

Byl objev Neptunu náhodný?

Vladimír Štefl

U3V Brno

14.10.2025

Osnova

- *Úvod*
- *Titiovo - Bodeovo pravidlo*
- *Urbain Jean Joseph Le Verrier - mládí*
- *Výpočet neznámé planety Le Verrierem*
- *Objev Neptunu Gallem*
- *Porovnání výpočtů Le Verrier x Adams*
- *Šťastná náhoda objevu Neptunu*
- *Ředitel Pařížské hvězdárny*
- *Meteorologie, korespondence*
- *Závěr*

Titiovo - Bodeovo pravidlo

předchůdci: Wolf, Ch. (1679 – 1754)

Kant, I. (1724 – 1804) existuje mezera u planet

Titius, J. D., 1766: Překlad knihy*, umístění poznámky o pravidle
→ Bonnet pro $k = 3 \dots$ „*Skutečně Stvořitel zanechal toto místo prázdné? V žádném případě!*“

- první zmínka o Ceres!?

Bode, J. E., 1772:* * zřejmě na základě dopisování s Titusem

*Bonnet, Ch.: Contemplation de la Nature – Pozorování přírody,
Amsterdam 1764.

* *Bode J. E.. Anleitung zur Kenntniss des gestirnten Himmels –
Příručka ke studiu hvězdné oblohy, Hamburg 1772

Zákonitosti uspořádání planet

Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn

r. 1766 německý matematik a fyzik J. D. Titius

r. 1772 německý matematik a astronom J. E. Bode

Johann Daniel Titius
(1729 -1796)



Johann Elert Bode
(1747 – 1826)



Titiusovo – Bodeovo pravidlo

$$a_k = 0,4 + 0,3 \times 2^k \quad (k = -\infty, 0, 1, 2, \dots)$$

Titiovo - Bodeovo pravidlo

$$a_k = 0,4 + 0,3 \times 2^k \quad (k = -\infty, 0, 1, 2, \dots)$$

	k	a_k	a observed	<i>au</i>
Mercury	$-\infty$	0.4	0.39	
Venus	0	0.7	0.72	
Earth	1	1.0	1.00	
Mars	2	1.6	1.52	
asteroids	3	2.8	2.90	
Jupiter	4	5.2	5.20	
Saturn	5	10.0	9.55	
Uranus	6	19.6	19.20	

Objev Uranu

březen 1781: anglický astronom **W. Herschel (1738 - 1822)**

- objev Uranu pro $k = 6$

T. B. pravidlo $a = 19,6$ au,
reálná velká poloosa $a = 19,2$ au



Ceres, Pallas, Juno, Vesta
považovány za planety ~ 1850

Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811 - 1877)

mládí

narozen 11. března 1811 Saint-Lô, Normandie

otec Louis-Baptiste Le Verrier

matka Marie-Jeanne-Josephine-Paulie
de Baudre

studium

College Saint-Lô, výborný student,
College royal de Caen 1827-1830, přijímací
zkouška na **École polytechnique** *neuspěl*
Mayerův institut v Paříži 1831, matematik
Choquet, cena v národní matematické soutěži,
přijat na **École polytechnique 1831**,
ukončil **1833**,

od 1837 zde vyučoval astronomii,

r. 1837 svatba s Lusilou Marií Clotildou
Choguetovou, tři děti,

od 1846 vedl katedru nebeské mechaniky na
Pařížské univerzitě



Urbain Jean Le Verrier

Le Verrier:

chemik, **astronom**, **matematik**



první článek věnován reakci
fosforu s kyslíkem, experimenty
hoření, tabák, učitel

J. L. Gay-Lussac 1778-1850

inspiroval se nebeskou
mechanikou, studoval Laplaceovy
spisy

zkoumal dlouhodobé poruchy
pohybu planet, Jupiteru, Saturnu,
později Měsíce, odchylky od
keplerovského pohybu,
stabilitu Sluneční soustavy

A stylized, handwritten signature of Urbain Jean Le Verrier in black ink. The signature is fluid and cursive, with a long, sweeping underline that extends to the right.

Nebeská mechanika



Pierre Simon Laplace
(1749 - 1827)
zakladatel **Ecole polytechnique**
1794



*„To co víme je nesrovnatelné ve srovnání s tím,
co nevíme.“*

Le Verrier – zaměstnání



Jean Baptiste Biot
(1774 - 1862)

„Dozvěděl jsem se několik podrobností o M. Le Verrierovi, které nebyly známy i ostatním členům předsednictva. M. Le Verrierovi je 29 let, je ženatý, má dítě a žije pouze ze svého skromného postavení korepetitora na École Polytechnique, je nucen každý den věnovat soukromé výuce část svého času a úsilí, které by jinak tak dobře a s takovým zápalem věnoval zdokonalování teoretické výuky astronomie. Nebylo by barbarstvím nechat ho v současné situaci, aby se zavedl někomu, kdo už je v pokročilém věku a kdo astronomii neprokázal žádnou užitečnou službu a který má tudíž zajištěnou zcela jinou kariéru?“

r. 1841

doporučení nepomohlo...

Urbain Jean Le Verrier

stabilita Sluneční soustavy 1839 - 1841

220

JOURNAL DE MATHÉMATIQUES

SUR LES

VARIATIONS SÉCULAIRES DES ÉLÉMENTS ELLIPTIQUES

DES SEPT PLANÈTES PRINCIPALES :

MERCURE, VÉNUS, LA TERRE, MARS, JUPITER, SATURNE ET URANUS;

PAR M. LE VERRIER [*].

MÉMOIRES PRÉSENTÉS.

MÉCANIQUE CÉLESTE. — *Sur les variations séculaires des orbites des planètes; par M. LEVERRIER.* — Extrait par l'auteur.

(Commissaires, MM. Arago, Savary, Liouville.)

1. L'orbite d'une planète qui circulerait seule autour du Soleil serait une ellipse ayant l'un de ses foyers au centre d'attraction. Cette orbite aurait une forme, une position invariables; et elle serait complètement déterminée par son grand axe, son excentricité, la longitude du périhélie, l'inclinaison de son plan sur un plan de position donnée, et la longitude de son nœud.

La présence de plusieurs planètes autour du Soleil rend la détermination de leurs mouvements beaucoup moins simple. Elles agissent les unes sur les autres, proportionnellement à leurs masses, et en raison inverse des carrés de leurs distances respectives; et par là elles sont sans cesse entraînées hors de l'ellipse qu'elles décriraient si elles n'étaient soumises qu'à l'action du Soleil. On parvient toutefois à représenter facilement leur marche par les considérations suivantes. Admettons qu'à une époque donnée l'action perturbatrice des planètes vienne à cesser sur l'une d'elles; à l'instant elle se mettra en mouvement sur une ellipse dont les éléments différeront en général de ceux de l'ellipse primitive. Il

« L'action perturbatrice que les planètes exercent les unes sur les autres altère incessamment les éléments des orbites elliptiques qu'elles décrivent autour du Soleil. La détermination des variations séculaires qui en résultent offre le plus grand intérêt; elle seule peut fournir les données nécessaires pour calculer avec exactitude les positions des planètes dans le siècle à venir; elle seule peut nous apprendre si notre système réunit quelques conditions de stabilité.

[*] Cet article ne doit être considéré que comme un extrait détaillé du Mémoire que j'ai présenté à l'Académie des Sciences, en septembre 1839, et qui sera bientôt publié en entier dans la *Connaissance des Temps*.

U. J. LeVerrier.: Sur les variations séculaires des orbites des planètes; Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences 9 (1839), p. 372 - 373.

Le Verrier

La détermination des éléments variables des orbites offre encore un intérêt tout particulier, en ce qu'elle seule peut nous permettre de juger si notre système planétaire réunit quelques conditions de stabilité. Malheureusement la question n'est susceptible de solution que par les méthodes d'approximation. On se fonde sur ce que les masses perturbatrices, les excentricités et les inclinaisons respectives des orbites étant fort petites, on peut développer les fonctions perturbatrices en séries ordonnées suivant les puissances et les produits de ces quantités. Ce développement étant admis, et en laissant de côté les *variations périodiques* qui ne font osciller les éléments qu'entre d'étroites limites, on reconnaît que les grands axes sont constants. La démonstration comprend les termes qui dans la *fonction perturbatrice* sont du premier et du second ordre, par rapport aux masses; et elle s'étend à toutes les puissances des excentricités et des inclinaisons. Mais comme elle repose sur

analýza dráhových elementů planet, výpočet poruch

10. Donnons d'abord les éléments de notre système planétaire, tels que l'observation les fournit pour une origine du temps fixée au 1^{er} janvier 1800 :

	MASSES.	EXCENTRICITÉS.	LONGITUDES des périhélies.	INCLINAISONS.	LONGITUDES des nœuds ascend.
MERCURE	$\frac{1}{16597108}$	0,205 616	74° 20' 6"	7° 0' 5",9	45° 57' 9"
VÉNUS.....	$\frac{1}{101118}$	0,006 862	128 43 6	3 23-28,5	74 51 41
LA TERRE.....	$\frac{1}{166184}$	0,016 792	99 30 29	0 0 0,0	0 0 0
MARS.....	$\frac{1}{1410137}$	0,093 217	332 22 51	1 51 6,2	47 59 38
JUPITER.....	$\frac{1}{10473}$	0,048 162	11 7 38	1 18-51,6	98 25 45
SATURNE.....	$\frac{1}{1513}$	0,056 150	89 8 20	2 29 35,9	111 56 7
URANUS.....	$\frac{1}{17414}$	0,046 611	167 30 24	0 46 28,0	72 59 21

hmotnost a dráhové elementy planet

U. J. LeVerrier.: Variations Séculaires des éléments elliptiques des sept planètes. Mercure, Vénus, La Terre...Uranus... ; Journal de Mathématique 5 (1840) , p. 220 - 254.

