

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Michal Struna

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Detekce a analýza exoplanet s využitím
distribuovaných výpočtů a umělé inteligence

Michal Struna

Diplomová práce

2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Struna**
Osobní číslo: **I16144**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Informační technologie**
Název tématu: **Webový 3D simulátor těles ve vesmíru**
Zadávající katedra: **Katedra informačních technologií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce se zabývá tvorbou webové typescriptové aplikace pro 3D vizualizaci těles ve vesmíru. V rámci práce je kladen důraz na dynamický obsah, na kterém se mohou všichni uživatelé po úspěšné autentifikaci podílet. Data jsou ukládána do databáze na serveru. Pro práci s databází je využito REST API. Cílem bakalářské práce je vytvořit webovou aplikaci v jazyce TypeScript, jejímž obsahem je 3D simulátor těles ve vesmíru v reálném čase. Aplikace se skládá z klientské a serverové části. Klientská část zahrnuje: - Uživatelské rozhraní v Reactu a ostylované v SASS umožňující uživatelům autentifikaci, zobrazení a úpravu obsahu a písemnou komunikaci s ostatními uživateli. - 3D simulátor využívající knihovnu THREE.js zobrazující tělesa v reálném čase. Průběh času je možné zrychlovat, zpomalovat či vracet. Serverová část obsahuje: - Serverová aplikace napsaná v Node.js poskytující REST API pro práci s daty. - Data budou uložena v MongoDB databázi, se kterou se bude pracovat za využití knihovny Mongoose. - Dokumentace REST API pomocí nástroje Swagger. Výstupem práce je aplikace, kterou je po nainstalování závislostí pomocí balíčkovacího systému npm a transpilaci TypeScriptu do JavaScriptu možné okamžitě spustit.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

min. 30 s., dop. rozsah 40 s.

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

KLECZEK, Josip. Velká encyklopedie vesmíru. Praha: Academia, 2002s., 48s.
barev. obr. příl. ISBN 80-200-0906-x

REES, Martin J, ed. Vesmír: [obrazová encyklopedie]. Přeložil Pavel

PŘÍHODA. V Praze: Knižní klub, 2006. ISBN 80-242-1668-x

JPL Solar System Dynamics. JPL Solar System Dynamics [online]. Dostupné z:
<https://ssd.jpl.nasa.gov>

MARDAN, Azat. Practical Node.js: building real-world scalable web apps.

Berkeley, California: Apress, [2014]. Expert's voice in Web development. ISBN
978-1-4302-6595-5

MARDAN, Azat. Practical Node.js: building real-world scalable web apps.

Berkeley, California: Apress, [2014]. Expert's voice in Web development. ISBN
978-1-4302-6595-5

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Monika Borkovcová, Ph.D.

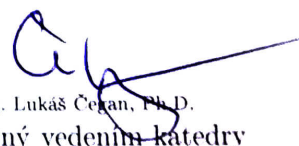
Katedra informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: 31. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 12. května 2019



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



Ing. Lukáš Čechan, Ph.D.
pověřený vedením katedry

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9. 5. 2021

Michal Struna

Poděkování

...

ANOTACE

...

KLÍČOVÁ SLOVA

exoplanety, extrasolární planety, kepler, umělá inteligence, python

TITLE

Artificial intelligence for exoplanet detection from transit data

ANNOTATION

...

KEYWORDS

exoplanet, extrasolar planets, kepler, artificial intelligence, python

OBSAH

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Seznam zdrojových kódů	12
Seznam vzorců	13
Seznam obrázků	14
Úvod	15
1 Exoplanety	16
1.1 Důvody hledání	16
1.2 Typy exoplanet	16
1.3 Objevené exoplanety	16
2 Metody hledání exoplanet	17
2.1 Tranzitní metoda	19
2.1.1 Target pixel file	20
2.1.2 Světelná křivka hvězdy	20
2.1.3 Vyřazení false positives	22
2.1.4 Výpočet velké poloosy dráhy	24
2.1.5 Výpočet poloměru planety	24
2.1.6 Výpočet hmotnosti planety	24
2.2 Metoda radiálních rychlostí	25
2.2.1 Měření vlnové délky záření hvězdy	26
2.2.2 Výpočet radiální rychlosti hvězdy	26
2.2.3 Výpočet hmotnosti planety	28
2.3 Astrometrická metoda	29
2.4 Gravitační mikročočky	30
2.5 Přímé zobrazení	30
2.6 Pulsar timing	30

