Es wird geblasen in:



Geschwindigkeit.	Beobachteter Unterschied.	Theoret. Schwingungs-Anzahl.	Unterschied zw. theor. Zahl u. Mittelzahl für den halb. Ton =		
			$\frac{12}{13}$	$\sqrt[12]{2}$	$\frac{24}{23}$
	1	2			
II.	K. 12,5	6	4	1036	- 1
	G. 14,3	8	8	958	+14
	V. 13,4	14	12	1081	-14
III.	K. 9,1	8	8	1026	-33
	G. 10,1	6	4	971	+ 6
	V. 9,6	14	12	1056	-39
IV.	K. 9,6	8	8	1028	-31
	G. 11,8	8	8	966	+22
	V. 10,7	16	16	1066	-52
V.	K. 12,5	2	8	1036	- 1
	G. 12,6	2	8	963	- 2
	V. 12,5	4	16	1075	+ 1
VI.	K. 9,5	-	-	1027	---
	G. 11,1	-	-	968	---
	V. 10,3	9	12	1057	-19

Station B.

I.	K. 9,5	7	8	1027	-28	-15
	G. 10,6	1	0	969	-27	-28
	V. 10,1	8	8	1059	0	+17
II.	K. 14,3	7	7	1043	-8	+6
	G. 13,3	4	2	961	-18	-24
	V. 13,8	11	9	1085	+11	+33
III.	K. 11,1	7	7	1032	-19	-5
	G. 10,5	4	4	969	-3	-11
	V. 10,8	11	11	1065	-16	+8
IV.	K. 11,1	7	7	1032	-19	-5
	G. 13,3	5	0	961	-11	-16
	V. 12,2	12	7	1074	-8	+13
V.	K. 14,3	0	0	1042	+42	+42
	G. 14,3	14	12	958	+49	+23
	V. 14,3	14	12	1088	-8	+22
VI.	K. 11,1	8	8	1032	-27	-10
	G. 11,1	6	2	967	-5	-13
	V. 11,1	14	10	1067	-19	+ 5

Station A.

I.	K. 9,5	2	8	1027	-10	+ 1
	G. 8	8	6	978	+27	+13
	V. 8,8	10	14	1050	-38	-12
	K. 14,3	2	8	1043	+ 6	+17

Geschwindigkeit.	Beobachteter Unterschied.	Theoret. Schwingungs-Anzahl.		$\frac{12}{\sqrt[12]{2}}$	$\frac{24}{23}$	und mittlerer Zahl in den halb. Ton =
		1	2			
III.	K. 11,1	0	0	1032	+32	+32
	G. 12,5	9	12	963	+35	+15
	V. 11,8	9	12	1072	-3	+17
IV.	K. 12,5	8	8	1036	-23	-6
	G. 15,4	8	8	955	+11	-5
	V. 14	16	16	1085	-33	0
V.	K. 16,7	4	2	1051	+29	+36
	G. 14,3	8	9	958	+17	0
	V. 15,5	12	11	1097	+13	+37
VI.	K. 11,1	8	1	1032	-1	+9
	G. 12,5	1	8	963	-6	-14
	V. 11,8	9	9	1074	+7	+26

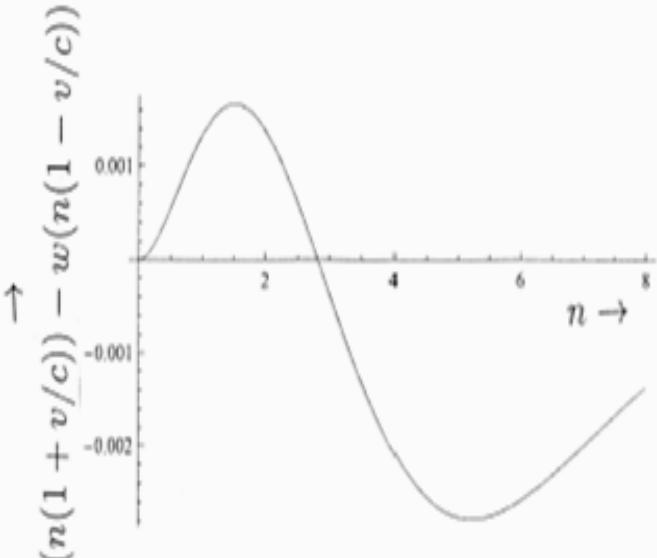
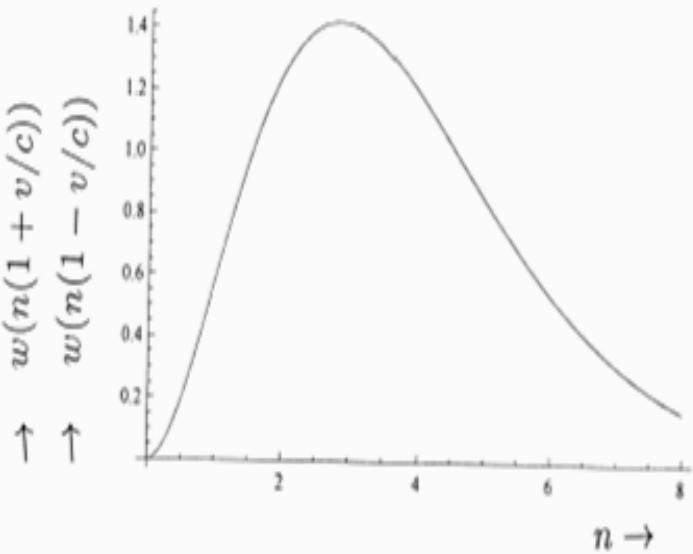
L o c o m o t i v e.

I.	K. 14,4	6	6	1043	-1	+11
	G. 14,2	6	6	958	0	-12
	V. 14,3	12	12	1089	-1	+22
II.	K. 15,0	5	5	1044	+7	+18
	G. 15,8	8	8	954	+10	-6
	V. 15,4	13	13	1094	-2	+20
III.	K. 5,5	4	4	1016	-13	-
	G. 5,5	4	4	984	+12	+
	V. 5,5	8	8	1035	-25	-
IV.	K. 5,1	4	4	1015	-14	-
	G. 4,9	4	4	986	+14	+
	V. 5	8	8	1031	-28	-1
V.	K. 14,3	8	8	1042	-13	-
	G. 14,1	8	8	959	+15	-
	V. 14,2	16	16	1088	-28	+
VI.	K. 18,3	8	8	1053	-6	+1
	G. 18,4	8	8	947	+3	-1
	V. 18,3	16	16	1106	-10	+

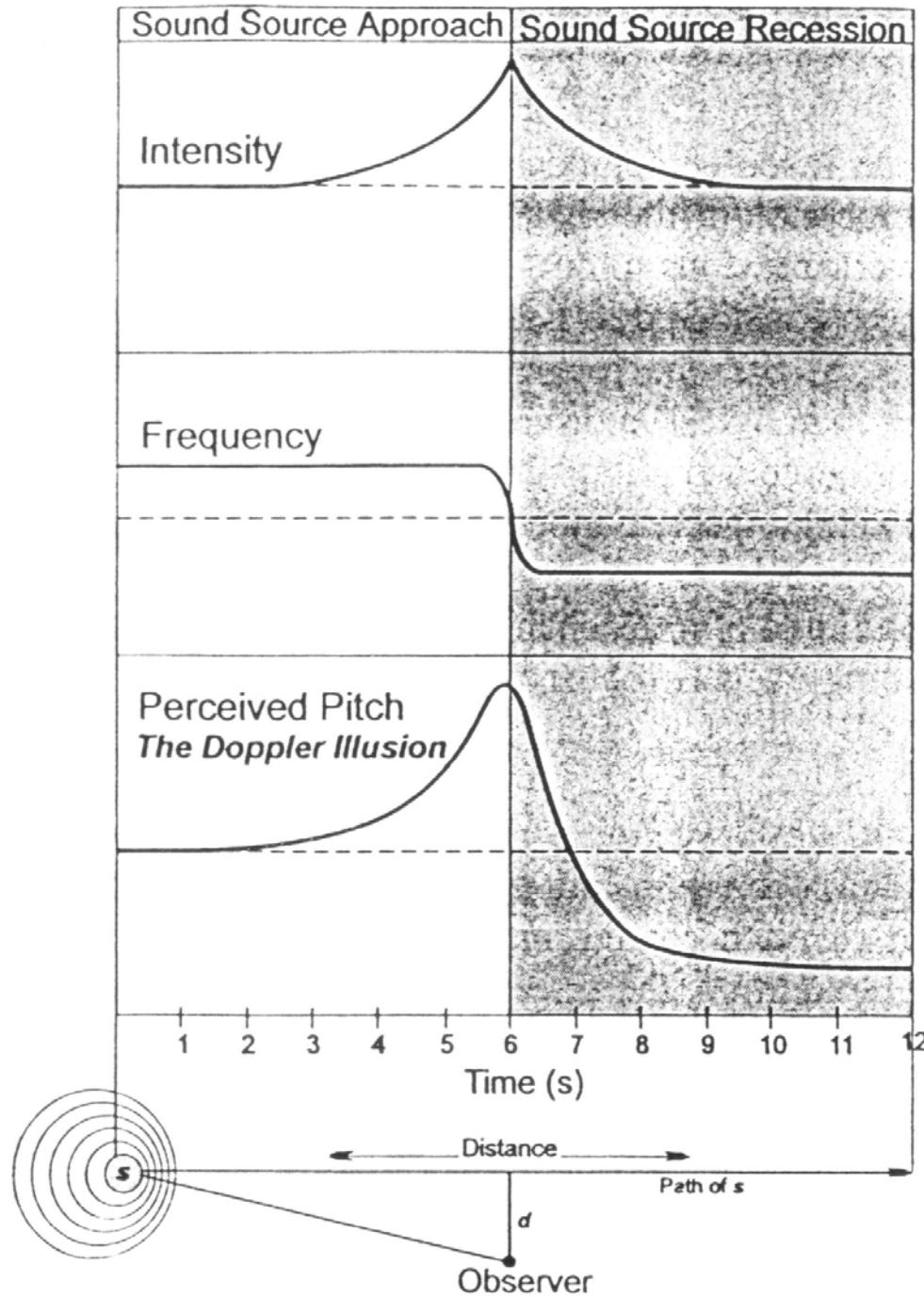
§. 7.