Le Verrier

CHAPITRE IX. — *Inégalités séculaires des éléments des orbites des huit principales planètes. — Des effets de la précession et de la nutation.*

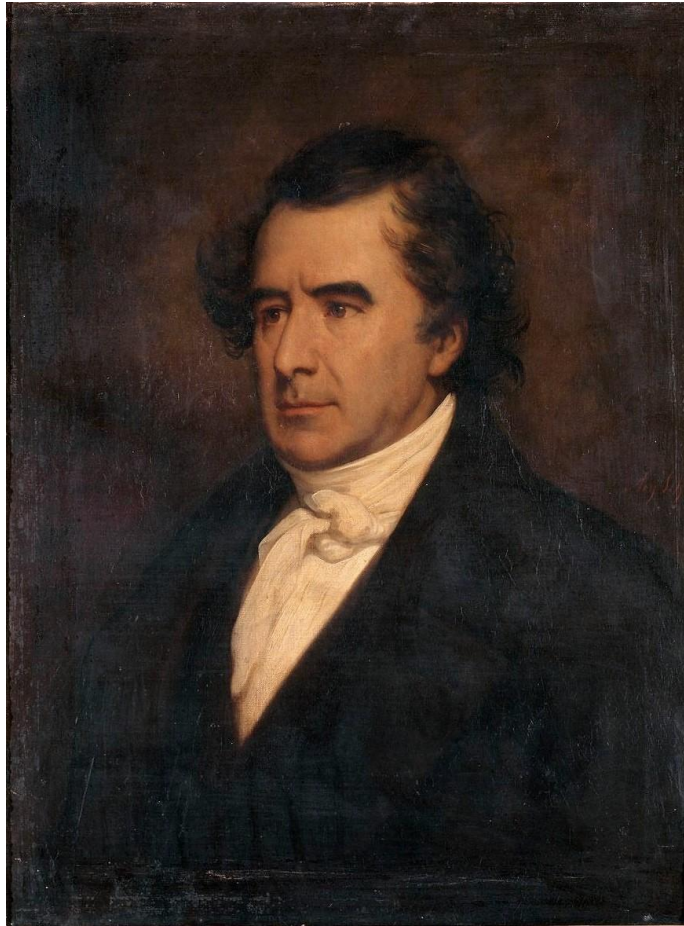
I. — *Des inégalités séculaires, développées suivant les puissances du temps.*

Termes de la fonction perturbatrice qui ne contiennent point le temps explicitement, jusqu'au sixième ordre.....	87
Variations <i>annuelles</i> qui en résultent dans les éléments des orbites.....	89
Application aux huit principales planètes.....	91
Variations annuelles de leurs éléments.....	100
Mouvement de l'écliptique en ayant égard aux termes dépendants des produits des masses.....	103

II. — *Expressions générales des inégalités séculaires, résultant de l'intégration complète des équations différentielles.*

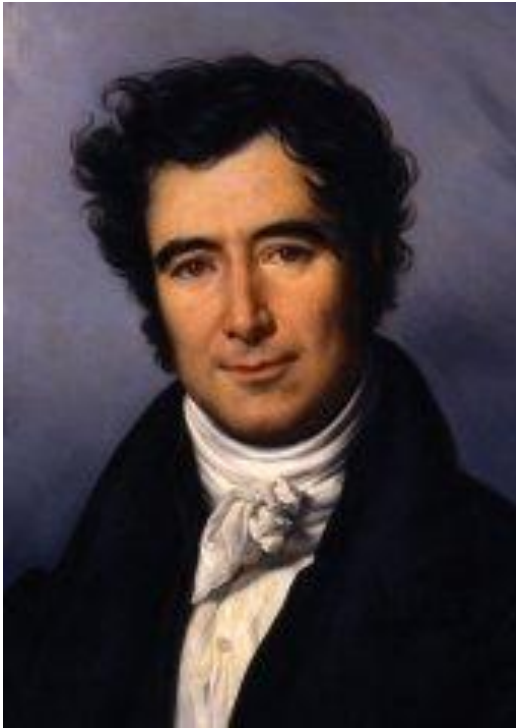
Changement des variables dans les expressions différentielles et dans la fonction perturbatrice.....	105
Variations séculaires des excentricités et des longitudes des périhélies des planètes principales, Neptune excepté, en se bornant aux termes d'ordre inférieur.....	114
Formules numériques.....	147
Conséquences relativement à la stabilité du système.....	148
* Variations séculaires des inclinaisons et des longitudes des nœuds des planètes principales, Neptune excepté, en se bornant aux termes d'ordre inférieur.....	153
Formules numériques.....	162
* Conséquences relativement à la stabilité du système.....	163
* Extension des résultats précédents au cas où l'on considère les termes qui, dans les équations différentielles, sont du troisième ordre par rapport aux excentricités et aux inclinaisons.....	165
* Extension à la planète Neptune.....	168

Dominique François Arago (1786 - 1853)



optika, astronomie, fyzika – člen akademie věd,
ředitel Pařížské hvězdárny 1834-1853

Le Verrier - problém Uranu (Neptun)



Dominique François **Arago** léto 1845 → **Le Verrier** řešení
problému **Uranu**

Problém Uranu



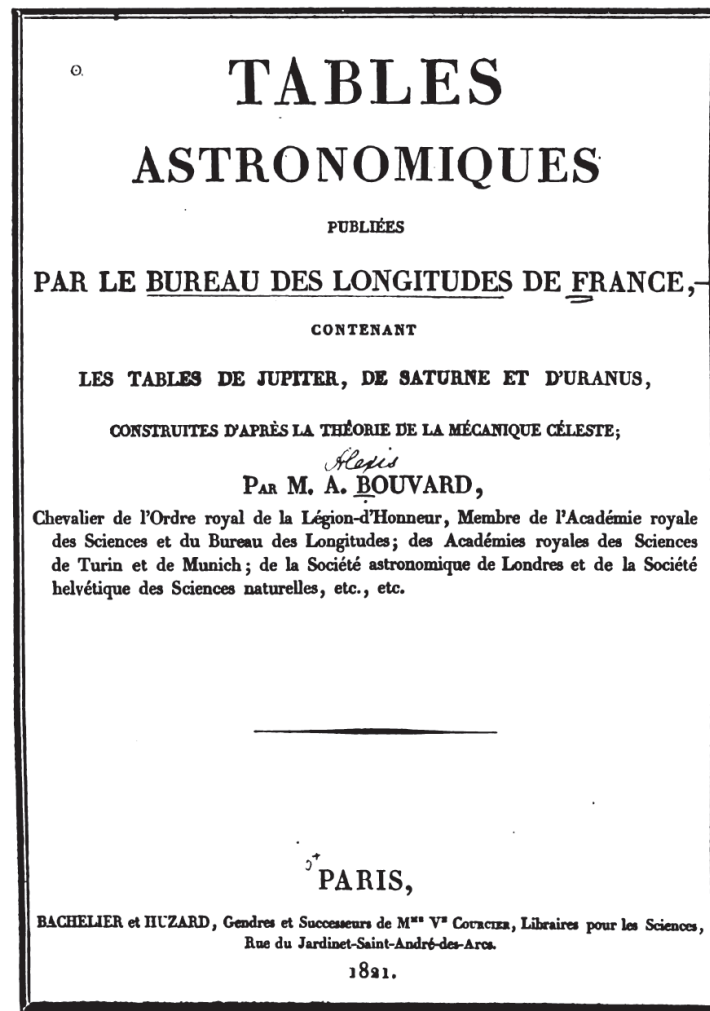
pozorování Uranu: **zrychlování** pohybu v letech 1781 - 1830,
od roku 1831 **zpomalování**

r. 1821 **opozice** Neptunu vzhledem k Uranu

Alexis Bouvard (1767 - 1843)



pozorování Uranu: 19 **starých** -
předobjevových, např. J. Flamsteeda,
J. Bredlyho, T. Mayera, Ch. Lemonniera
nová přesnější, použitá pro teorii pohybu a
výpočet tabulek
přesnost určování poloh planet
18. stol. 5“ - 6“ → 19. stol. 3 “



A. Bouvard: Tables astronomiques publiées par le bureau des longitudes de France, contenant les tables de Jupiter, de Saturne et d'Uranus construites d'après la mécanique céleste. Bachelier&Hanzard, Paris 1821.

Bouvard

stará pozorování → výpočet dráhových elementů → teoretické polohy
→ **velké nepřesnosti**, nevysvětlitelné pozorovacími chybami

nová pozorování → výpočet dráhových elementů → zlepšení teoretické polohy → **nesoulad se starými pozorováními**

teorie Uranu r. 1781 - 1820: 5",

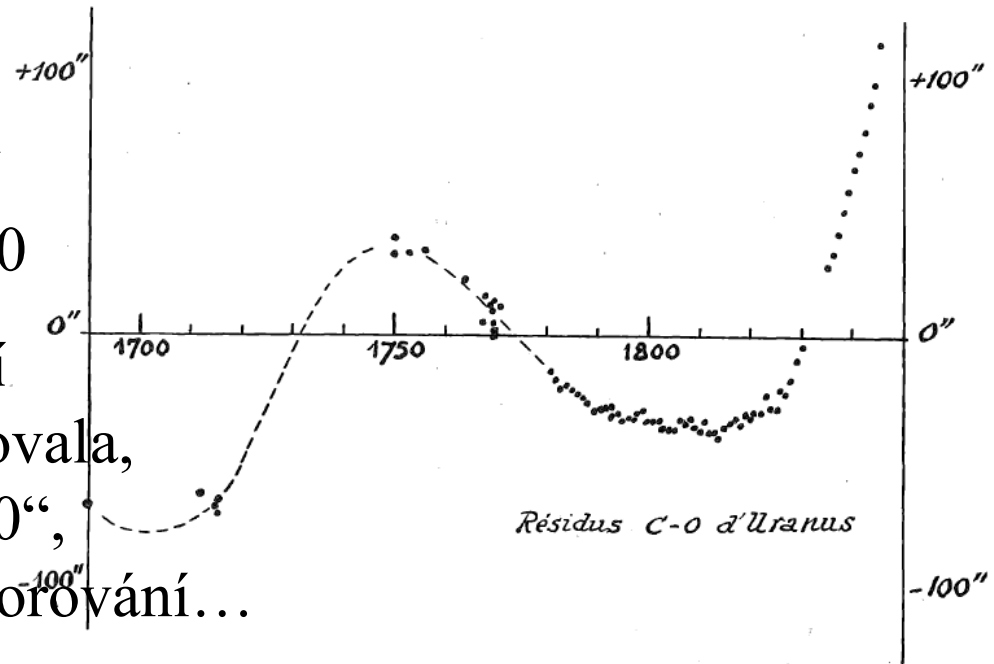
stará pozorování se rozcházela
o (40" - 70") , tedy (8 - 14)krát
převyšovaly chyby pozorovatelů

zrychlování v letech 1781 - 1830

od r. 1832 výrazné **zpomalování**

pohybu Uranu, teorie nevyhovovala,

r. 1840 rozdíl O - C dosahoval 80" ,
100krát převyšoval přesnost pozorování...