3	Umělá inteligence	31
3.1	Neuronová síť	31
3.1.1	Konvoluční neuronová síť	31
4	Existující řešení	32
4.1	Planet Hunters	32
4.2	Astronet	32
5	Použité technologie	33
5.1	TypeScript	33
5.1.1	React	33
5.1.2	Styled Components	33
5.1.3	NPM	33
5.2	Python	33
5.2.1	Flask	33
5.2.2	Astropy	33
5.2.3	LightKurve	33
5.2.4	TensorFlow	33
5.2.5	Pip	33
5.3	MongoDB	33
5.4	Socket.io	33
5.5	Git	33
6	Návrh a vývoj aplikace	34
6.1	Server	34
6.1.1	REST API	35
6.1.2	Socket.io API	36
6.2	Webová aplikace	37
6.3	Klientská aplikace	37
6.4	Neuronová síť	38
6.5	Databáze	38
6.6	Datasets	38
6.6.1	Target pixel files	39
6.6.2	Světelné křivky hvězd	39

6.6.3	Radiální rychlosti hvězd	39
6.6.4	Hvězdy	39
6.6.5	Planety	40
6.6.6	Názvy	40
7	Rozvržení aplikace	42
7.1	Přehled	42
7.2	Databáze	42
7.3	Detail systému	42
7.4	Objevování	42
7.5	Nápověda	42
7.6	Autentizace	42
	Závěr	43
	Použitá literatura	43
	Seznam příloh	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Vlastnosti planet v závislosti na metodě objevení	17
Obrázek 2	Závislost hmotnosti, periody oběhu a metody objevení planety	18
Obrázek 3	Přechod planety přes kotouč hvězdy	19
Obrázek 4	Target pixel file hvězdy Kepler-10	20
Obrázek 5	Světelná křivka soustavy Kepler-13	21
Obrázek 6	Detail světelné křivky soustavy Kepler-13	21
Obrázek 7	Dvojhvězda KIC 8262223	22
Obrázek 8	Cefeida KIC 3733346	22
Obrázek 9	Proměnná hvězda KIC 9832227	22
Obrázek 10	Kataklyzmická proměnná hvězda KIC 9406652	22
Obrázek 11	Světelná křivka Kepler-10	23
Obrázek 12	Složená světelná křivka	23
Obrázek 13	Globální pohled na tranzit Kepler-10 c	23
Obrázek 14	Lokální pohled na tranzit Kepler-10 c	23
Obrázek 15	Metoda radiálních vzdáleností	25
Obrázek 16	Spektrum slunečního záření	26
Obrázek 17	Radiální rychlost hvězdy 51 Pegasi	27
Obrázek 18	Astrometrická metoda	29
Obrázek 19	Kolísání hvězdy Gliese 876 s planetou	29
Obrázek 20	Komponenty projektu a jejich komunikace	34
Obrázek 21	Architektura serveru	34
Obrázek 22	Architektura webové aplikace	37
Obrázek 23	Stavy procesů a přechody mezi nimi	37
Obrázek 24	Trénovací množina	38
Obrázek 25	Část datasetu s vlastnostmi hvězd	39
Obrázek 26	Část datasetu s vlastnostmi planet	40

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Odhad hmotnosti planety z trantizní metody	24
Tabulka 2	Příklady výpočtu hmotnosti planet	28
Tabulka 3	Údaje o hvězdách ukládané do databáze	39
Tabulka 4	Údaje o planetách ukládané do databáze	40
Tabulka 5	Pojmenování soustavy Kepler-10 v různých katalozích	41

SEZNAM ZDROJOVÝCH KÓDŮ

Zdrojový kód 1	Vytvoření modelů v REST API.	35
Zdrojový kód 2	Vytvoření koncového bodu v REST API.	35
Zdrojový kód 3	Ukázka komunikace pomocí socket.io.	36

SEZNAM VZORCŮ

1	Pravděpodobnost zpozorování tranzitu planety přes hvězdu	20
2	Poloměr planety z tranzitní metody	24
3	Odhad hmotnosti planety z tranzitní metody	24
4	Radiální rychlost na základě změny vlnové délky	27
5	Radiální rychlost	28

SEZNAM ZKRATEK

csv	Comma-separated values
fits	Flexible image transport system
ly	Light year
au	Astronomical unit

ÚVOD

V naší sluneční soustavě se nachází celkem 8 dosud objevených planet včetně Země. Mimo ni ale existují minimálně stovky miliard galaxií a v každé z nich v průměru stovky miliard hvězd. Z toho, co o vzniku a fungování hvězdných soustav víme je pravděpodobné, že většinu těchto hvězd bude obíhat jedna nebo více planet, tzv. extrasolárních planet nebo také exoplanet. [3]

První potvrzená exoplaneta byla objevena již roku 1992, ale výzkum exoplanet se dostal do oblasti širokého zájmu až během posledního desetiletí. Stalo se tak především kvůli vesmírnému teleskopu Kepler, který má na svém kontě od roku 2009 přes 2 500 objevených exoplanet. [TODO]

K dnešnímu dni je známo více jak 4 000 potvrzených exoplanet. Toto číslo se s nejvyšší pravděpodobností bude rychle zvyšovat, protože roku 2018 byl vypuštěn nástupce Kepleru – satelit TESS – od něhož je očekáván objev 20 000 exoplanet. [8]