Man sieht also, dass im Allgemeinen die Theorie bestätigt wird. Die Unterschiede schwanken in Plus Minus; meist sind sie in den beiden Hypothesen von gegengesetztem Zeichen oder verschwinden fast in einer von ihnen. Man bedenke nur, dass selbst ein Unterschied von 10 Schwingungen verschwindend klein ist. Einige Unregelmäßigkeiten lassen sich vielleicht daran erkennen.

Buys Ballotove pripombe na Dopplerjeve zamisli:
Mogoče je rezultate za zvok prenesti na svetlobo.
A zvezde, tudi dvojne zvezde, ne dosežejo dovolj
velike hitrosti. Barva zvezd ima druge vzroke.
Zvezdni spekter je zvezen, zato bi bilo težko opaziti
spremembo barve. Zvezda poleg vidne svetlobe seva
infrardečo in ultravijolično svetlobo, zato se ne more
primeriti, da bi izginila.



G. Neuhoff, M. K. McBeath, *Overcoming naive mental models in exploring the Doppler shift. An illusion creates confusion*, Am. J. Phys. **65** (1997) 618 sta po poskusih z ljudmi zagotovila, da gre pri Dopplerjevem pojavu pri mimo vozečem vozilu s trobljo za “Dopplerjevo prevaro”.



O poskusih z zvokom je leta 1849 poročal tudi John Scott Russell, odkritelj solitonov.

Doppler se je na Buys Ballotov članek odzval s člankom *Pripombe k moji teoriji barvaste svetlobe dvojnih zvezd itd. predvsem z ozirom na proti njej usmerjene pripombe gospoda dr. Ballota iz Utrecht*. V Razpravah Kraljeve češke znanstvene družbe je leta 1847 objavil članek *O vplivu gibanja sredstva na pojav valov etra, zraka in vode*. Članek se razlikuje od drugih Dopplerjevih člankov po slogu in vsebini. Barvo dvojnih zvezd je komaj omenil. Obravnaval pa je druge pojave, računal in izvajanje spremljaj s številnimi risbami. Med drugim je opisal pojav, ki je pozneje postal znan kot Machovo valovno čelo.

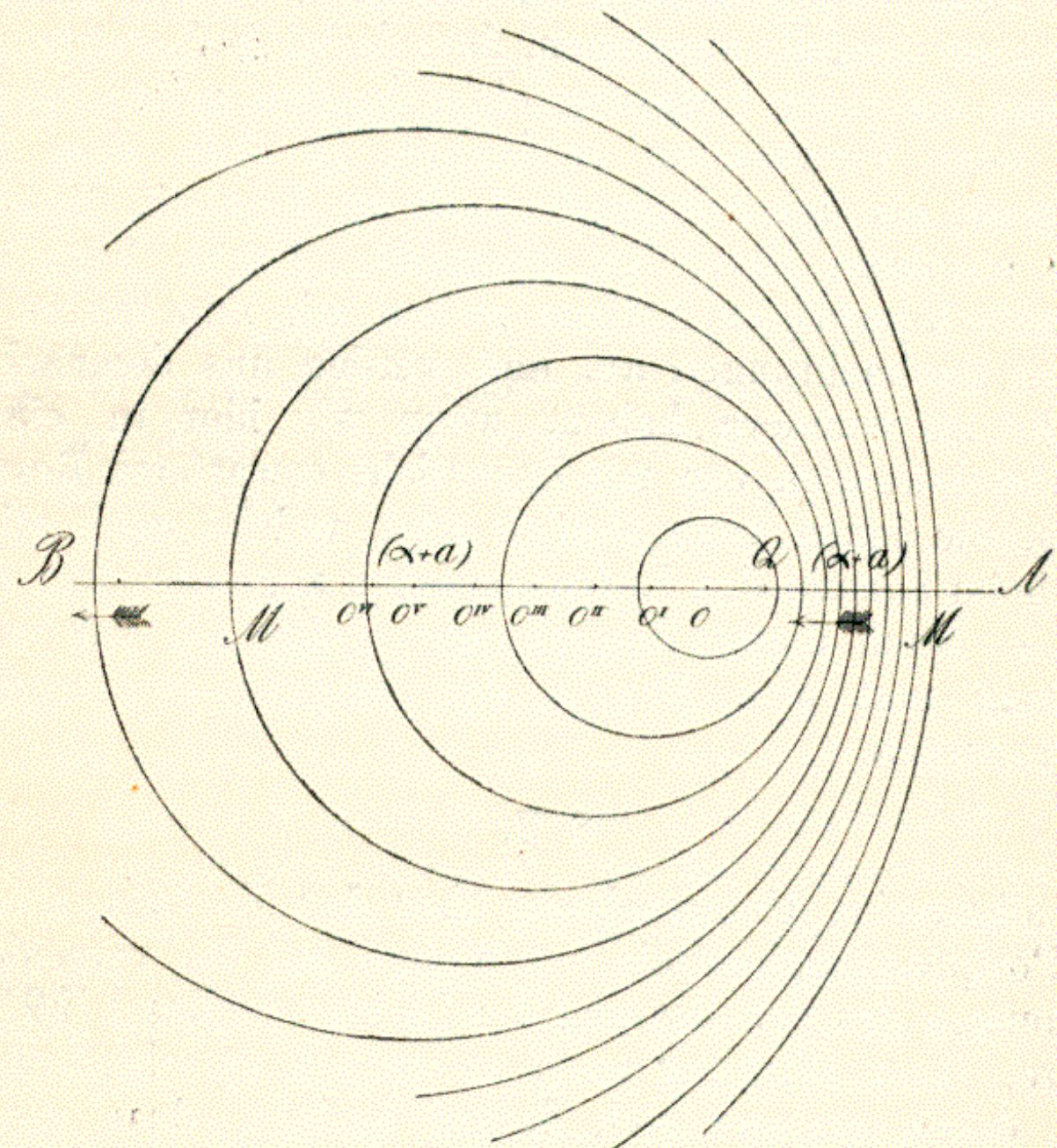


Fig. 1.