A. Danjon: Le centenaire de la découverte de Neptune. Ciel et Terre, **62**
(1946), p. 369 - 383.

Le Verrier: historie 1845 - 1846

- **10. listopad 1845** - poruchy Uranu způsobené Jupiterem a Saturnem neobjasňují nepravidelnosti jeho pohybu
- **1. červen 1846** - vysvětlení → zamítnutí jiných hypotéz, existence vnější planety, její poloha pro 1.1.1847, propočet poruch při $M_N = (1/10\,000 - 1/4700) M_{S1}$
- **31. srpen 1846** - dráhové elementy nové planety, její hmotnost $M_N = 1/9300 M_S$, poloha - hel. délka, jasnost ≈ 8 mag, disk 3“
extrémně rozsáhlé výpočty, rozvinutí teorie poruch, Jupiter, Saturn, **neznámá planeta, propočet jejího poruchového vlivu**, určena její poloha z analýzy dráhového pohybu Uranu, postupně narůstající přesnost řešení → 1°

interpretační problém, řešení nerovností pohybu Uranu

přímý problém, propočet poruchových sil neznámé planety - Neptunu

inverzní problém, určení parametrů Neptunu - hmotnosti, dráh. elem.

Le Verrier - 10 . 9. 1845 první práce

MÉMOIRES PRÉSENTÉS.

ASTRONOMIE. — *Premier Mémoire sur la théorie d'Uranus; par*
M. U.-J. LE VERRIER.

(Commissaires, MM. Arago, Damoiseau, Sturm, Liouville.)

« Il existe, aux confins de notre système planétaire, un astre dont on n'a pu, jusqu'à ce jour, calculer le mouvement avec exactitude. Uranus, dès l'époque de sa découverte, embarrassa les astronomes par la lenteur de son mouvement propre; et ce ne fut pas sans peine qu'on parvint à s'assurer que l'astre, reconnu par Herschel, était une nouvelle planète. Cette première difficulté ayant été surmontée, on arriva, en peu d'années, à connaître les éléments du mouvement elliptique d'Uranus d'une manière passable; d'autant plus qu'on put s'aider d'observations faites longtemps avant la découverte. Plus tard, lorsqu'une série d'observations exactes, embrassant trente à quarante années, eut été faite, lorsque les perturbations dues aux actions de Jupiter et de Saturne eurent été calculées, on reprit la théorie d'Uranus, et l'on dut croire qu'avec ces secours on atteindrait à la perfection désirable. Mais les résultats de ces recherches ont été loin de répondre aux espérances qu'on avait conçues; et chaque jour Uranus s'écarte de plus en plus de la route qui lui est tracée dans les Éphémérides.

*U. J. Le Verrier: Premier Mémoire sur la théorie d'Uranus:. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris **21** (1845), p.1050 - 1055.

Le Verrier - 1. 6. 1846 druhá práce

Výzkum pohybu Uranu

ASTRONOMIE. — *Recherches sur les mouvements d'Uranus ;*
par M. U.-J. LE VERRIER.

« Je me propose, dans le Mémoire dont j'ai l'honneur de présenter un extrait à l'Académie, d'étudier la nature des irrégularités du mouvement d'Uranus; de remonter à leur cause, en cherchant à découvrir, dans la marche qu'elles affectent, la direction et la grandeur de la force qui les produit.

» La théorie d'Uranus préoccupe aujourd'hui les astronomes. Elle a donné lieu à beaucoup d'hypothèses plus ou moins plausibles, mais qui, dénuées de toute considération géométrique, ne pouvaient avoir de valeur réelle. Plusieurs Sociétés ont même proposé cette théorie pour sujet de concours. Je crois donc, en raison de l'importance de la question, devoir reprendre rapidement son histoire: l'Académie jugera mieux du but de mon travail, de la route que j'ai parcourue et des résultats auxquels je suis arrivé.

» On possédait, en 1820, quarante années d'observations méridiennes régulières d'Uranus. La planète avait, en outre, été observée dix-sept fois, depuis 1690 jusqu'en 1771, par Flamsteed, Bradley, Mayer et Lemonnier. Ces astronomes l'avaient notée comme étoile de sixième grandeur. D'un autre côté, les expressions analytiques des perturbations que Jupiter et Saturne produisent sur Uranus, se trouvaient développées dans le tome III de la *Mécanique céleste*. Il était permis d'espérer qu'en s'aidant de toutes ces données, on parviendrait à construire des Tables exactes du mouvement de la planète; c'est ce qu'entreprit M. Bouvard, membre de l'Académie des Sciences. Mais il rencontra des difficultés imprévues.

*U. J. Le Verrier: Recherches sur les mouvements d'Uranus:. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris **22** (1846), p. 907 - 918.

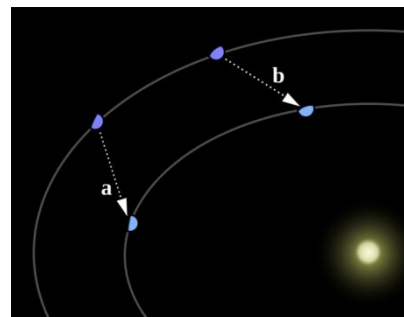
Le Verrier - druhá práce

Srovnání pozorovaných a vypočítaných poloh Uranu -
pozorování nejsou v souladu s teorií

** „Soustředil jsem se na seriózní objasnění rozdílů vypočítaných a pozorovaných poloh Uranu způsobených působící neznámou silou... “*

Vyvrácení hypotéz 1 - 3 nepravidelností pohybu Uranu:

1. Velký měsíc Uranu
2. Kometa
3. Meziplanetární éter
4. **Neznámá planeta.**



Hypotéza o existenci rušící planety → zavedení oprav k dráhovým elementům Uranu, započtení vlivu Neptunu - předběžné výsledky.

U. J. Le Verrier: Recherches sur les mouvements d'Uranus:.. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* **22, (1846), 907 - 918.

Le Verrier - druhá práce

„ Est-il possible que les inégalités d'Uranus soient dues à l'action d'une
» planète, située dans l'écliptique, à une distance moyenne double de celle
» d'Uranus? Et, s'il en est ainsi, où est actuellement située cette planète?
» Quelle est sa masse? Quels sont les éléments de l'orbite qu'elle parcourt? „

Le Verrier v *: „ *Je možné, že nerovnosti Uranu by mohly být způsobeny působením neznámé planety nalézající se na ekliptice v přibližně dvojnásobné vzdálenosti od Slunce než Uran. Jestliže ano, kde se planeta aktuálně nachází? Jaká je její hmotnost? Jaké jsou její dráhové elementy?*“

*U. J. Le Verrier: Recherches sur les mouvements d'Uranus:. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris **22**, (1846), 907 - 918.

Le Verrier - 31.8.1846 třetí práce

ASTRONOMIE. — *Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus. — Détermination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle; par M. U.-J. LE VERRIER.*

O planetě vyvolávající pozorované anomálie v pohybu Uranu. Určení její hmotnosti, dráhy a současné polohy

« J'ai eu l'honneur, dans la séance du 1^{er} juin dernier, de communiquer à l'Académie les principaux résultats du travail que j'ai entrepris sur la théorie d'Uranus. J'ai prouvé qu'il n'était pas possible de représenter les observations de cet astre, dans le système de la gravitation universelle, en supposant qu'il ne fût soumis qu'aux actions réunies du Soleil et des planètes connues. Toutes les anomalies observées s'expliquent, au contraire, dans leurs moindres détails, par l'influence d'une nouvelle planète qui serait située au delà d'Uranus, et qui parcourrait une orbite déterminée.

*U. J. Le Verrier.: Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus: Détermination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris **23** (1846), p. 428 - 438.

Le Verrier - třetí práce, klíčové problémy:

teorie: zahrnutí poruch v délce i ve velikosti rádius vektoru

II. Keplerův zákon $r^2 \frac{d\theta}{dt} = konst.$

Le Verrier: *Čím jsou vyvolány poruchy velikostí rádius vektorů Uranu ?
Jejich proměnnost není způsobena poruchami známých planet.
Analýza pomocí dobového vztahu* .*

$$\frac{d^2}{dt^2}(r\Delta r) + \frac{\mu}{r^3} r\Delta r + 2\int \frac{dR}{dt} + r \frac{dR}{dr} = 0$$

r ... délka rádius vektoru, R ... poruchová funkce, $\mu = n^2 a^3$

Sir George Biddell Airy (1801 - 1892)
královský astronom 1835 - 1881



*G. B. Airy: Mathematical Tracts on the Lunar and Planetary Theories.
Cambridge University Press, Cambridge 1842, p. 67.

John G. Wolbach Library, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics • Provided by the NASA Astrophysics Data System

Le Verrier: Uran - Neptun

Počátek času 1.1.1800 00.00 hod., výchozí - dráhové elementy

Bouvarda pro eliptickou dráhu $a = 19,182\,729$ au.

$n = 4,284\,901^\circ$ stř.den.poh. $e = 0,046\,611$

$i = 0^\circ 46' 28''$

z pozorování **1781 - 1820**

Le Verrier: 1690 - 1845

- kombinoval údaje ze starých a nových pozorování (celkem ≈ 300)
- **nutná zjednodušení při zpracování pozorovacích dat**
- postupná redukce velkého počtu rovnic, seskupení pozorování ve zvolených časových intervalech, v závěru výpočtu řešení celkem 26 rovnic pro $12 \rightarrow 8 + 1$ neznámých dráhových elementů obou planet, volba 40 různých číselných hodnot - varianty výpočtů

E. A. Grebenikov, J. A. Rjabov: Poiski i otkrytija planet. Nauka, Moskva 1984.

Le Verrier: Uran - Neptun

kinematika pohybu Uranu, nepravidelnosti v délce, ve velikosti rádius vektoru → stanovení příčiny

hledání synodické oběžné doby Neptunu a opozice v soustavě Uran - Neptun, podstatné pro dynamiku

$$T_{Nsyn} = \frac{1}{\left(\frac{1}{T_{U_{sid}}} + \frac{1}{T_{N_{sid}}} \right)} = 171,4 roku$$

opozice Uran - Neptun r. 1821, → poruchové působení maximální, Uran ($e = 0,047$) v období 1820 → **1840** se blížil k aféliu → délka rádius vektoru narůstala

Uran: $a = 19 \text{ au.}$, $T = 84 \text{ roků}$,
 $M_U = 8,7 \cdot 10^{25} \text{ kg}$

Neptun: $a = 30 \text{ au.}$, $T = 165 \text{ roků}$,
 $M_N = 1,0 \cdot 10^{26} \text{ kg}$

Le Verrier: využití Titiova – Bodeova vztahu

Box 2.1 The Law of Titius-Bode

In 1772, the German astronomer Johann Daniel Dietz, called Titius, showed that it is possible to approximately represent the distances of planets from the Sun by the following empirical relation:

$$a = 0.4 + 0.32^{n-1},$$

where a is the semi-major axis of the orbit expressed in astronomical units (the semi-major axis of the Earth's orbit) and n represents the consecutive integers. At first unnoticed, this relation was later publicized by the German astronomer Johann Elert Bode. Here is how it represents the distances of the planets from the Sun.