Planety u jiných hvězd většinou nelze pozorovat přímo. Proto je nepřímými metodami zkoumáno jejich působení na své mateřské hvězdy, které už pozorovat lze. Výstupem z takovýchto pozorování jsou často stovky GiB nebo jednotky TiB fyzikálních a statistických dat, jež je následně nutno zpracovat. [3]

Cílem této diplomové práce je vytvořit aplikaci umožňující uživatelům poskytovat výpočetní výkon svých počítačů pro analýzu právě těchto dat. Projekt sestává z klientského programu, webové aplikace a serveru. Klientský program provádí potřebné distribuovatelné výpočty na počítači uživatele. Tento program je možné ovládat z rozhraní webové aplikace, jež zároveň poskytuje přehled o všech aktivitách, uživatelích a datech. Rozdělování výpočetních úloh mezi klienty a ukládání dat do databáze řeší server.

Díky distribuovaným výpočtům se do výzkumu exoplanet bude moci bez vysokého úsilí, znalosti či technického vybavení zapojit i široká veřejnost. To může urychlit vývoj a zároveň zvýšit povědomí o této vědní disciplíně.

V projektu jsou využity některé techniky spadající pod umělou inteligenci, v důsledku čehož je zpracovávání dat zcela automatizované. Platí však, že umělá inteligence je v současnosti stále intenzivně se rozvíjející oblastí, a proto výsledky nemusí být natolik vypovídající ve srovnání s tím, kdy by výzkum prováděli lidé manuálně, byť by to trvalo nesrovnatelně déle.

1 EXOPLANETY

1.1 Důvody hledání

TODO

1.2 Typy exoplanet

TODO

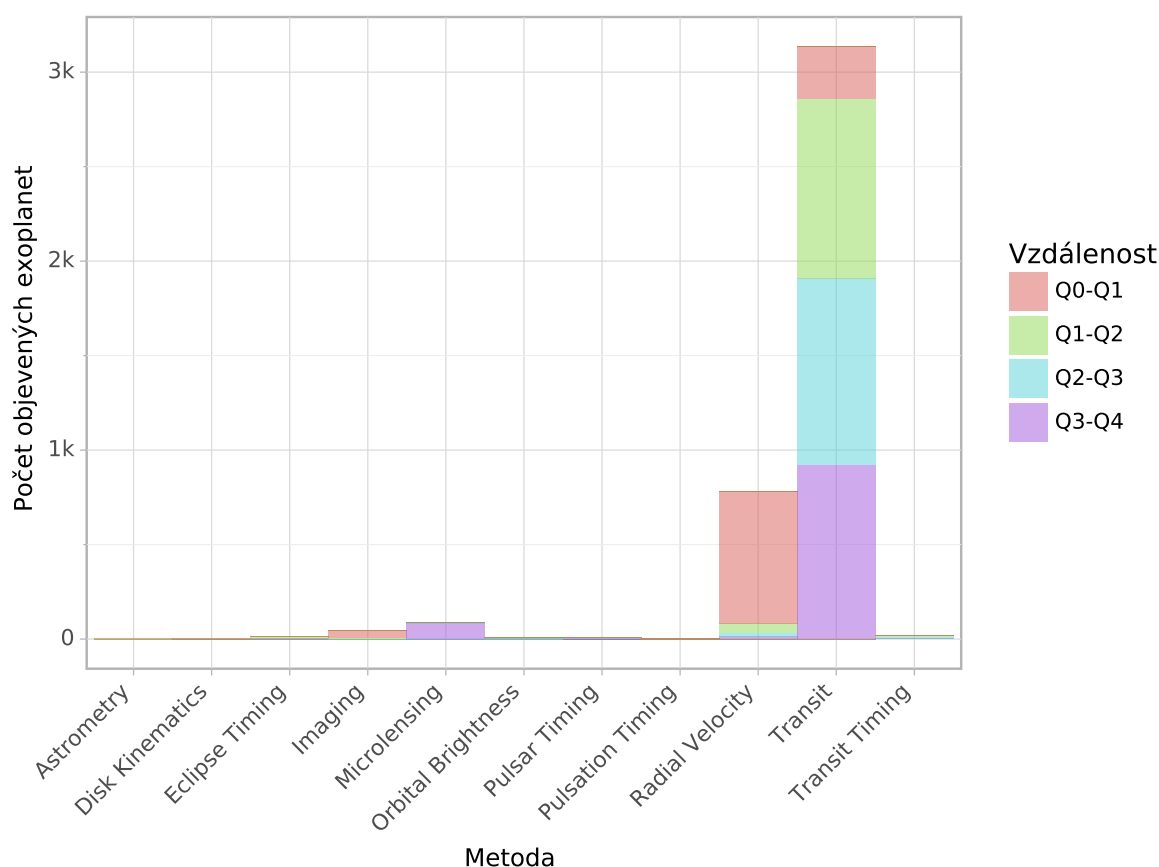
1.3 Objevené exoplanety

TODO

2 METODY HLEDÁNÍ EXOPLANET

Exoplanety není téměř vůbec možné pozorovat přímo vizuálně, protože neemitují žádné světlo a nachází se ve velkých vzdálenostech od Země. Lze ovšem pozorovat jejich působení na blízké hvězdy nebo jiné útvary, jež jsou pro nás viditelné. K tomuto účelu se používá několik metod popsanych v této kapitole.