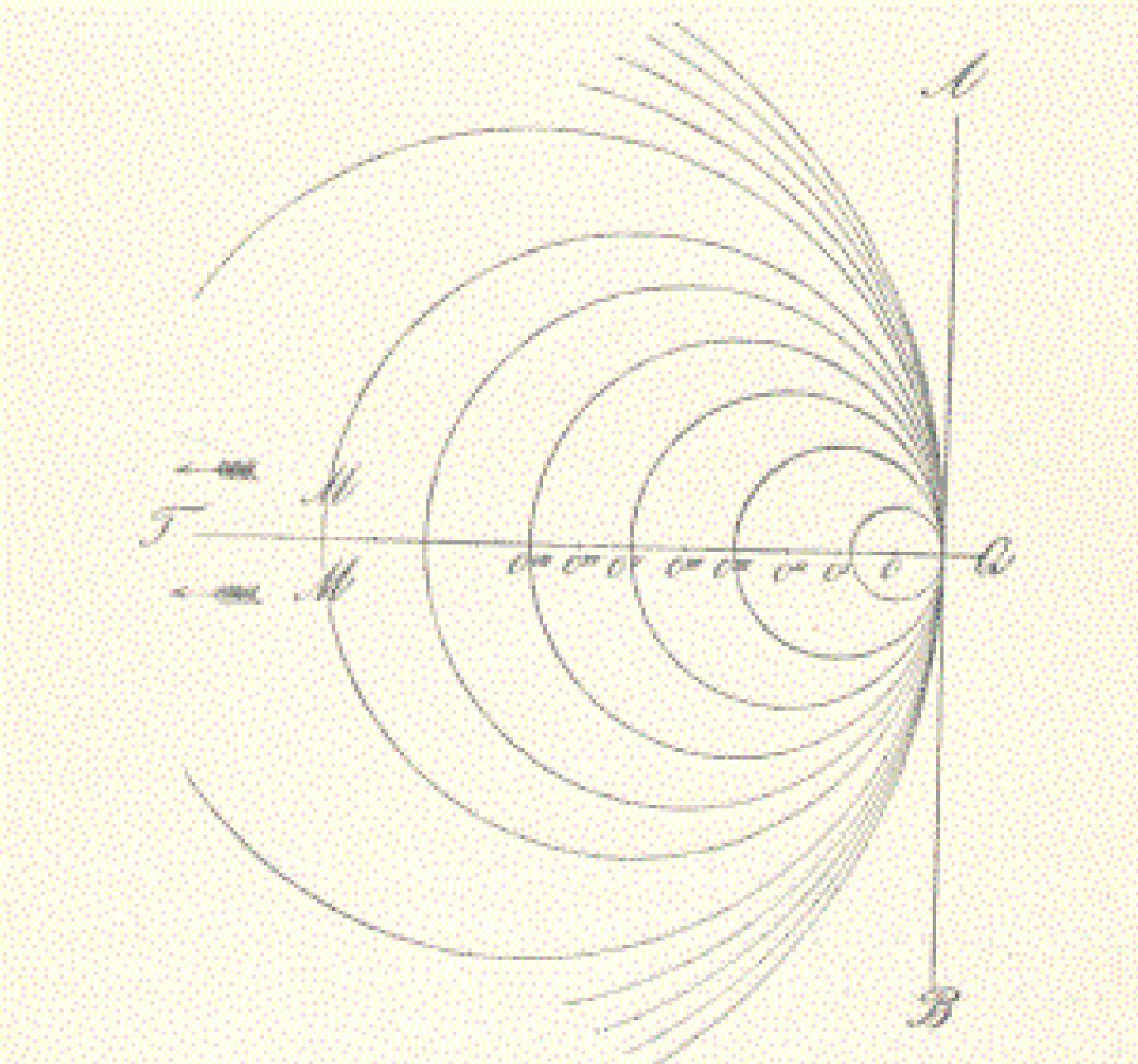


Fig. 5.