	Mercury	Venus	Earth	Mars		Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
n	∞	1	2	3	4	5	6	7	8
a (calc.)	0.40	0.70	1.00	1.60	2.80	5.20	10.0	19.6	38.8
a (real)	0.39	0.72	1.00	1.52	–	5.20	9.55	19.2	30.1

Le Verrier - třetí práce, porovnání C - O

(437)

Comparaison de la nouvelle théorie avec les observations.

DATES des observations.	EXCÈS des positions calculées sur les positions observées.	DATES des observations.	EXCÈS des positions calculées sur les positions observées.
1781-1782	+ 2",3	1813-1815	- 0",9
1783-1784	+ 0,1	1816-1817	+ 0,4
1785-1788	- 1,2	1818-1820	+ 0,4
1789-1790	- 3,4	1821-1823	+ 0,9
1791-1792	+ 0,3	1824-1827	- 5,4
1793-1794	- 0,5	1828-1830	- 2,2
1795-1797	- 1,0	1835	- 0,8
1797-1801	+ 0,9	1835-1836	+ 2,3
1802-1804	+ 0,8	1837-1838	+ 2,5
1804-1806	+ 0,8	1839-1840	+ 2,2
1807-1808	+ 2,1	1841-1842	- 0,2
1808-1810	+ 0,8	1842-1844	- 0,4
1811-1813	- 0,5	1844-1845	- 0,3

*U. J. Le Verrier.: Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus: détermination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris **23** (1846), p. 437.

Le Verrier - třetí práce dráhové elementy

Demi-grand axe de l'orbite.....	36,154
Durée de la révolution sidérale.....	217 ^{ans} ,387
Excentricité.....	0,107.61
Longitude du périhélie.....	284°45'
Longitude moyenne au 1 ^{er} janvier 1847.	318.47
Masse.....	$\frac{1}{9300}$

„ On peut voir qu'en supposant, dans mon premier travail, que le grand axe de l'orbite de la planète cherchée était double de celui de l'orbite d'Uranus, j'avais fait une hypothèse très-voisine de la vérité.

„ On déduit, des éléments qui précèdent, la position suivante de la planète au 1^{er} janvier 1847 :

Longitude héliocentrique vraie..	326°32'
Distance au Soleil.....	33,06

*U. J. Le Verrier.: Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus: détermination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris **23** (1846), p. 432.

Dopis Le Verrier → Galle, 18.9.1846

À Monsieur J. G. Galle,
Astronome à l'Observatoire Royal de Berlin à Berlin.

Paris, le 18 Septembre 1846.

Monsieur,—J'ai lu avec beaucoup d'intérêt et d'attention la réduction des observations de Roemer, dont vous avez bien voulu m'envoyer un exemplaire. La parfaite lucidité de vos explications, la complète rigueur des résultats que vous nous donnez, sont au niveau de ce que nous devons attendre d'un aussi habile astronome. Plus tard, Monsieur, je vous demanderai la permission de revenir sur plusieurs points qui m'ont intéressé, et en particulier sur les observations de Mercure qui y sont renfermées. Aujourd'hui je voudrais obtenir de l'infatigable observateur qu'il voulait bien consacrer quelques instants à l'examen d'une région du ciel, où il peut rester une Planète à découvrir. C'est la théorie d'Uranus qui m'a conduit à ce résultat. Il va paraître un extrait de mes recherches dans les *Astronomische Nachrichten*. J'aurai donc pu, Monsieur, me dispenser de vous en écrire, si je n'avais eu à remplir le devoir de vous remercier pour l'intéressant ouvrage que vous m'avez adressé.

Vous verrez, Monsieur, que je démontre qu'on ne peut satisfaire aux observations d'Uranus qu'en introduisant l'action d'une nouvelle Planète, jusqu'ici inconnue; et ce qui est remarquable, il n'y a dans l'écliptique qu'une seule position qui puisse être attribuée à cette Planète perturbatrice. Voici les éléments de l'orbite que j'assigne à cet astre :

Demi-grand axe de l'orbite	36.154
Durée de la révolution sidérale	217.387 ans
Excentricité	0.10761
Longitude du Perihelie	284° 45'
Longitude moyenne 1 ^{er} Janvier, 1847,	318° 47'
Masse	1/9300
Longitude Héliocentrique vraie au 1 ^{er} Jan. 1847	326° 32'
Distance au Soleil	33.06

La position actuelle de cet astre montre que nous sommes actuellement, et que nous serons encore, pendant plusieurs mois, dans des conditions favorables pour le découvrir.

Dopis Le Verrier → Galle

*Pane, dnes bych rád vymohl od neúnavného pozorovatele, aby laskavě věnoval několik okamžiků zkoumání určité oblasti oblohy, kde může býti nalezena jedna planeta. K tomuto výsledku mne přivedla teorie Uranu. Výtah z mých výzkumů vyjde v nejbližší době v **Astronomische Nachrichten**.... Uvidíte, vážený pane, že dokazují, že nelze pozorováním Uranu vyhověti matematicky jinak, než zavedením vlivu nové planety, až dosud neznámé. Zajímavé je, že v ekliptice je pouze jedno místo, na kterém může být tato rušící planeta. Tu jsou elementy dráhy, které jsem přisoudil tomuto tělesu:*

<i>velká poloosa dráhy</i>	<i>36, 154 au.</i>
<i>siderická oběžná doba</i>	<i>217,387 roků</i>
<i>excentricita</i>	<i>0,10761</i>
<i>délka perihélia</i>	<i>284° 45'</i>
<i>střední délka 1. ledna 1847</i>	<i>318° 47'</i>
<i>hmotnost</i>	<i>1/9300</i>
<i>pravá heliocentrická délka 1. ledna 1847</i>	<i>326° 32'</i>
<i>vzdálenost od Slunce</i>	<i>33,06 a.u.</i>

Dopis Le Verrier → Galle

Nynější poloha tělesa ukazuje, že máme a ještě několik měsíců budeme mít příznivé podmínky k jeho objevení.

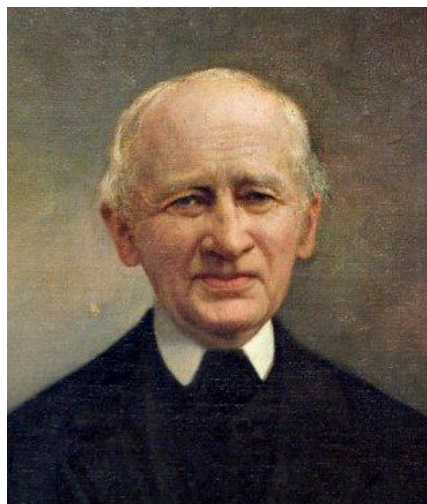
Mimoto můžeme z velikosti jeho hmotnosti usouditi, že velikost jeho zdánlivého průměru je větší než 3“ . Je to takový průměr, že může být rozlišen v dobrých dalekohledech od neskutečného průměru hvězd, který vzniká následkem různých vad čoček.

Přijměte, vážený pane, ujištění mé velké úcty.

Váš oddaný služebník

U.J. Le Verrier

J. G. Galle (1812 - 1910) + L. H. d'Arrest (1822 - 1875)



z dráhových výpočtů Le Verriera → souřadnice neznámé
planety $\alpha = 327^{\circ} 27'$ $\delta = - 13^{\circ} 24'$

pozorování „objektu“:

1. rychlý pohyb na pozadí hvězd
2. pozorovaný disk $2''$ - $3''$

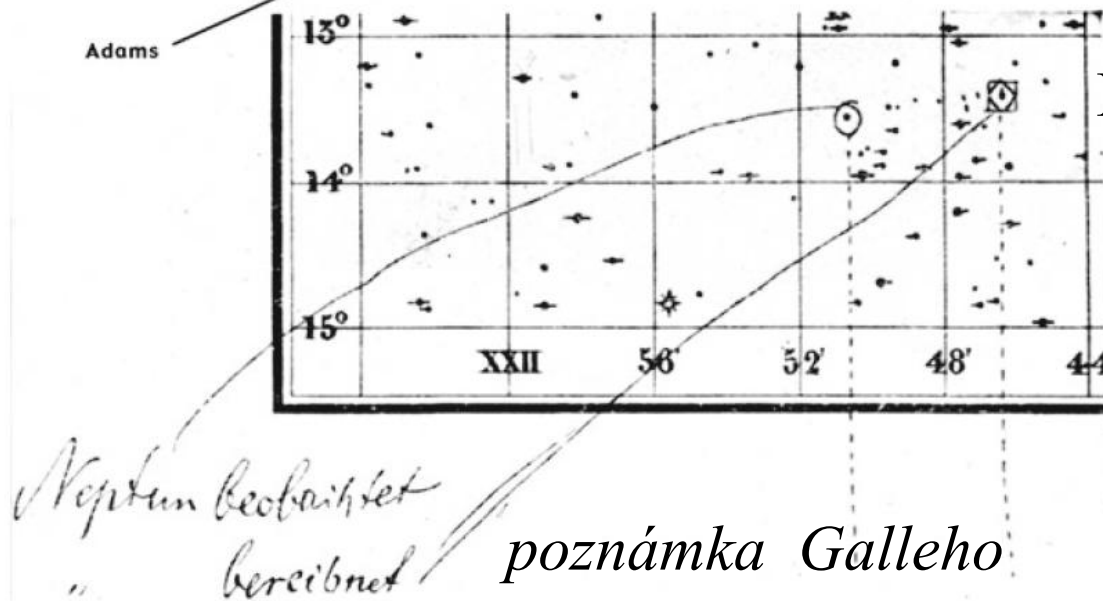
**nalezení Neptunu -
šťastná náhoda ?**

3. mapy K. Bremikera (1804 - 1877)