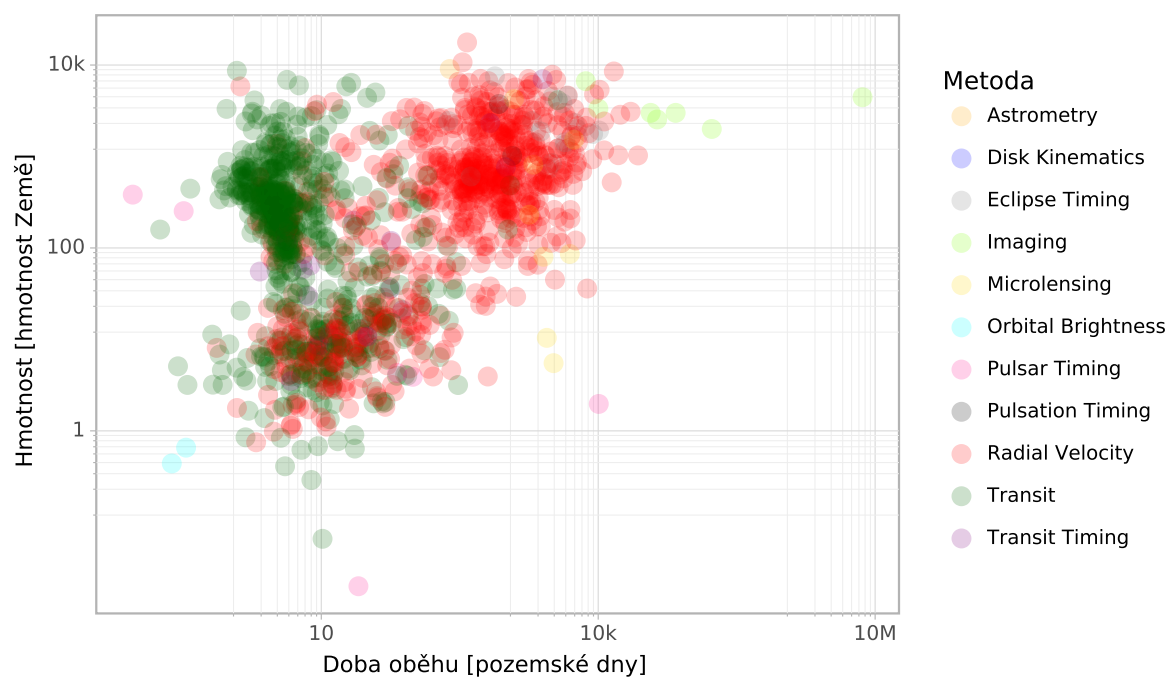
Zdaleka nejvýznamnější je tranzitní metoda, kterou byla objevena většina exoplanet. Velké množství planet bylo objeveno taktéž metodou radiálních vzdáleností. Pomocí ní byly objevovány planety především blízko Země.



Obrázek 1: Vlastnosti planet v závislosti na metodě objevení ¹

Málo hmotné planety byly objevovány jak tranzitní metodou, tak i metodou radiálních rychlostí. Naproti tomu hmotné planety blízko své hvězdy byly objeveny především tranzitní metodou, kdežto hmotné planety daleko od své hvězdy metodou radiálních rychlostí. Nejvzdálenější planety od hvězdy byly pak objevovány metodou přímého zobrazení.