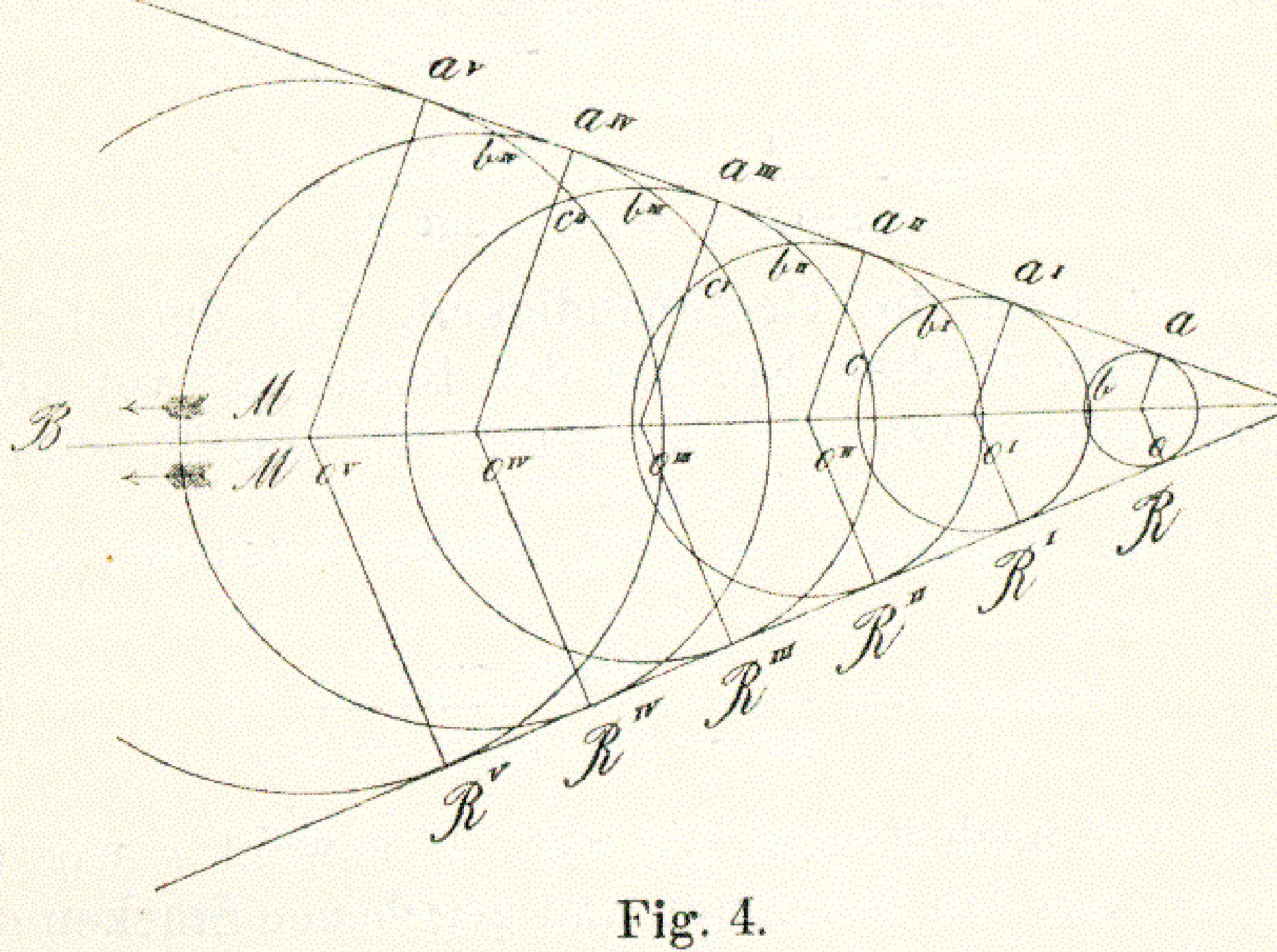
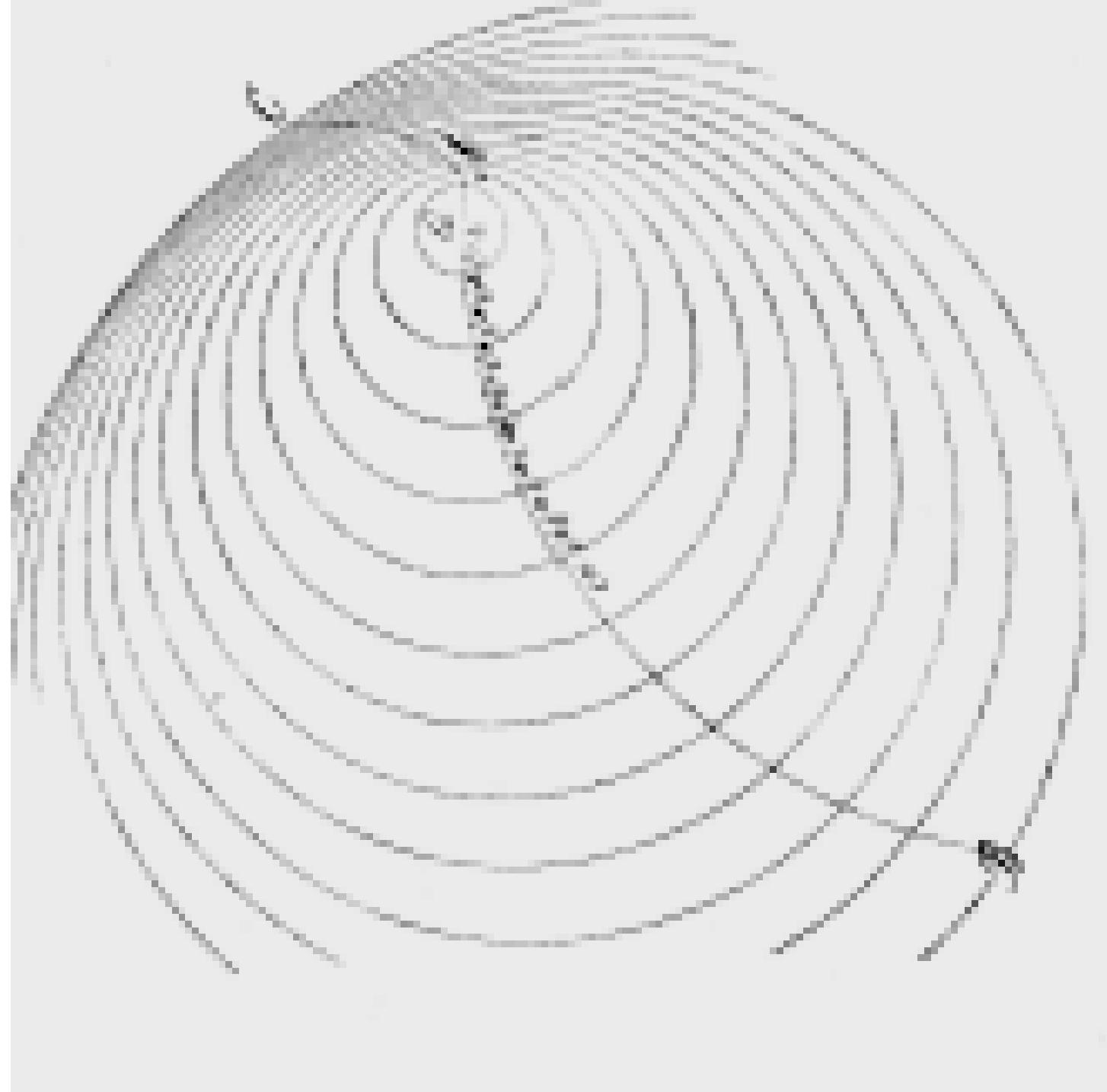
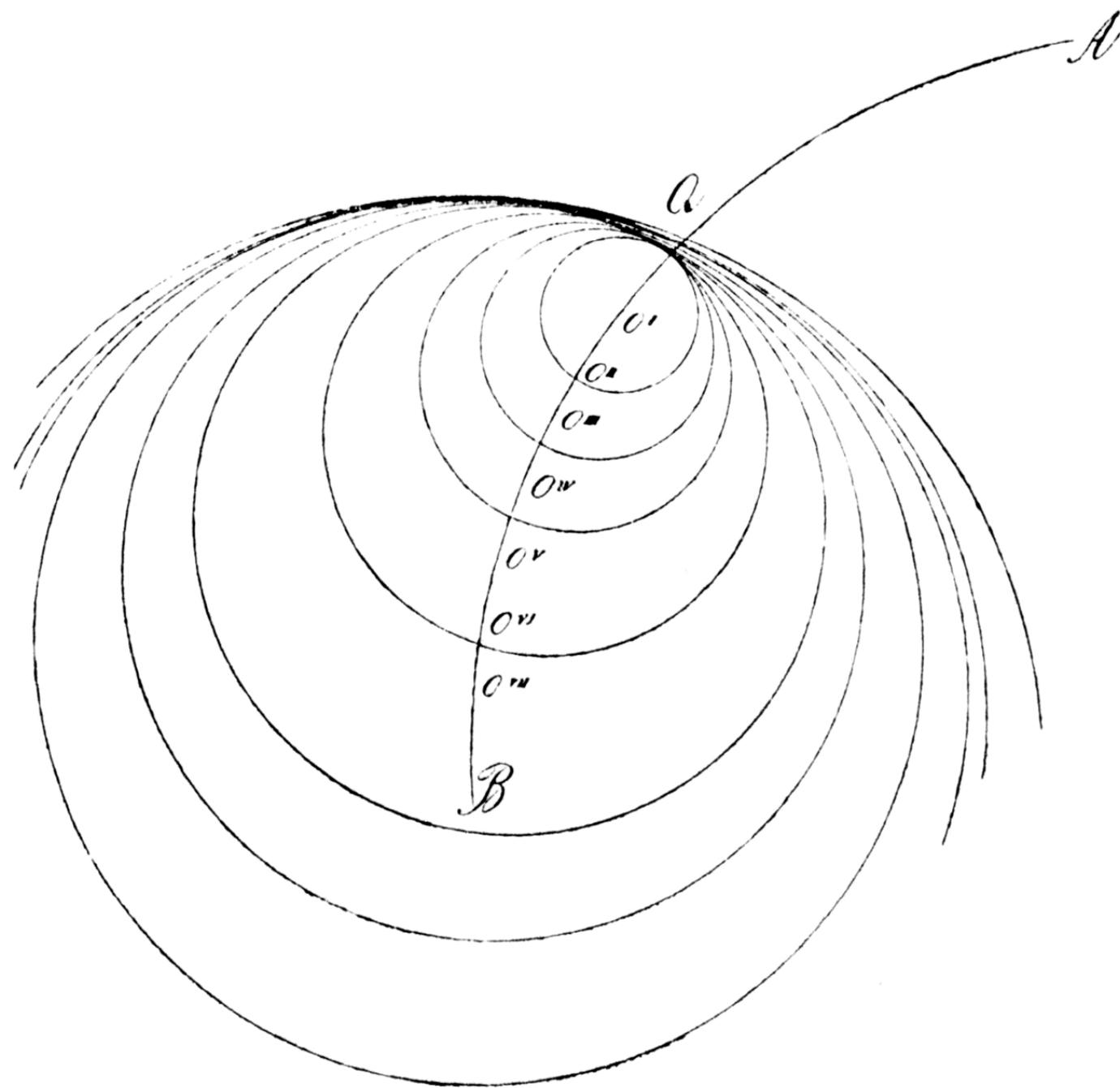
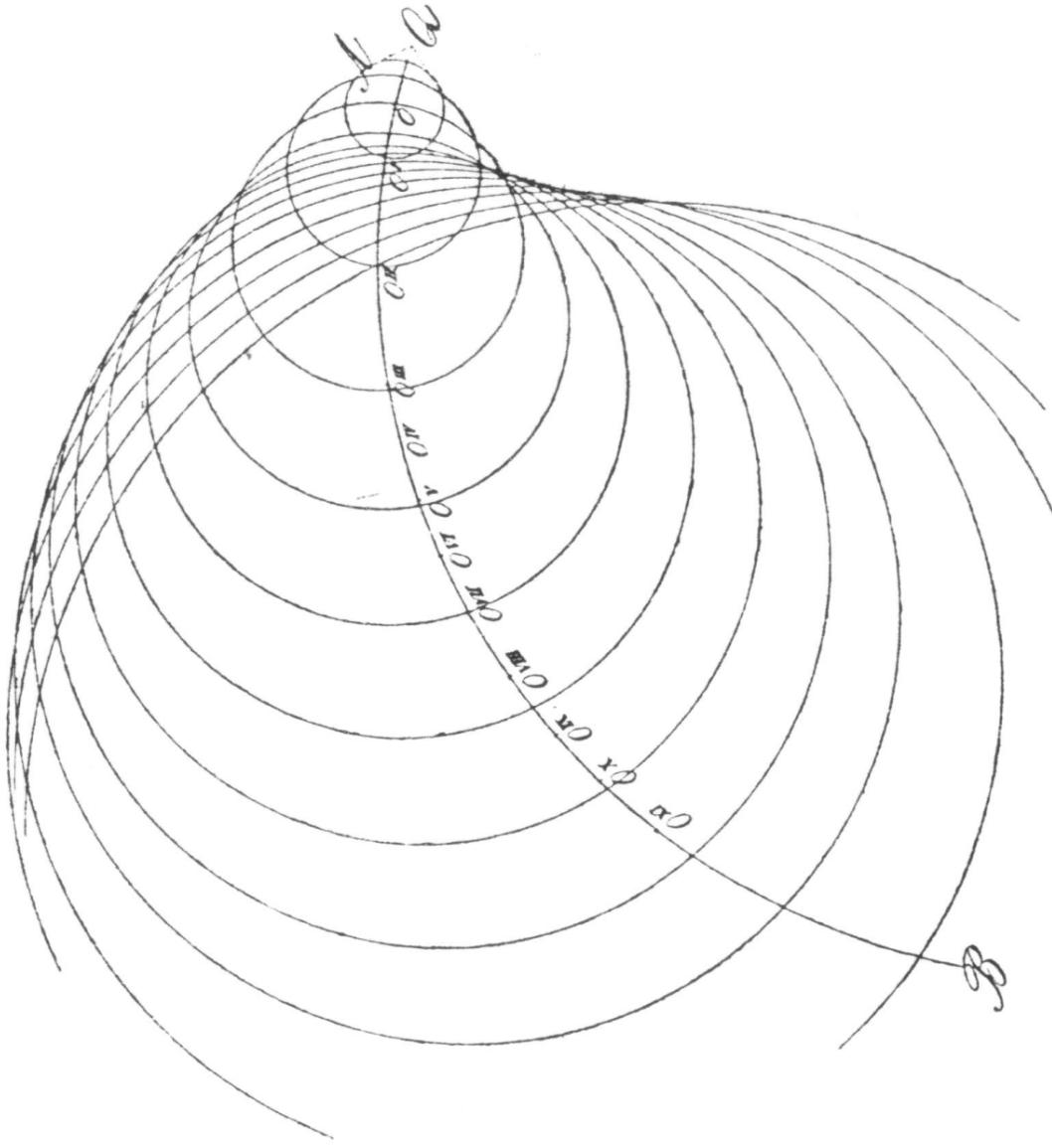


Fig. 4.