J. G. Galle, H. L. d'Arrest: nalezení Neptuna 23/24. 9. 1846

Adams - $2\frac{1}{2}^\circ$

rozhraní Vodnáře – Kozoroha

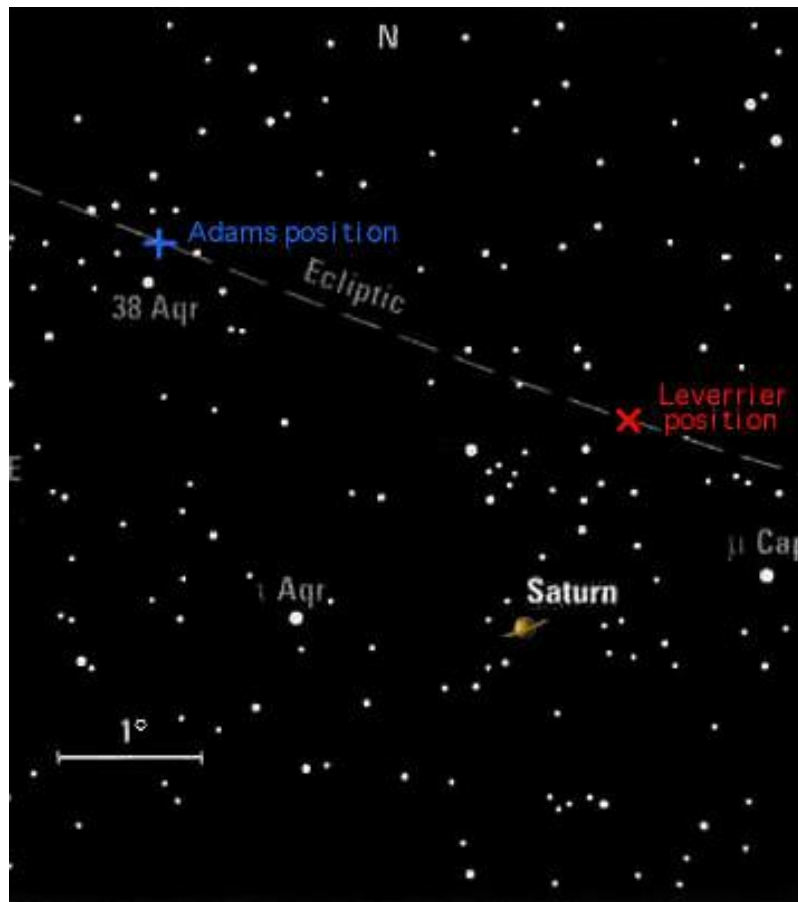


Le Verrier - 1°

A fragment of Bremiker's celestial map on which a German hand (Galle's?) has plotted the position of Neptune predicted by Le Verrier (*Neptun bereibnet*) and the actual position (*Neptun beobachtet*). The position predicted by Adams is also indicated



Nalezení Neptunu



vypočítaná poloha Neptunu **Adams**, **Le Verrier**

Dopis Galleho → Le Verrierovi

Berlin, le 23 Sept. 1846

Monsieur,

La planète, dont vous avez signalé la position, réellement existe.
Le même jour, où j'ai reçu votre lettre, je trouvais une étoile de 8^{me} grandeur,
qui n'était pas inscrite dans l'excellente carte Pora XXI (destinée par M.
le Dr Bremiker) de la collection de cartes célestes publiée par l'Académie
Royale de Berlin. L'observatoire du jour suivant décida que c'était la planète cherchée.
Nous l'avons comparée, M^{rs} Encke en main, par la grande lunette de Fraunhofer
avec une étoile de 9^{me} grandeur (α) de la Zone 119. 21^h 50^m 31^s 00 - 13° 30' 9" 19
et nous avons trouvé :

Ceups moy. de Berlin
Sept. 23. 12^h 0^m 14^s 5,6 Plan. = (α) + 21' 21",8 en R
= (α) + 1. 36,8 en Declin.

Pane,

„planeta, jejíž polohu jste mi ukázal **skutečně existuje**. V ten den, kdy jsem obdržel Váš dopis, jsem objevil hvězdu 8 mag, nezachycenou na výborné mapě (sestavené dr. Bremikerem) z hvězdného atlasu Berlínské akademie věd. Pozorování prováděná následující noc potvrdila, že jde o hledanou planetu. Já a pan Encke, jsme pozorovali velkým fraunhoferovským refraktorem a určili jsme polohu planety ve vztahu k srovnávací hvězdě...”

Porovnání výpočtů Le Verrier → současnost

Table 2.1 Values of principal elements of the orbit of Neptune

Value	Le Verrier	Actual value
Semi-major axis of orbit (a.u.) ^a	36.154	30.0690
Sidereal period of revolution (years)	217.387	163.723
Eccentricity	0.10761	0.008586
Mass (solar masses)	1/9,300	1/19,424
Mass (earth masses)	36	17.14

^aThe astronomical unit (a.u.) is equal to the semi-major axis of the Earth's orbit, i.e. $1.496 \cdot 10^8$ km

Neptun: $a = 30$ au, $T = 164$ roků, $M_N = 1,0 \cdot 10^{26}$ kg

nepřesná velikost velké poloosy a → tudíž i velikosti oběžné doby T

a , e nepřesné - příliš slabé poruchové působení, částečně

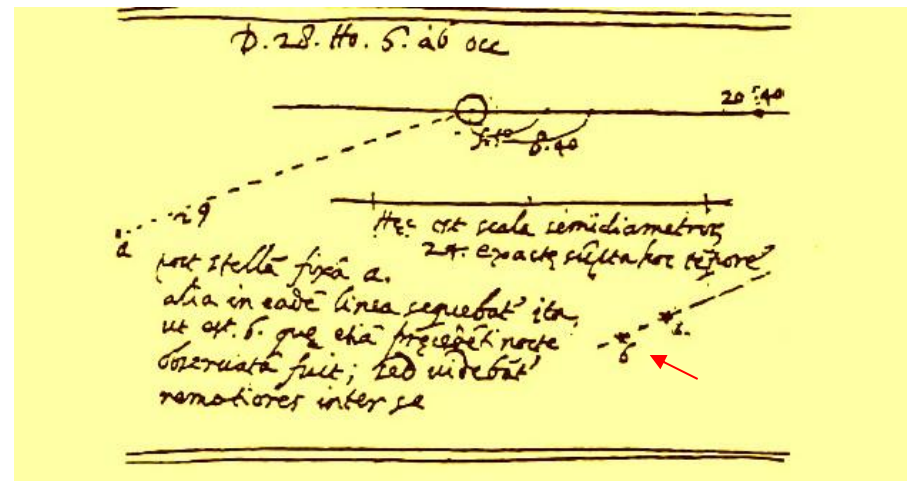
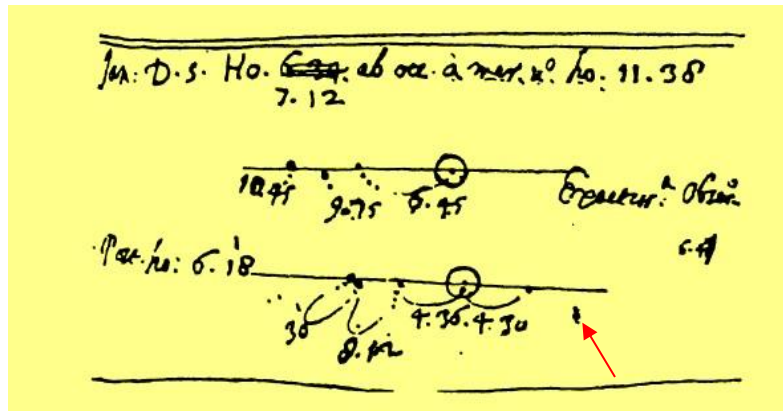
kompenzováno reálně větší hmotností Neptunu stanovenou po nalezení měsíce Tritonu Lassellem (1799 - 1880) 10. října 1846

nalezení Neptunu šťastná náhoda ?

Galileo Galilei (1564 - 1642)

předobjevová pozorování Neptunu

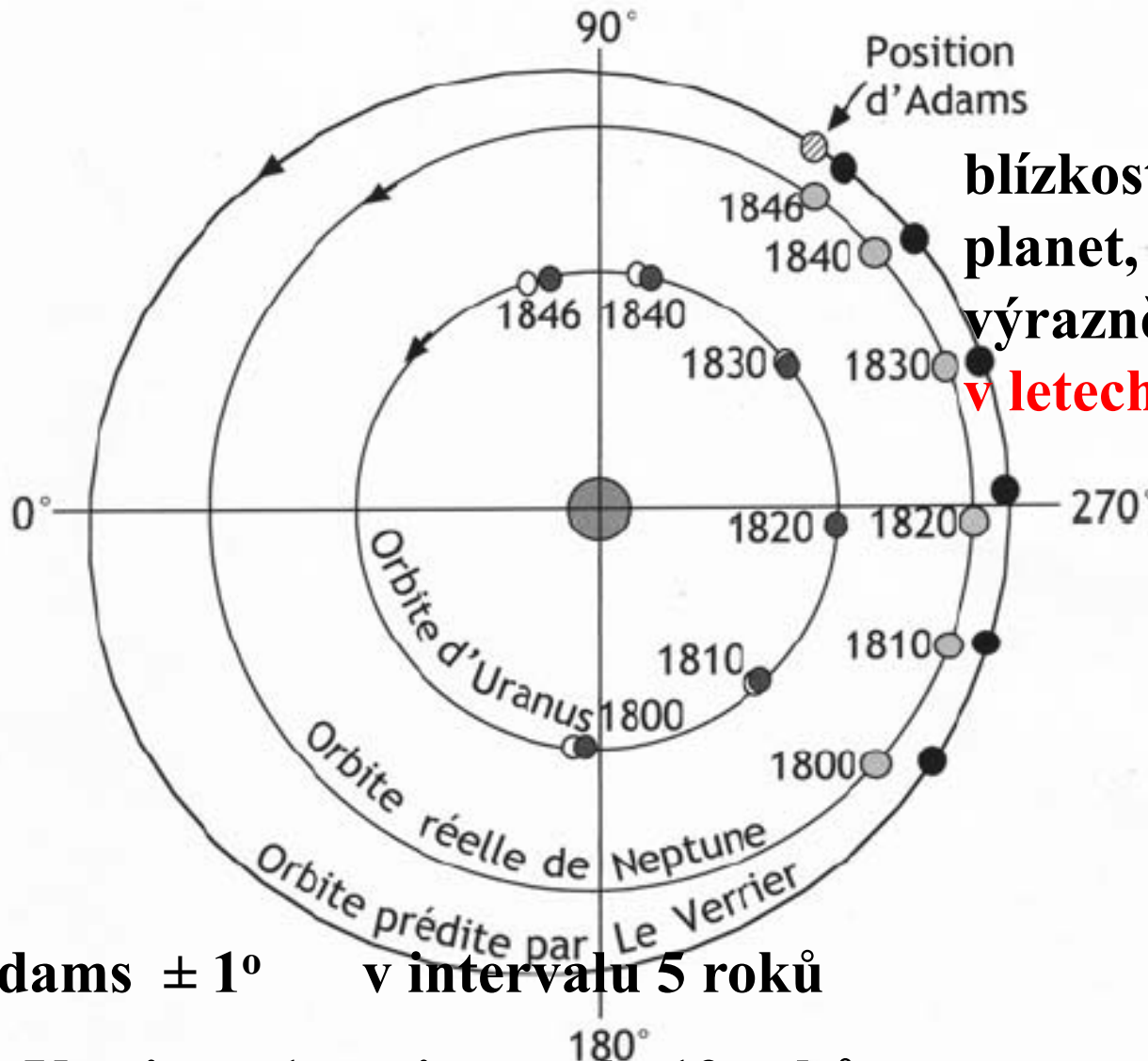
pozorovací deník: 28. ledna 1613: „za hvězdou *a* následuje další označená *b*, která byla pozorována rovněž předcházející noci, ale tehdy se zdály být dále od sebe...“