¹Vytvořeno autorem za využití datasetu TODO: REF

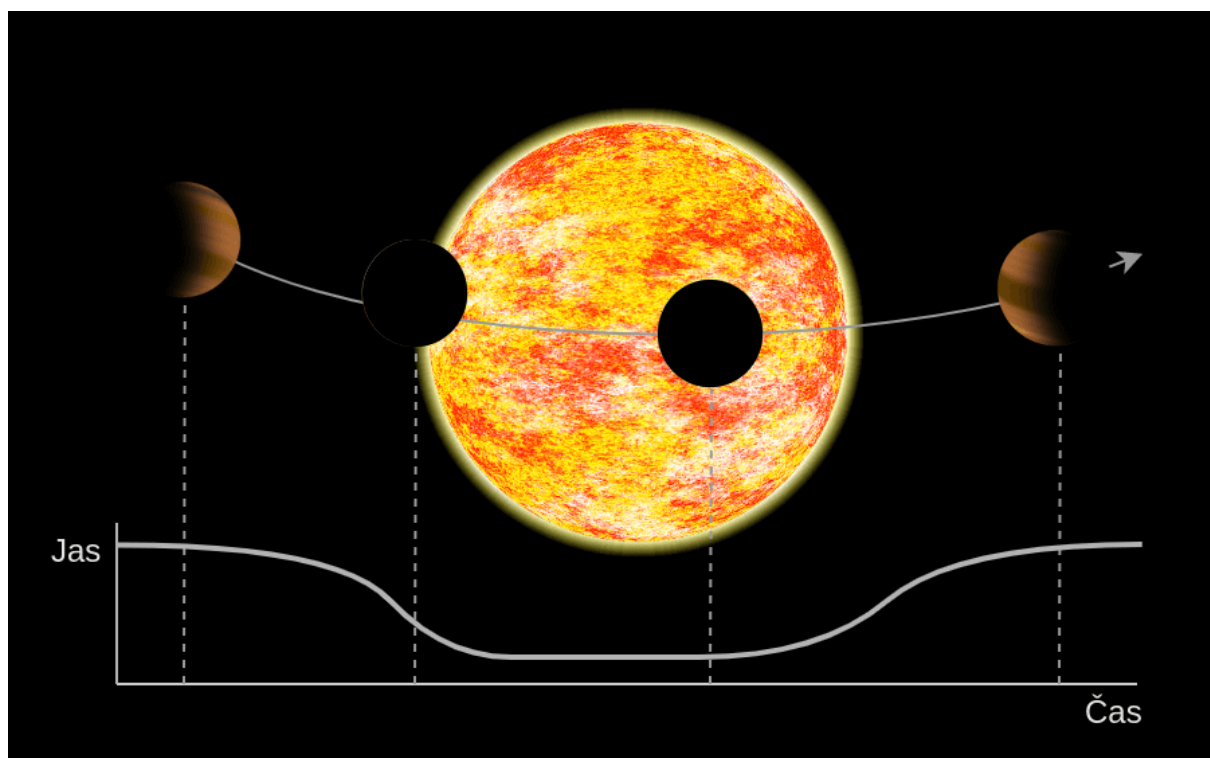


Obrázek 2: Závislost hmotnosti, periody oběhu a metody objevení planety ¹

¹Vytvořeno autorem za využití datasetu TODO: REF

2.1 Tranzitní metoda

Někdy se planeta při obíhání dostane mezi svou hvězdu a Zemi. Tento jev se pro pozorovatele na Zemi projeví jako mírný pokles jasu hvězdy (obvykle ve zlomku procenta). Pokud je hvězda teleskopem sledována dlouhodobě, je možné v těchto změnách jasu hvězdy odhalit opakující se složku. To by mohlo indikovat přítomnost planety v blízkosti této hvězdy. [3, 9]



Obrázek 3: Přejechání planety přes kotouč hvězdy ¹

Tyto změny však nemusí být na první pohled viditelné, protože v soustavě může být více planet, které svou hvězdu zastiňují různou měrou a obíhají kolem ní s různou periodou. Navíc i v situaci, kdy je ve změnách jasu hvězdy objevena periodická složka nemusí jít vždy o obíhající planetu. Hvězda může být např. sama o sobě proměnlivá nebo se může jednat o dvojhvězdu, jejíž složky se vzájemně zastiňují. [4]

Tranzitní metoda vzbuzuje velký zájem především kvůli možnosti objevovat i malé planety podobné Zemi – takové planety by mohly spíše splňovat podmínky pro život. Nevýhodou je, že většina exoplanet obíhá svou hvězdu v takové rovině, v jaké pozorovatel na Zemi nemůže transit spatřit. Odhadem 99 % všech potenciálních exoplanet podobných Zemi nemůže být tranzitní metodou nikdy zachyceno. [5, 9]

¹Vytvořeno autorem v <https://www.draw.io> a GIMP.