Joseph Petzval
1807-1891

Joseph Maximilian Petzval je bil rojen 1807. Po študiju na praškem geometrijskem inštitutu in po doktoratu 182 se je zaposlil kot inženir na praški občini. Po kratkem času na univerzi v Budimpešti je leta 1836 prešel na Dunaj. Od leta 1837 je vodil katedro za matematiko. Leta 1840 je izdelal načrt za objektiv, ki je fotografiranje portretov od četrt ure skrajšal na 40 sekund. Sprl se je s Voigtlaenderjem, ki je zaradi spora svojo tovarno preselil v Nemčijo. 1877 je zapustil univerzo in 1891 pozabljen umrl.

J. Petzval je leta 1851 imel predavanje, ki ga je objavil v Poročilih z zasedanj c. in k. Akademije znanosti: *O splošnem načelu nauka o valovanju, zakon o ohranitvi nihajnega časa.*

V njem je na dolgo in z zahtevnim matematičnim orodjem ugotavljal, da je nihajni čas v valovanju neodvisen od gibanja tekočine.

“Dopplerjeva teorija je odpravljena in dokazano zmotna.”

“O Dopplerjevi teoriji ne moremo reči, da nima nobene vrednosti, ker neki pojav opiše napačno, ampak je treba reči, da je njena vrednost negativna, ker je na tak način številne privržence znanosti zapeljala v zmoto z navidezno preprostostjo in jasnostjo, ki pa nista nič drugega kot površnost in pomanjkanje globine.”

“Cesarska akademija znanosti pozneje ni nikoli več doživela” spora, kakršnega je sprožil Petzval.

$$\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \propto (\nabla \nabla) \vec{u} + 2 \nabla (\nabla \vec{u})$$

$$\vec{r} = (x, y, z), \vec{u}, , U = \nabla \vec{u}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \propto 3 \nabla^2 U$$

“na novo vpeljana spremenljivka U ...pomeni spremembo enote prostornine ali z drugimi besedami s tem gibanjem se spremeni prostornina $dxdzdy$ v $(1+U)dxdzdy$. ”

Petzval je imel prav, a njegovo dokazovanje ni zajelo Dopplerjevega pojava.

Doppler je leta 1852 v Poročilih odgovoril s člankom *Pripombe o ugovorih, ki jih je proti pravilnosti moje teorije navedel gospod prof Petzval.*

“Gospod nasprotnik se je postavil na stališče srednjeveške sholastično-dogmatične šole, katere pristaši so, kot je znano, naravo sestavili iz pojmov in formul in se pri tem niso niti najmanj menili za izkušnje. Nekateri od njih so v svoji duhovni zmedi šli zelo daleč: tistim izkustvenim podatkom, ki jim niso ustrezali ...so celo odrekli pravico do obstoja.”