6.1.1613 pozorovací deník

Ch. Kowal, O, Drake: Galileo's observations of Neptune. Nature **287** (1980), p. 311 - 313.

Porovnání výpočtů Adams x Le Verrier



blížkost drah obou
planet, poruchy
výraznější, **souhlas**
v letech 1830 - 50

přesnost: Adams $\pm 1^\circ$ v intervalu 5 roků

Le Verrier $\pm 1^\circ$ v intervalu 12 roků

Poruchové působení Neptunu na Uran

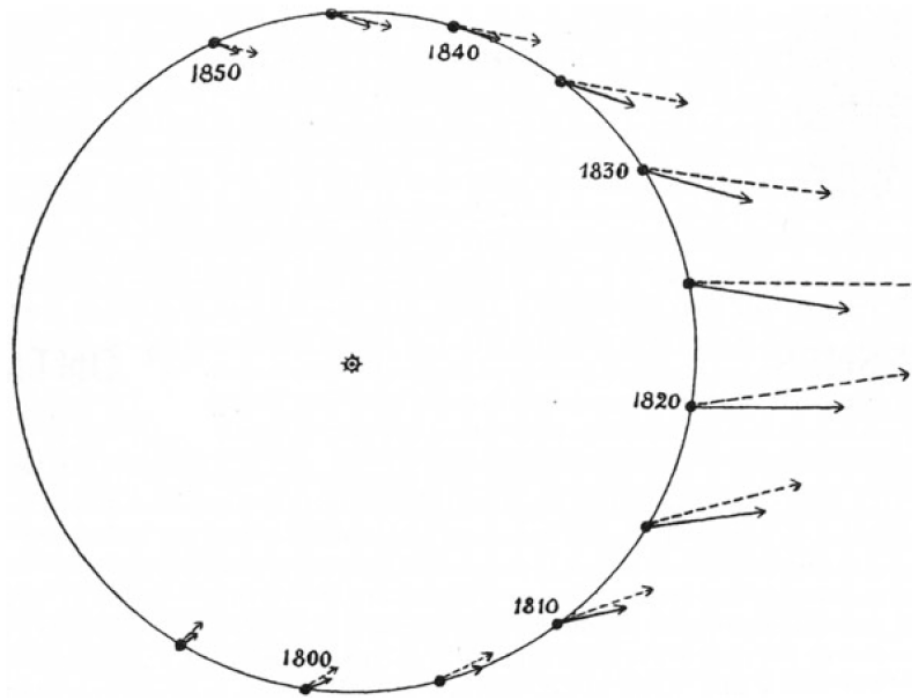
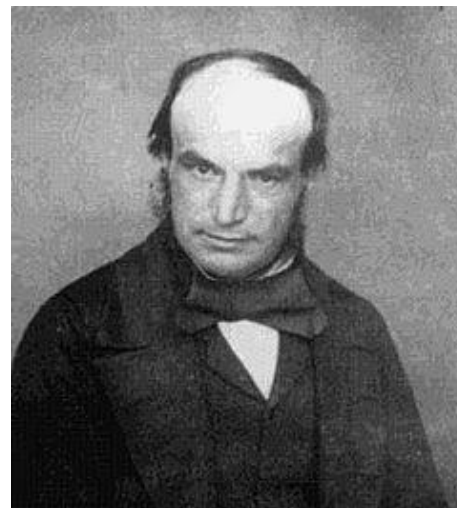


Fig. 2.14 Comparison of the perturbing force exerted on Uranus by Neptune at different epochs (full arrows) and by the hypothetical planet of Le Verrier (dashed arrows). On the whole, the direction of the perturbing force is approximately correct (although the date of conjunction of Neptune with Uranus is too late by $1\frac{1}{2}$ years). However, the intensity of the perturbing force is too large (From Danjon [*Ciel et Terre* 62 (1946) pp. 369–383, Fig. 4])

**nalezení Neptunu -
šťastná náhoda ?**

**směry a velikosti poruchových sil Le Verrierem vypočítaných - - - - -
blízké reálným ----- , do roku 1800 nevýrazné**

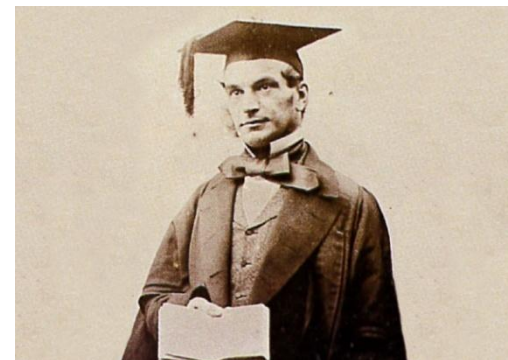
Le Verrier x John Couch Adams



Orbital Elements	LeVerrier	Adams	Neptune
Semi-major Axis (A.U.)	36.15	37.25	30.07
Eccentricity	0.1076	0.1206	0.0086
Longitude of Perihelion	284° 45'	299° 11'	44°
Mass of sun/Mass of Neptune	9300	6666	19300
True Longitude (at time of discovery)	326° 0'	329° 27'	326° 57'

John Couch Adams 1819-1892

problém Uranu řešil od 1841, výpočty z 20 pozorování 1780-1840, výsledky odevzdal v září 1845, určení hmotnosti, dráhových elementů planety, souřadnice, závěry nepublikoval



Sir George Biddell Airy 1801 - 1892,
ředitel observatoře v Greenwich
královský astronom 1835 - 1881



James Challis 1803 - 1882,
ředitel observatoře v Cambridge,
Adams odevzdal polohu planety
k 30. září 1845



C - O, Le Verrier a J. C. Adams

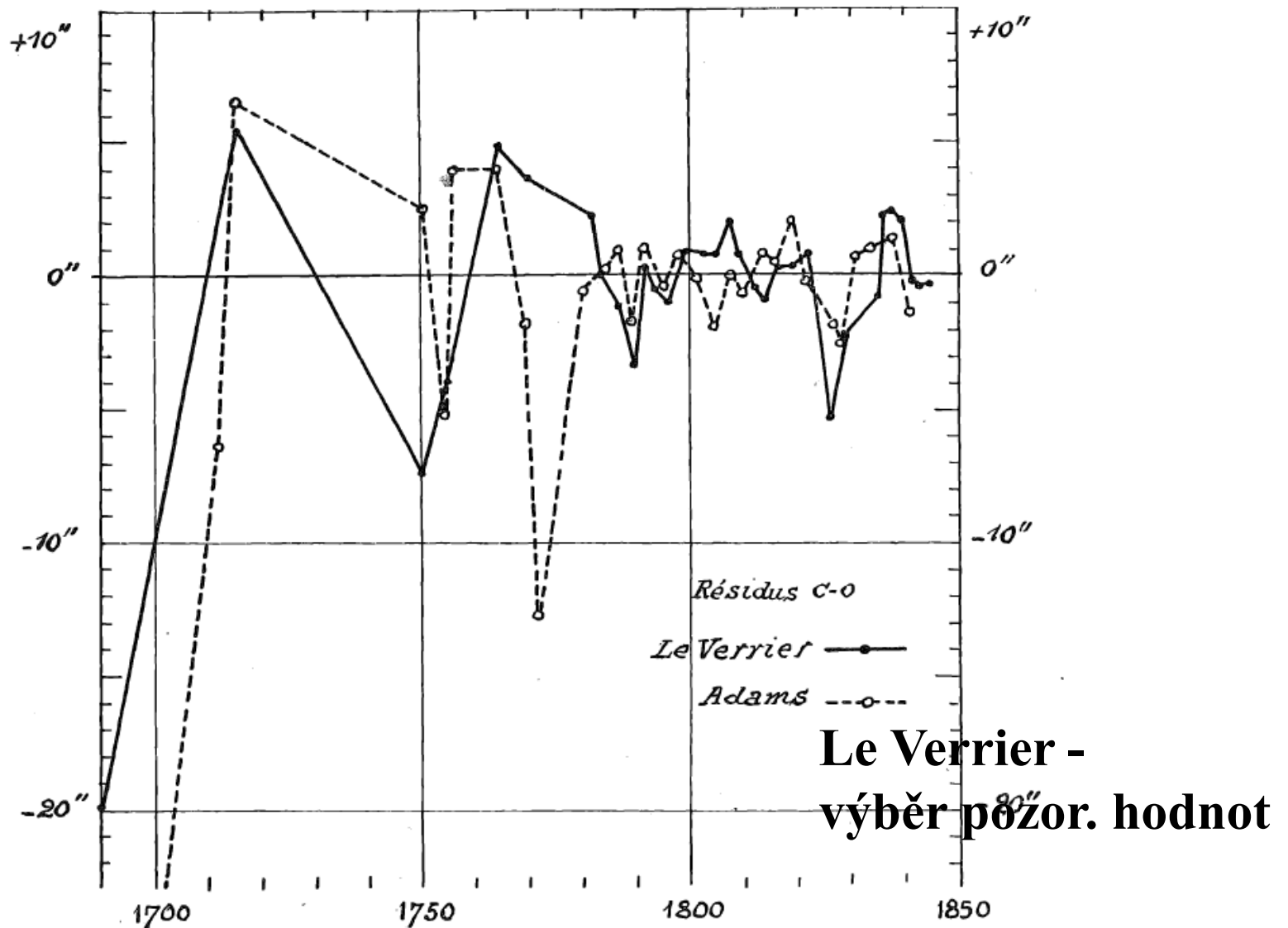


FIG. 2. — Ecart entre les longitudes calculées et les longitudes observées d'Uranus, compte tenu des perturbations causées par la planète troublante hypothétique.