$$P = \frac{d_s}{a} \quad (1)$$

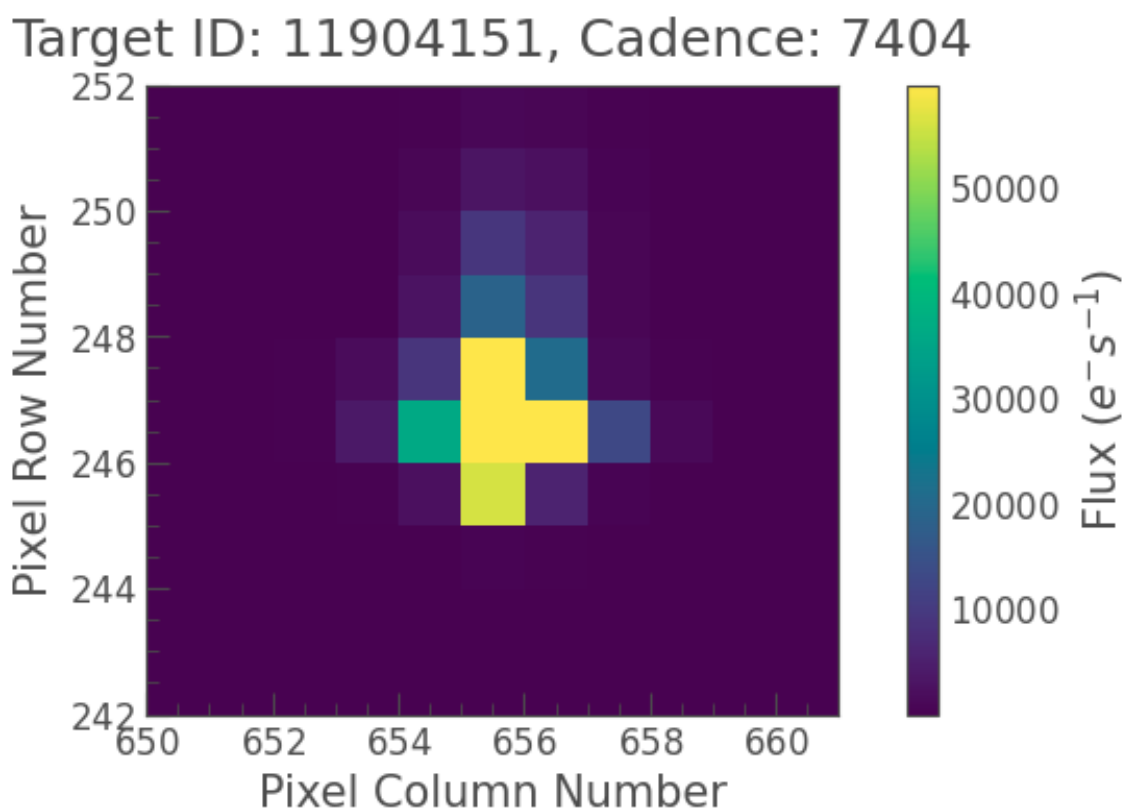
Vzorec 1: Pravděpodobnost zpozorování tranzitu planety přes hvězdu

d_s = průměr hvězdy a = vzdálenost exoplanety od hvězdy

2.1.1 Target pixel file

Prvním krokem v analýze hvězdy tranzitní metodou je její fyzické pozorování. Teleskop obvykle pozoruje část oblohy po dobu několika měsíců, přičemž každých několik desítek minut vytvoří snímek dané části oblohy. Z výsledných fotografií se následně vyextrahují jednotlivé hvězdy, čímž vzniknou tzv. target pixel files.

TPF obsahuje část oblohy o velikosti několika pixelů, na které se v původní fotografii nacházela zkoumaná hvězda a její okolí. Barva pixelů je určena jasnem.



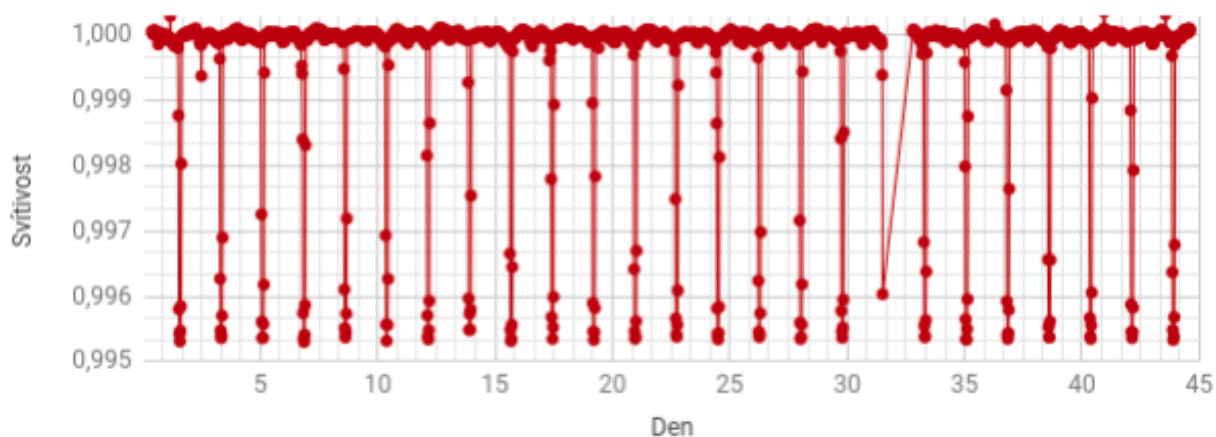
Obrázek 4: Target pixel file hvězdy Kepler-10 ¹