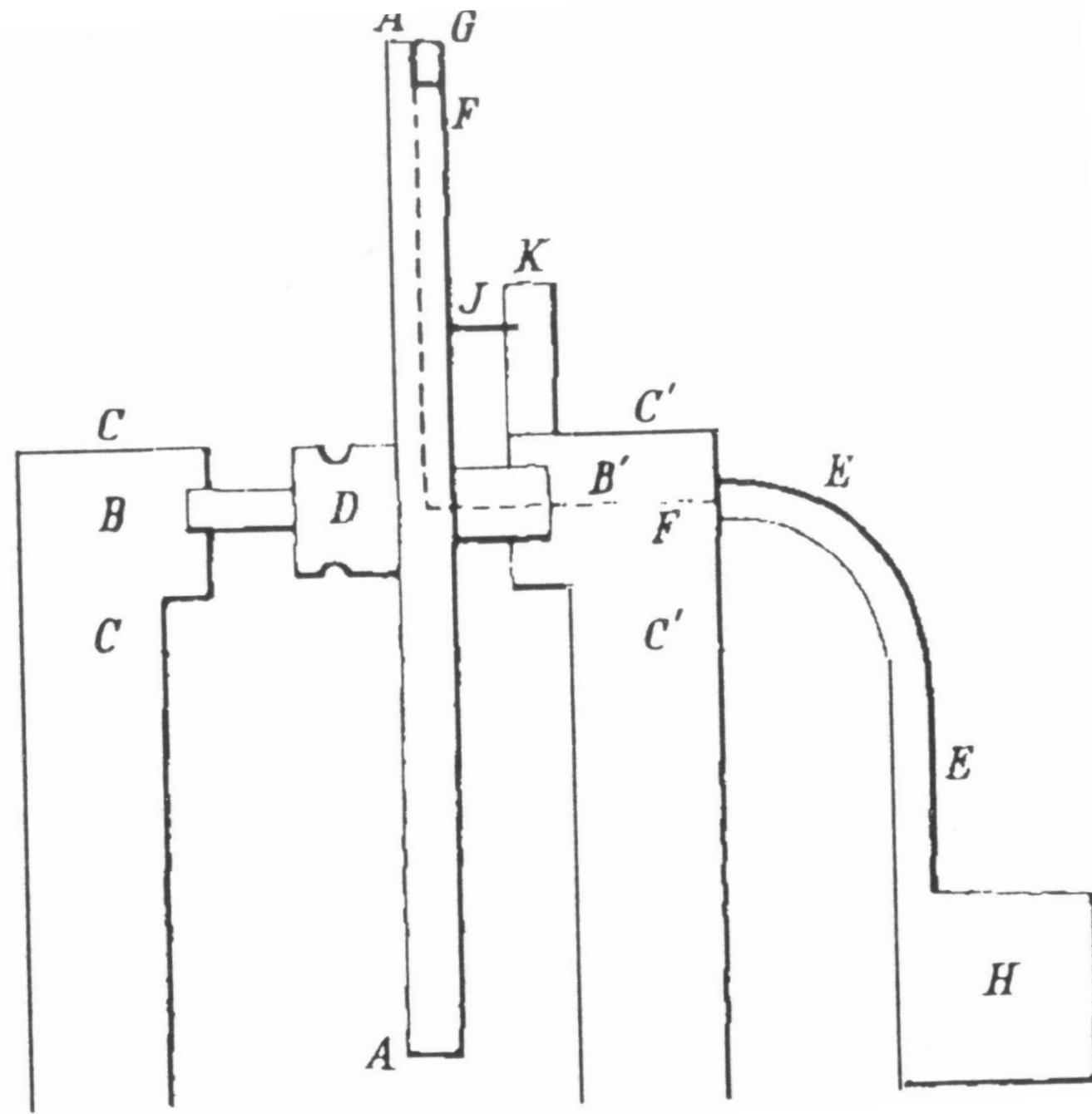


Ernst Mach

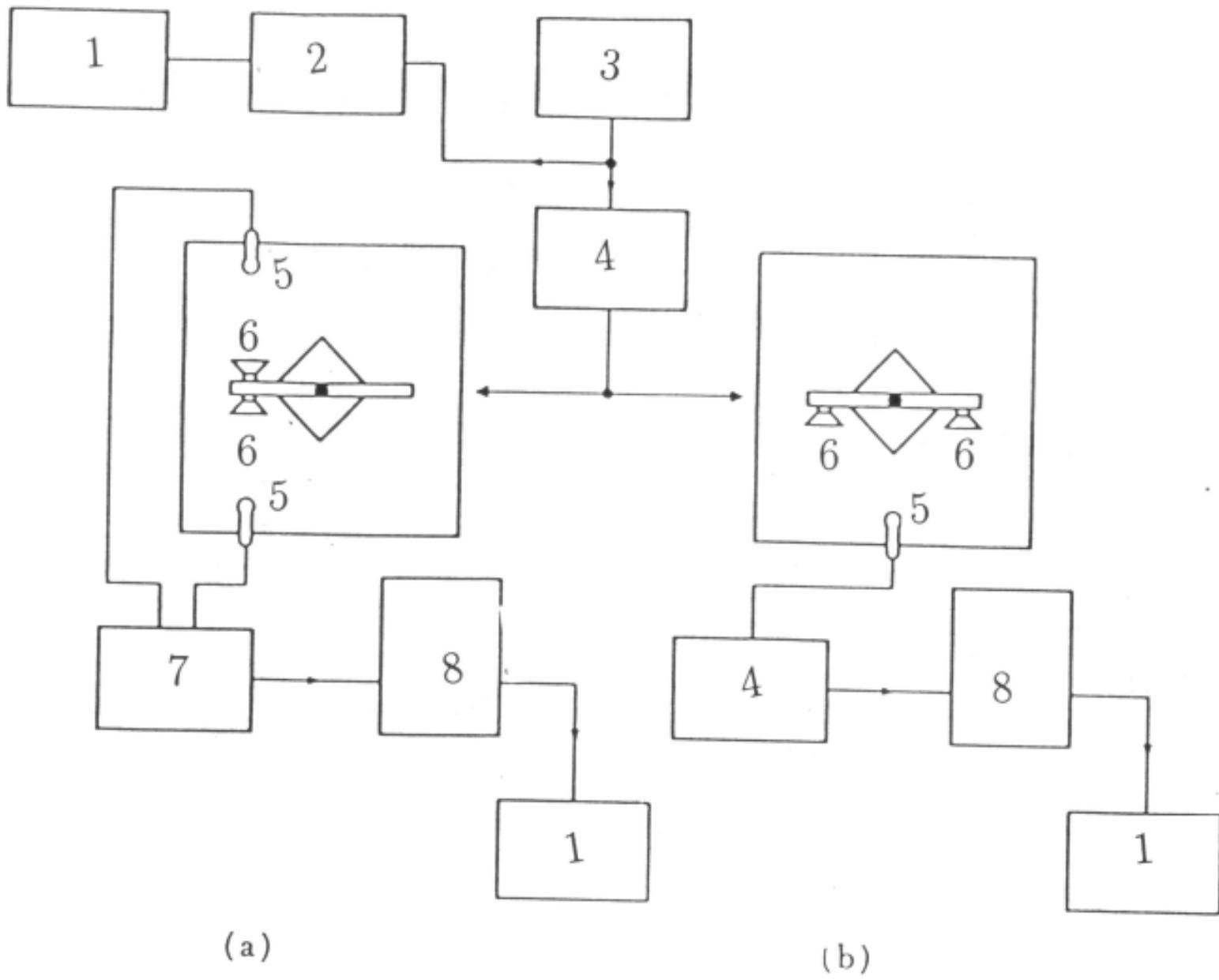
1838-1916

Ernst Mach, rojen 1838 v Brnu, je od 1855 dunajski univerzi študiral matematiko in fiziko. Po doktoratu 1860 je 1864 postal na univerzi v Gradcu profesor za matematiko in 1866 za fiziko. 1867 je prešel na univerzo v Pragi. 1895 je postal profesor za zgodovino in filozofijo induktivnih znanosti na univerzi na Dunaju. Umrl je leta 1916.

Mach je 1852 v Poročilih dunajske akademije objavil članek *O spremembi tona in barve zaradi gibanja*. Z napravo (na naslednji sliki) je poslušalce prepričal o Dopplerjevem pojavi pri zvoku. Y mehom je potiskal zrak v piščali, ki sta se vrteli na 1,8 m dolgi prečki. Poslušalci so v ravnini vrtenja slišali zvok z utripajočo frekvenco, pravokotno na ravno pa zvok z nespremenljivo frekvenco.



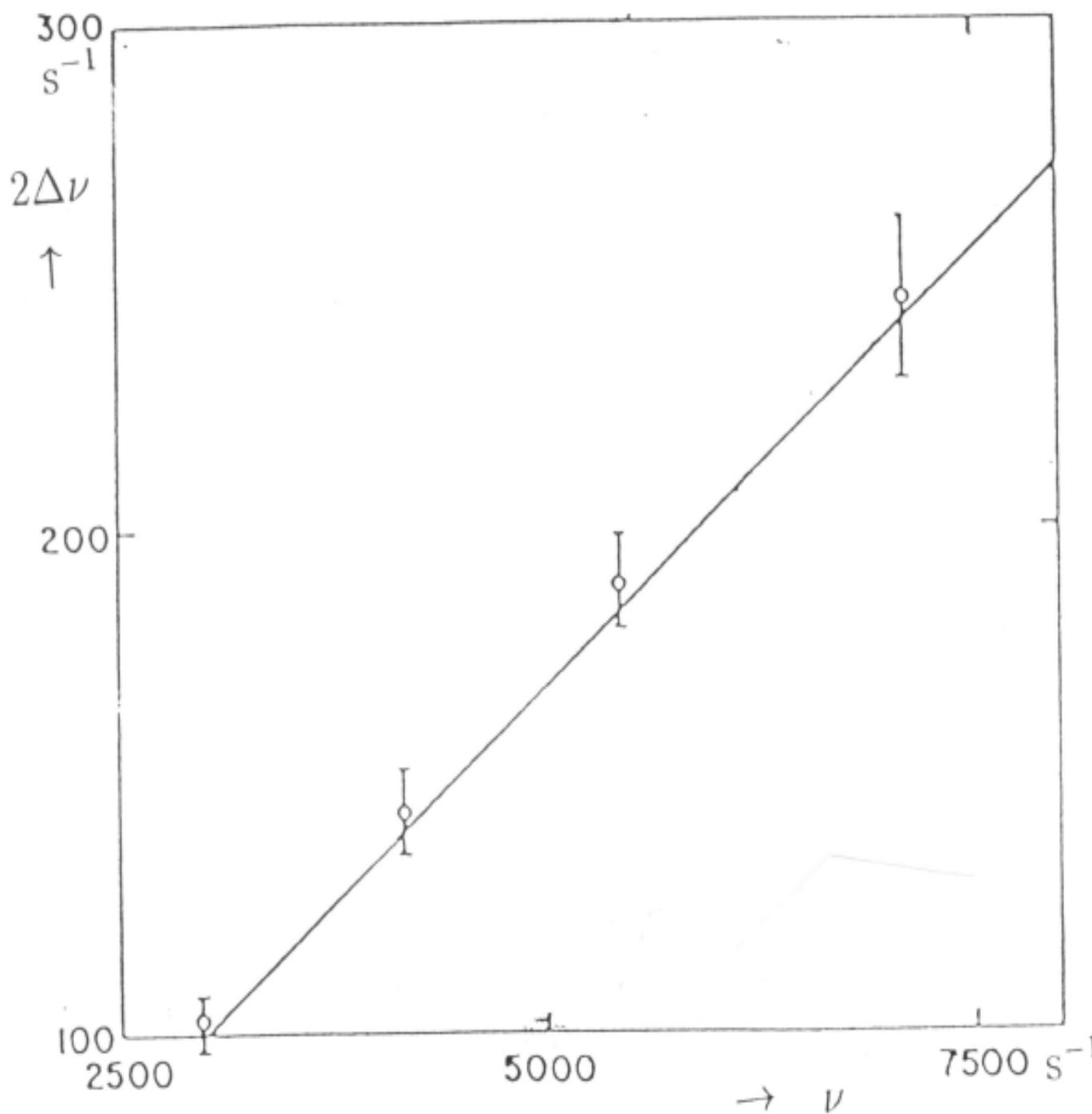
V članku *O sporu med Dopplerjem in Petzvalom o spremembi tona in barve je* Mach pozneje v Zeitschrift fuer Mathematik und Physik leta 1861 prepričljivo pokazal, da Petzvalovo izvajanje ni zajelo Dopplerjevega pojava. Petzval je obravnaval valovanje v gibajoči se tekočini, Doppler pa gibanje izvira glede na sprejemnik. Leta 1878 je Mach sodeloval pri poskusu v Pragi, o katerem je ohranjen neobjavljen zapisnik. Glasbenik s piščaljo se je vozil z vlakom v eno smer, poslušalci pa z enako hitrostjo v nasprotno smer. V drugem primeru so slišali zvok z manjšo frekvenco kot v prvem.



Dopplerjevo enačbo za zvok so kvantitativno preizkusili razmeroma pozno, najbrž šele po uvedbi elektronik. Z opisano napravo so, na primer,

zaznavali utripanje:

$$s = \frac{1}{2} s_0 \cos 2\pi(\nu + \Delta\nu)t +$$
$$\frac{1}{2} s_0 \cos(2\pi(\nu - \Delta\nu)t) =$$
$$s_0 \cos 2\pi\nu t \cos 2\pi\Delta\nu t$$



“Po pravici smemo ta izrek imenovati Dopplerjevo načelo in glede na njegovo pomembnost in plodovitost Dopplerja šteti h klasikom naravoslovja, čeprav se mi zdi, da mu njegova preostala dela, s katerimi je svojo teorijo branil pred številnimi ugovori, ne dajo pravice do tega naziva.”