G. B. Airy-Le Verrier, zvací dopis do Anglie, 1847

I understood from you that you were
likely to visit England in June, probably
to attend the meeting of the British Association
(at which, ~~as~~ as Colonel Sabine informed me,
you were expected). In that case, I would
suggest that you should come to Greenwich some-
time earlier: probably before the end of May,
and at any rate before the first Saturday of June.
(when the annual visitation of the R. Observatory
takes place). If you will give me notice of
the route which you take, I will give you
instructions as to the best way of coming to Greenwich.



I am, my dear Sir,

Faithfully yours

G. B. Airy



Le Verrier r. 1846 - podrobný výklad

SUR LES MOUVEMENTS

789-
RECHERCHES

sur

LES MOUVEMENTS

de

LA PLANÈTE HERSCHEL,

PAR U.-J. LE VERRIER.



PARIS,

BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

Du Bureau des Longitudes et de l'École royale Polytechnique.

QUAI DES AUGUSTINS, 55.

1846



DE LA PLANÈTE HERSCHEL,

(DITE URANUS)*

tzv. Uran

PAR U.-J. LE VERRIER.

1. Je me propose, dans ce Travail, d'étudier la nature des irrégularités du mouvement d'Uranus; de remonter à leur cause, en cherchant à découvrir, dans la marche qu'elles affectent, la direction et la grandeur de la force qui les produit. La théorie d'Uranus préoccupe aujourd'hui les astronomes. Elle a déjà donné lieu à plusieurs hypothèses, qui étaient sans valeur scientifique; car elles ne se fondaient sur aucun calcul rigoureux. Quelques détails historiques feront mieux connaître la difficulté que j'avais à résoudre.

On possédait, en 1820, quarante années d'observations méridiennes régulières d'Uranus. La planète avait, en outre, été observée dix-neuf fois, depuis 1690 jusqu'en 1771, par Flamsteed, Bradley, Mayer et Lemonnier. Ces astronomes l'avaient notée comme étoile de sixième grandeur. D'un autre côté, les expressions analytiques des perturbations que Jupiter et Saturne produisent sur Uranus, se trouvaient développées dans le tome III de la *Mécanique céleste*. Il était permis d'espérer qu'en s'aidant de toutes ces données, on parviendrait à construire des Tables exactes du mouvement de la planète; c'est ce qu'entreprit M. Bouvard, membre de l'Académie des Sciences. Mais il rencontra des difficultés imprévues.

U. J. Le Verrier: Recherches sur les mouvements de la planète Herschel, (dite Uranus). Bachelier, Paris 1846.

Le Verrier r. 1846 - kapitoly



PREMIÈRE PARTIE.

PERTURBATIONS DU MOUVEMENT ELLIPTIQUE D'URANUS, DUES
AUX ACTIONS DE SATURNE ET DE JUPITER.

- * Poruchy eliptického pohybu Uranu vyvolané působením Saturna a Jupitera

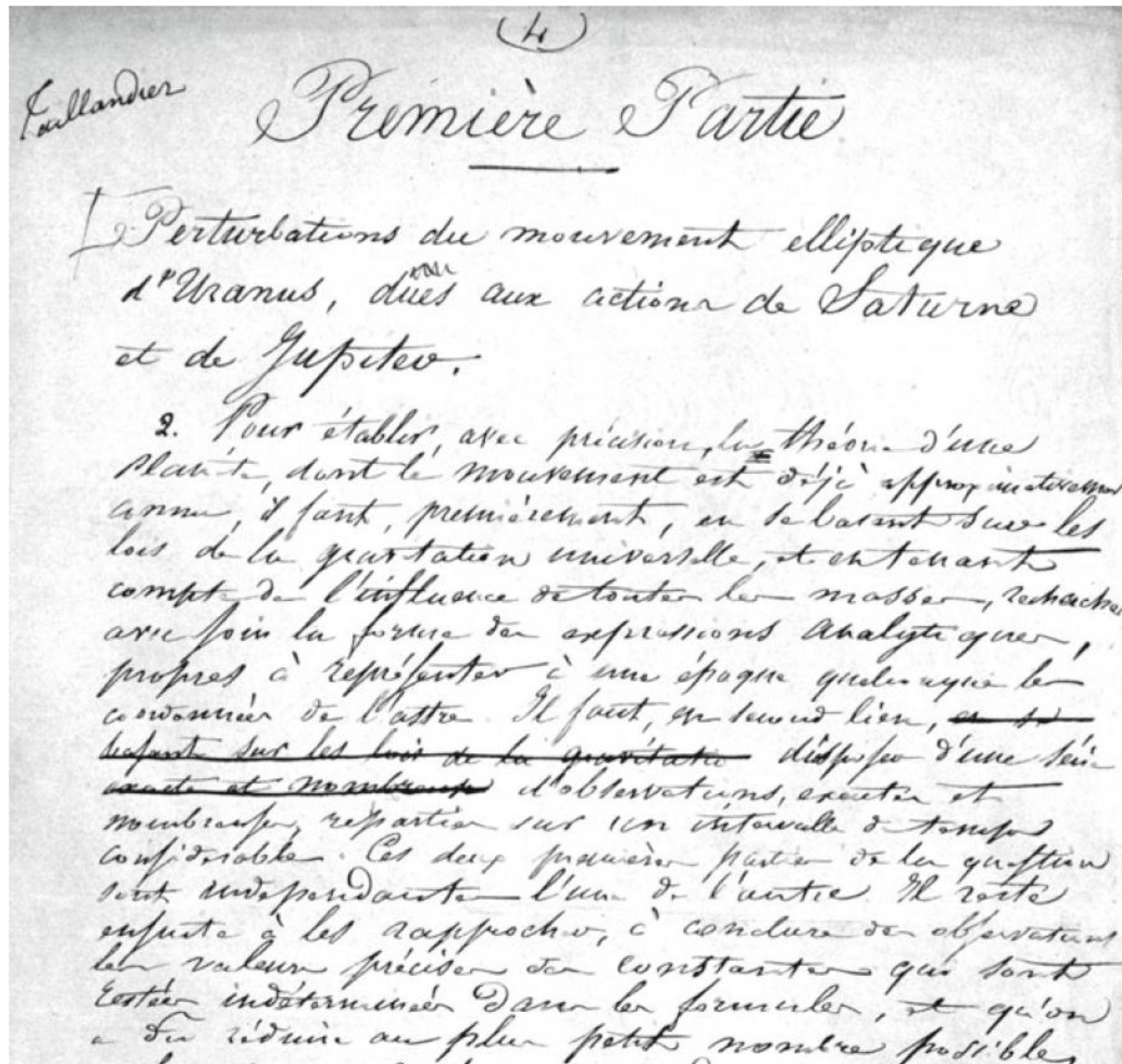
DEUXIÈME PARTIE.

COMPARAISON DE LA THÉORIE PRÉCÉDENTE AVEC LES
OBSERVATIONS.

Srovnání teorie s předchozími pozorováními

Le Verrier - 1846

rukopis - poruchové působení Saturnu a Jupiteru na Uran



Le Verrier - 1846

poruchové působení Saturnu a Jupiteru na Uran

Soit $n = 4^{\text{h}} 7610$ le moyen mov. $^{\circ}$ annuel d'Uranus. On aura en grade:

$$n' = n \left\{ 0,51 + \frac{d}{100} \right\}^{\frac{3}{2}}$$

$$= n (0,51)^{\frac{3}{2}} + \frac{3}{200} (0,51)^{\frac{1}{2}} d + \frac{3}{40000} (0,51)^{-\frac{1}{2}} d^2$$

ou bien

$$n' = 1^{\text{h}} 7340 + 0^{\text{h}} 05100 d + 0^{\text{h}} 000250 d^2$$

pour $d = 1$ fournit $n' = 1^{\text{h}} 785$ et pour $d = 3$ fournit $n' = 1^{\text{h}} 8892$; nombre qui suit aux qu'on trouve directement pour $n (0,51)^{\frac{3}{2}}$ et $n (0,51)^{\frac{3}{2}}$.

D'où on déduit l'inégalité:

$$\delta v = m' (20'' 24 + 1'' 81 d + 0'' 088 d^2) \sin \left\{ 87^{\circ} 22' - 3^{\circ} 0270 t + 0^{\circ} 05100 d t + 0^{\circ} 000250 d^2 t + \delta \varepsilon' \right\}$$

Développant le sinus par la formule:

$$\sin(x+k) = \sin x + (0,015708) k \cos x - \frac{(0,015708)^2 k^2}{2} \sin x$$

l'inégalité. Derrière on représente par l'unit. $\delta \varepsilon' = 10^4 = 4'$, pour abréger il faut en replace $1'$ par 10^4 .

Le Verrier r. 1846 – kapitoly

TROISIÈME PARTIE.

LES ANOMALIES OBSERVÉES DANS LE MOUVEMENT D'URANUS
PEUVENT ÊTRE EXPLIQUÉES PAR L'ACTION PERTURBATRICE D'UNE
NOUVELLE PLANÈTE. PREMIÈRE DÉTERMINATION DE LA POSITION
QUE LE NOUVEL ASTRE OCCUPE DANS LE CIEL.

Pozorované anomálie v pohybu Uranu vysvětlitelné poruchovým působením nové planety. První určení polohy této nové hvězdy na obloze.

QUATRIÈME PARTIE.

DÉTERMINATION PLUS PRÉCISE DES ÉLÉMENTS DE L'ORBITE,
ET DE LA POSITION ACTUELLE DE LA PLANÈTE TROUBLANTE,
AU MOYEN DE L'ENSEMBLE DES OBSERVATIONS D'URANUS.

Přesné určení dráhových elementů a současné polohy planety rušící vycházející z pozorování Uranu.

Le Verrier r. 1846 - kapitoly

CINQUIÈME ET DERNIÈRE PARTIE.