2.1.2 Světelná křivka hvězdy

Po složení všech TPF do časové řady a vypočítání jejich jasů dostaneme světelnou křivku. Na obrázku 5 je světelná křivka hvězdy Kepler-13 očištěná od dlouhodobého trendu, šumu

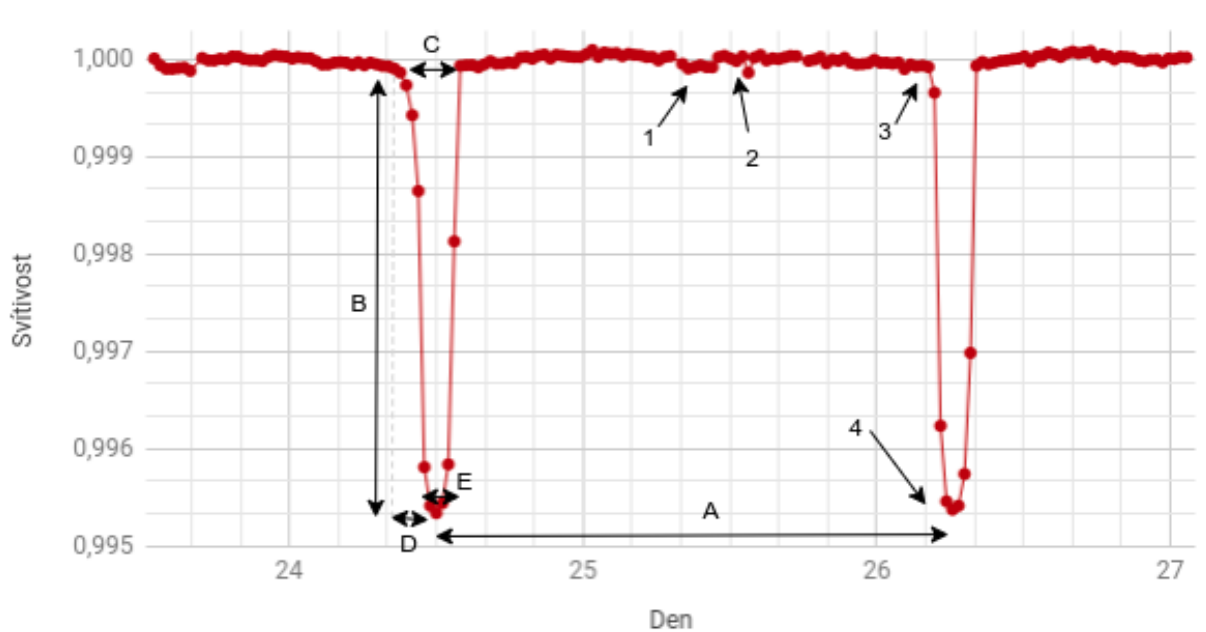
¹Vytvořeno autorem, zdroj dat: [6]

a extrémních hodnot. Křivka vykazuje velice výraznou periodickou složku s periodou 1,763 dne. Ve většině případů ale vliv planety není takto výrazný a detekovat planetu je obtížnější.



Obrázek 5: Světelná křivka soustavy Kepler-13 ¹

Každý tranzit má charakteristické fáze, které pomohou odlišit působení exoplanety od ostatních možných příčin, jako je např. proměnlivost hvězdy, dvojhvězda nebo pulzar.



Obrázek 6: Detail světelné křivky soustavy Kepler-13 ¹

1. Planeta je schovaná za hvězdou, hvězda je vidět se svým základním jasnem.
2. Planeta je vedle hvězdy, jas hvězdy je posílen o světlo odražené od planety.
3. Planeta je vedle hvězdy, ale její viditelná část není osvětlena. Hvězda je vidět se svým základním jasnem.

¹Vytvořeno autorem.

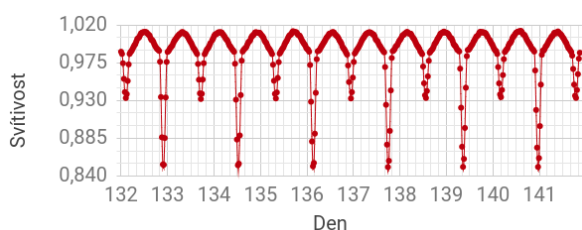
4. Planeta je před hvězdou, jas hvězdy je snížen v důsledku zakrytí části kotouče.