Hendrik Antoon Lorentz

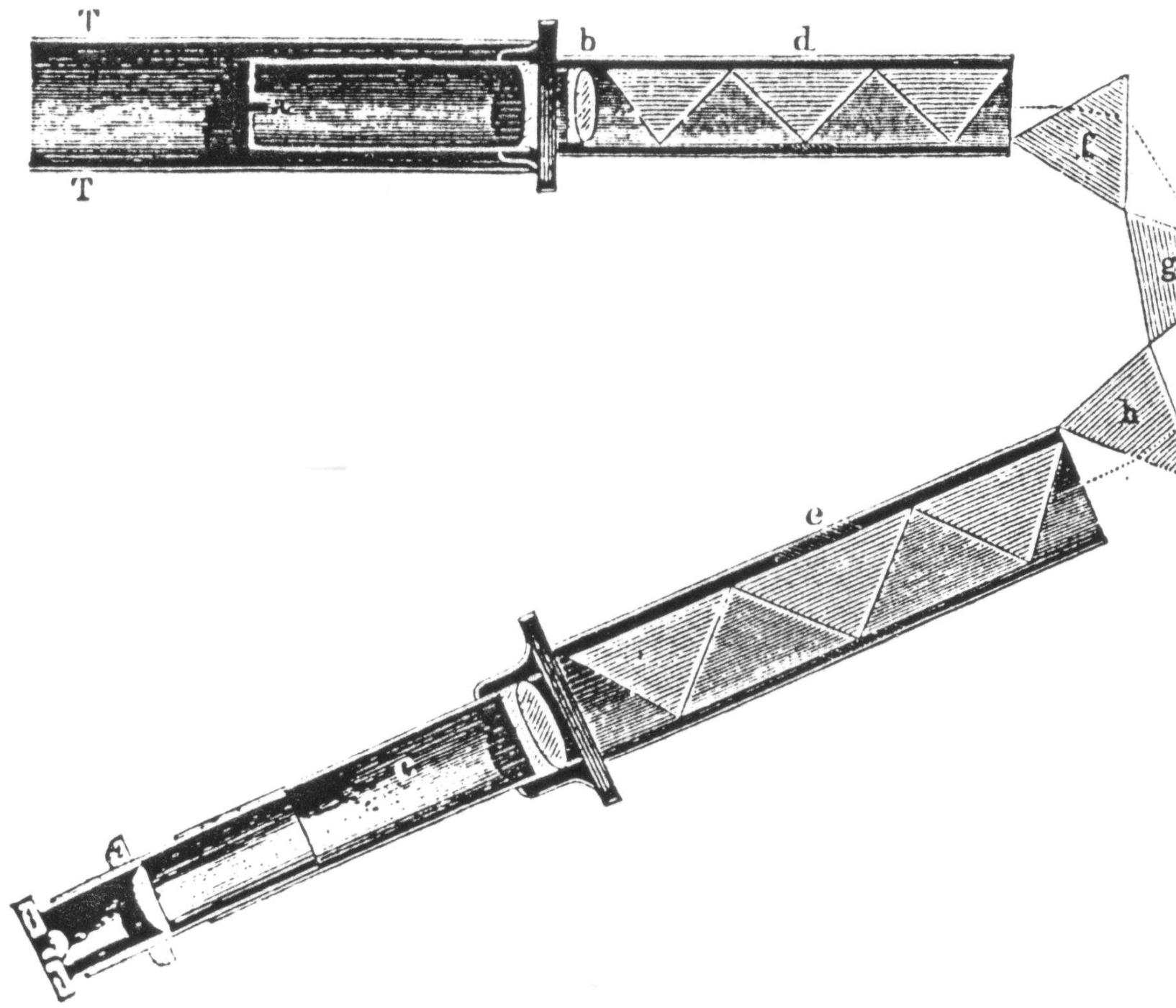
Nadaljnji razvoj

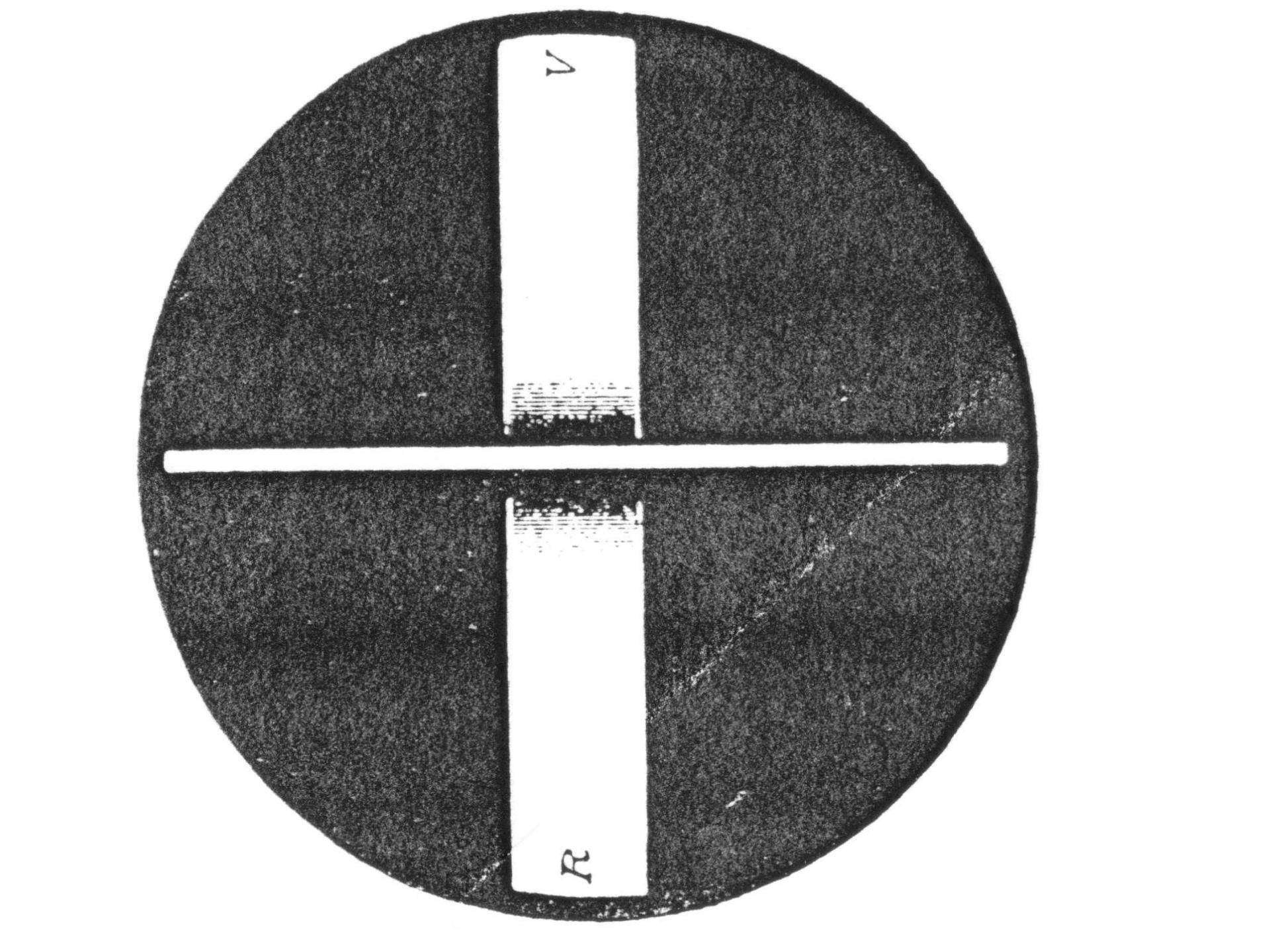
Armand Hippolyte Fizeau je leta 1848 neodvisno od Dopplerja odkril pojav in uvidel, da je treba opazovati premik črte v spektru zvezde.

James Clerk Maxwell je 1865 svetlobo pojasnil kot elektromagnetno valovanje.

William Huggins je sestavil zvezdni spektrograf (na naslednji sliki) in opazoval spektre zvezd. Ugotovil je, da zvezdno snov sestavljajo enaki elementi kot zemeljsko snov.

Leta 1868 naj bi zaznal premik črte v spektri Sirija glede na ustrezeno črto v spektru laboratorijskega svetila. Sirij naj bi se oddaljeval s hitrostjo 47 km/s, pa 35 km/s, pa 29 km/s.