**EST-IL POSSIBLE DE DÉDUIRE DES OBSERVATIONS D'URANUS LA
POSITION DU PLAN DE L'ORBITE DE LA PLANÈTE TROUBLANTE?**

Je možné snížit počet pozorování polohy Uranu nezbytných ke stanovení
polohy rušící planety ?

objev Neptunu, obíhajícího kolem Slunce za 165 roků, ve vzdálenosti
4,5 miliardy km, 1,5krát zvětšení velikosti Sluneční soustavy

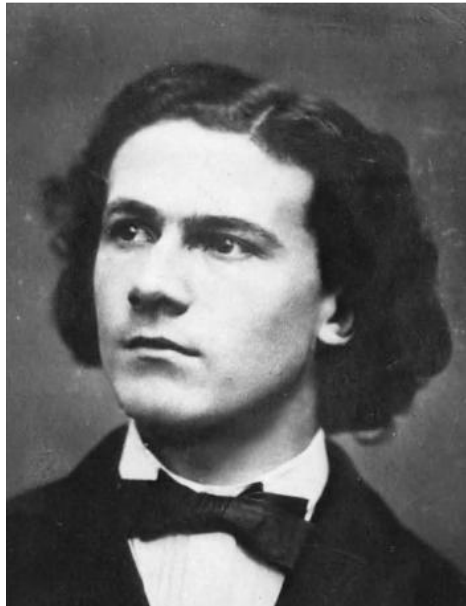
V. Štefl: Byl objev Neptunu náhodný? Čs. čas. fyz. **65** (2015), 218.

Le Verrier - ředitel Pařížské observatoře, diktátor 1854-1870

Nicolas Camille

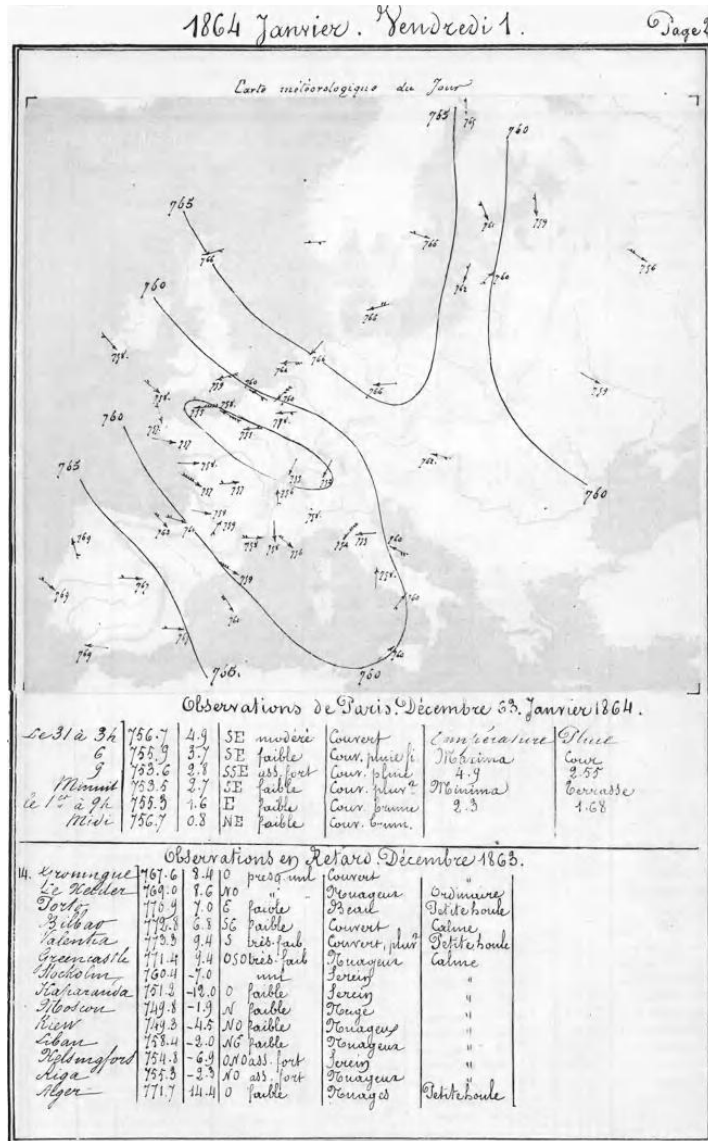
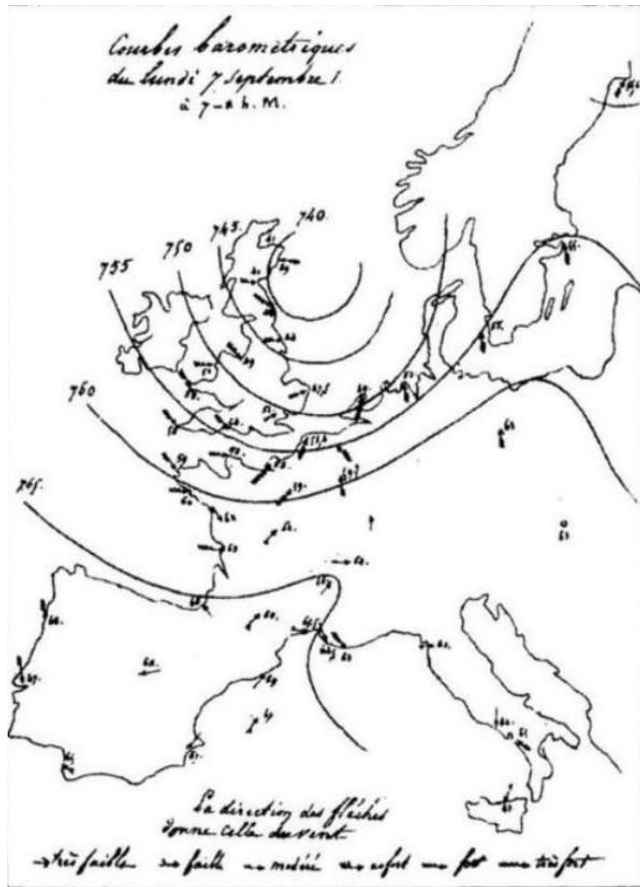
Flammarion 1842-1925,

výzkum dvojhvězd, planet,
popularizátor:



„Le Verrier měl ten nejstrašnější charakter, jaký si lze představit. Byl povýšený, pohrdavý, neovladatelný. Tento autokrat považoval všechny zaměstnance observatoře za své otroky. Byl velmi nenáviděn. Naprosto nesmiřitelná, brutální povaha ředitele nijak nesnižovala jeho matematickou genialitu, ale působila na něj nesmírně nepříznivě. Na hvězdárnu měla velmi deprimující vliv. Základní příčina jeho nepříjemného chování možná spočívala v jeho hypochondrické povaze - jak jsem se měl dozvědět teprve mnohem později, byla způsobena žaludeční indispozicí.“

Meteorologie



meteorologická situace 1. ledna 1864 v 8.00 hod. pro Paříž, vyneseny isobary

Korespondence

L'incubation } 10^h 10^m Nadar
2 jours

~~W~~

Écrit. Officiel. à Nadar Lyon.
urgence

Emballage soigné.

Vente ~~modeste~~ de Nord Ouest
Marchez vers l'Italie, ou
à cause des Alpes descendez
Vallée du Rhône.

Le Verrier

Expédié à 10^h 11.

Dr Henry

OSERVATOIRE
DE
PARIS

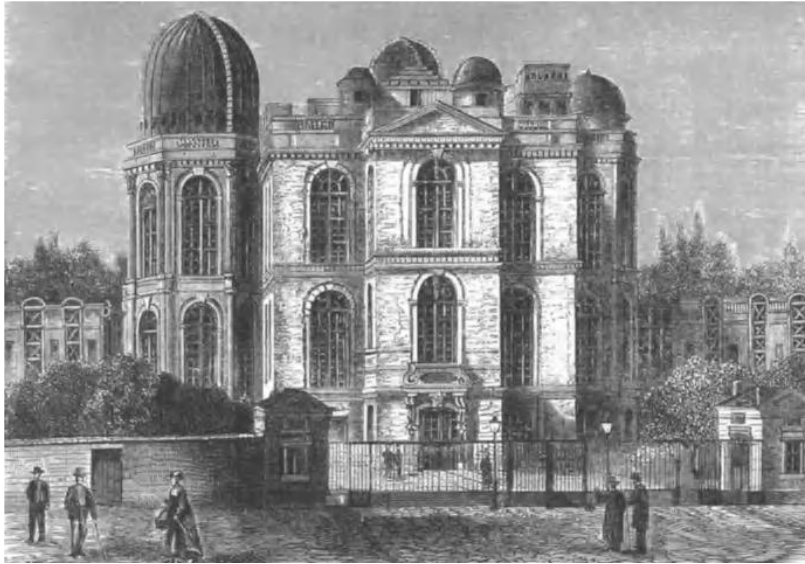
rukopis Le Verriera k telegramu
obsahujícímu meteorologickou
předpověď pro Nadara, který snad
připravoval pilotovaný let balónem

propouštěcí dopis Leverriera 1870

Ms 1072 v^o32

zvací dopis ministra Julese Simona Leverrierovi na otevření observatoře

Pařížská observatoř



založena r. 1667

Giovanni Domenico Cassini (1625-1712)



Newtonův dalekohled,
r. 1875, $D = 1,2$ m,
7,3 m výška

Pařížská observatoř, Le Verrier znovu ředitelem 1873-1877



ANNALES
DE
L'OBSERVATOIRE IMPÉRIAL DE PARIS,
PUBLIÉES
PAR U.-J. LE VERRIER,
DIRECTEUR DE L'OBSERVATOIRE.

TOME PREMIER.

PARIS,
MALLET-BACHELIER,
IMPRIMEUR-LIBRAIRE DE L'OBSERVATOIRE IMPÉRIAL DE PARIS,
QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55.

upřesnění teorie pohybu velkých planet,
komet, výzkum asteroidů, pohyb
perihélia Merkuru

Annales 1855 - 1877

Závěr

- *Myšlenka existence planety Adams, září 1845*
- *Časově zdlouhavé a náročné výpočty ve Francii, Anglii*
- *Určení polohy neznámé planety Le Verrier, srpen 1846*
- *Krátké pozorování v Německu, objev Neptunu, září 1846*
- *Priorita objevu patří Le Verrierovi*
- *Nalezení Neptunu - příznivá št'astná shoda okolností*
- *Matematické metody obou protagonistů byly adekvátní*
- *Významný počín lidského intelektu v nebeské mechanice*

Děkuji za pozornost