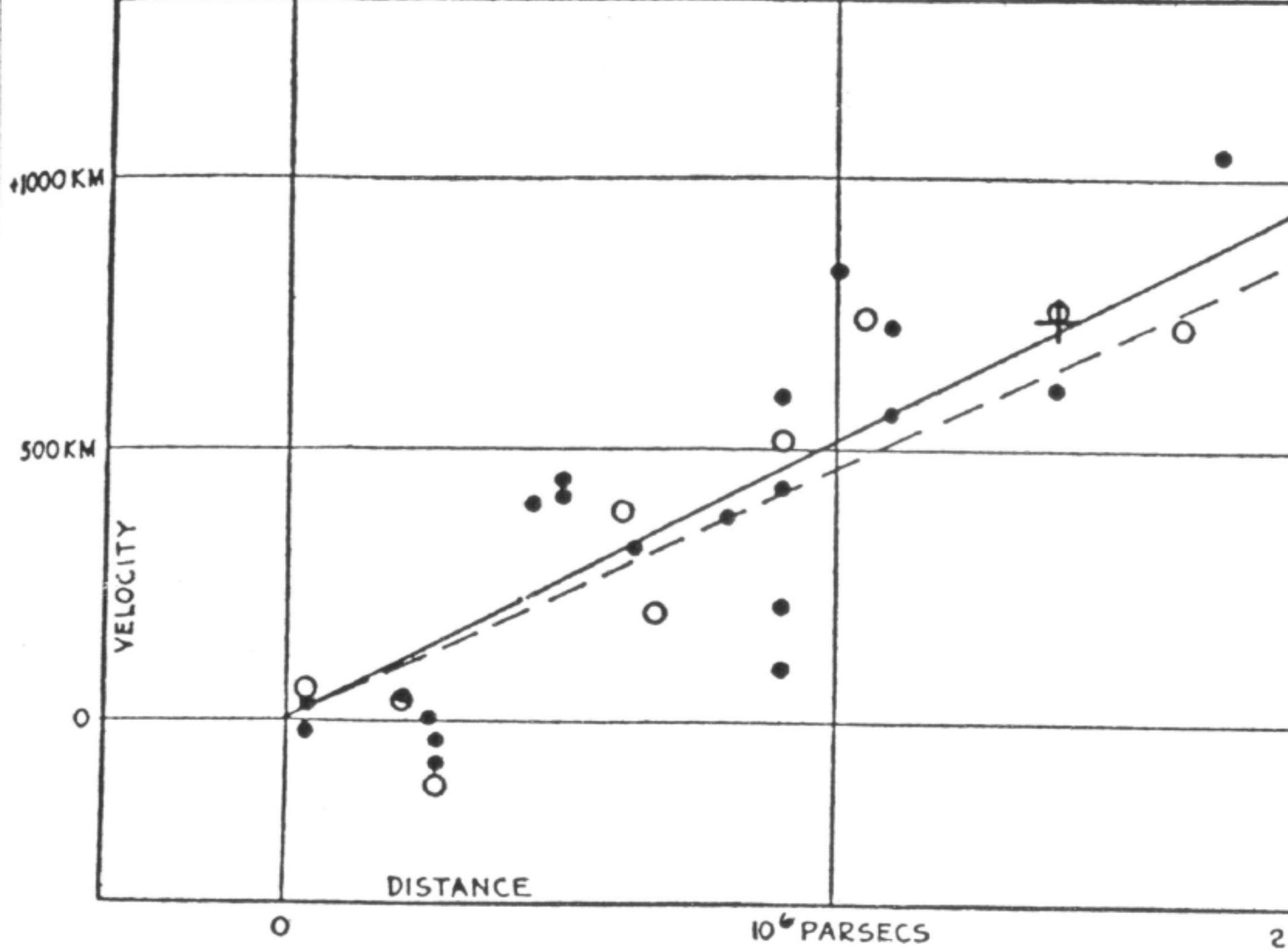
V

R

Z očmi je bilo zelo težko opazovati spektre. Veliko izboljšanje je prinesla fotografija. Po letu 1871 so uporabljali mokri postopek, po letu 1879 pa suhi.

|Že leta 1871 so po Dopplerjevem premiku ugotovili, da se Sonce vrti. Leta 1887 sta Vogel in Julius Scheiner zaznala letni premik spektralnih črt. Hermann Karl Vogel je po 1890 izmeril veliko zvezdnih spektrovin ugotovil veliko dvojnih zvezd.

Leta je Albert Einstein postavil posebno teorijo relativnosti. Konec je bilo skupnega obravnavanja zvoka in elektromagnetnega valovanja.



Širjenje vesolja (Edwin Hubble 1929 na prejšnji sliki
je hitrost oddaljevanja sorazmerna z oddaljenostjo,
Georges Lemaitre je to ugotovil pred Hubblom),

vrtenje galaksij (temna snov)

vrtenje zvezd

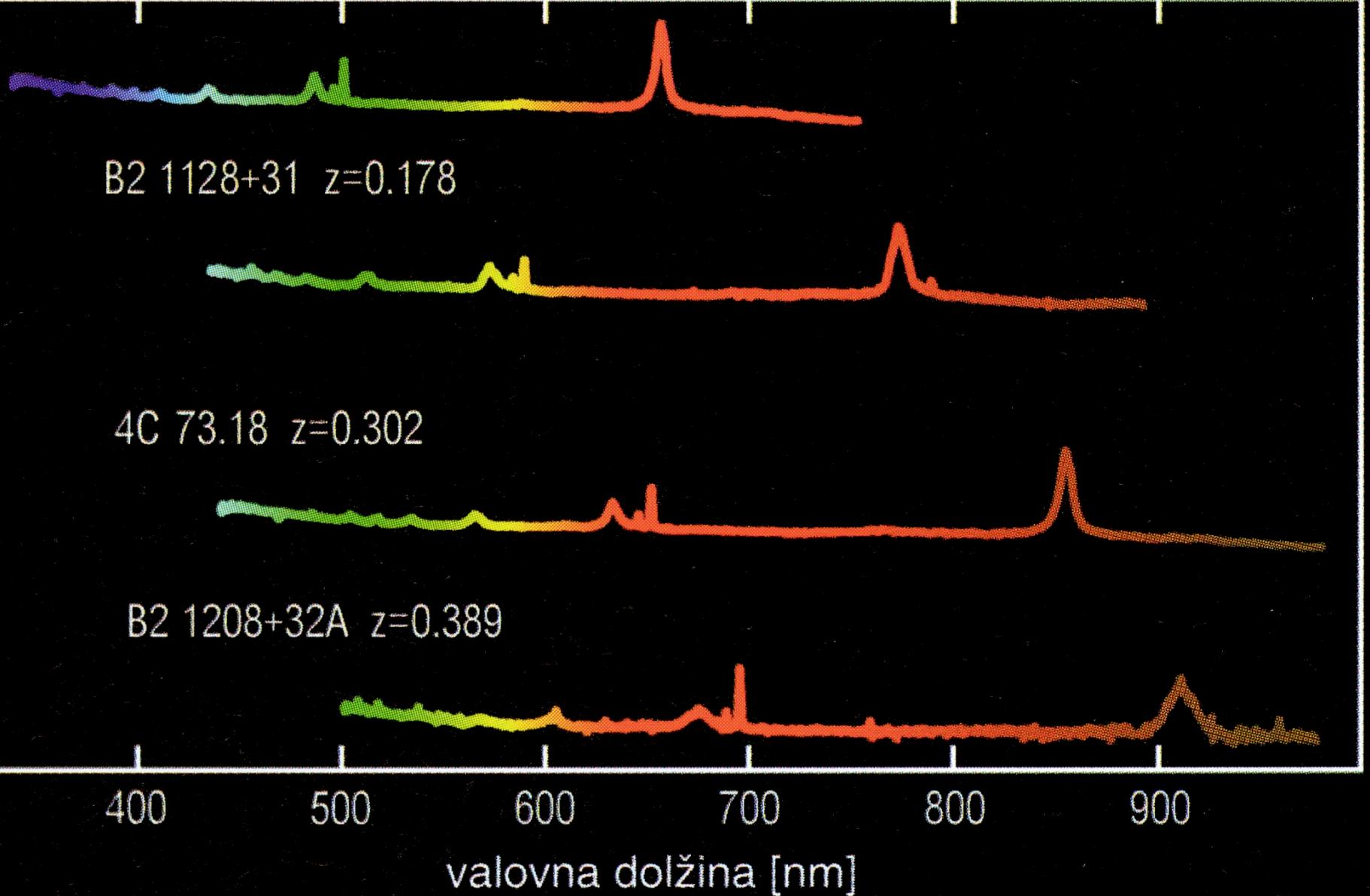
planeti zunaj osončja

Dopplerjev pojav pri kanalskih žarkih (Stark 1905,
Ives-Stilwell 1907...)

Dopplerjeva razširitev spektralnih črt
brezodrivno sevanje

vremenski Dopplerjev radar
cestni radar

Dopplerjev ultrazvok v medicini





Spektri treh kvazarjev, ki se oddaljujejo z različnimi hitrostmi (na prejšnji sliki), kažejo Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja.

Teleskop Hobby-Eberly na MacDonaldovem observatoriju v Fowlkesu v Texasu (na naslednji sliki) ima efektivni premer zrcala 9,2 m. Nepremično zrcalo sestavlja veliko ravnih zrcal. Zgrajen je kolikor mogoče poceni in je namenjen snemanju spektrov. Vstopne zenice treh spektrometrov sledijo gibanju slik treh vesoljskih teles zaradi gibanja Zemlje. Primerjava prejšnje in naslednje slike s Hugginsovim spektrometrom in spektrom prepričljivo pokaže, kako je napredovala meritna tehnika.