Tyto fáze společně s důležitými parametry tranzitu potřebnými pro další výpočty jsou vyznačeny na obrázku 6:

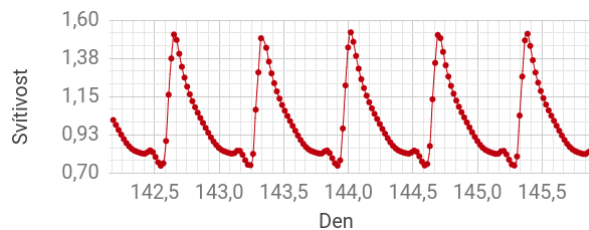
- A. Perioda – čím větší perioda, tím delší planetární rok a větší velká poloosa dráhy,
- B. Hloubka – čím větší hloubka, tím je planeta vůči hvězdě větší,
- C. Trvání – čím je trvání kratší, tím menší trajektorii přes hvězdu planeta má,
- D. Délka nástupu – čím prudší a kratší je nástup, tím menší je úhel mezi rovinou orbity exoplanety a přímkou od hvězdy k pozorovateli,
- E. Délka minima – čím větší délka minima v porovnání s délkou transitu, tím je úhel mezi rovinou orbity exoplanety a přímkou od hvězdy k pozorovateli menší.

2.1.3 Vyřazení false positives

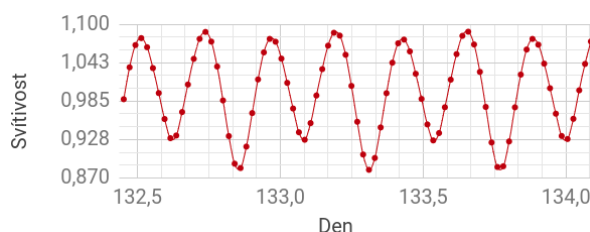
Většina periodických složek ve světelných křivkách hvězd jsou *false positive* – patří jiným jevům, než je obíhající planeta. Tyto případy je třeba odfiltrovat, což byla až donedávna především manuální práce lidí – vědců či dobrovolníků. Protože ale tranzit planety vykazuje specifický průběh popsáný v předchozí kapitole, je možné ho s určitou úspěšností rozpoznat pomocí naučené umělé neuronové sítě automaticky. [4]



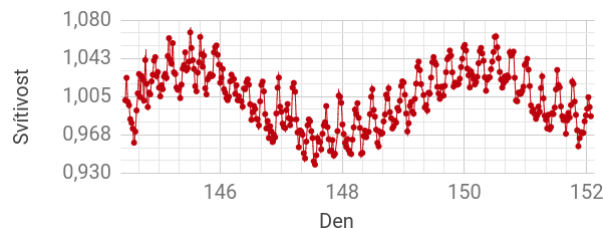
Obrázek 7: Dvojhvězda KIC 8262223 ¹



Obrázek 8: Cefeida KIC 3733346 ¹



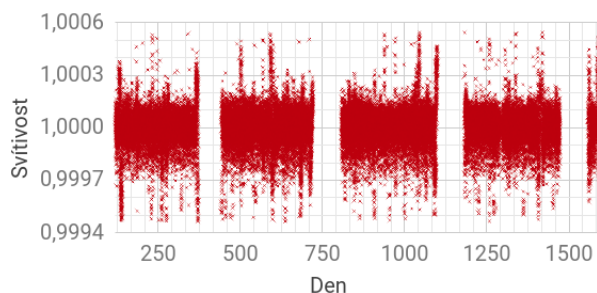
Obrázek 9: Proměnná hvězda KIC 9832227 ¹



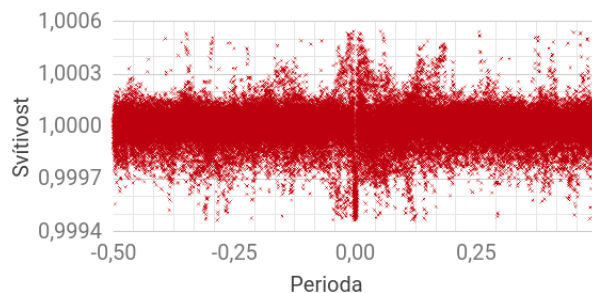
Obrázek 10: Kataklyzmická proměnná hvězda KIC 9406652 ¹

Je třeba aby vstupní data do neuronové sítě měla stejné rozměry i formát. Vzhledem k různorodosti světelných křivek je nutno provést několik kroků, abychom dosáhli standardizovaného formátu. Prvním krokem je složení časové řady do jedné periody, čímž

dojde k posílení viditelnosti transitu (pokud zde nějaký je), nebo naopak k jeho vyrušení (pokud zde žádný není). [4]



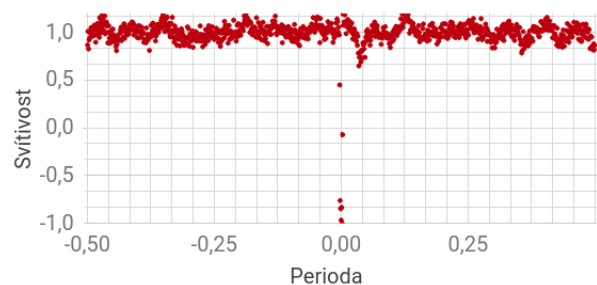
Obrázek 11: Světelná křivka Kepler-10 ¹



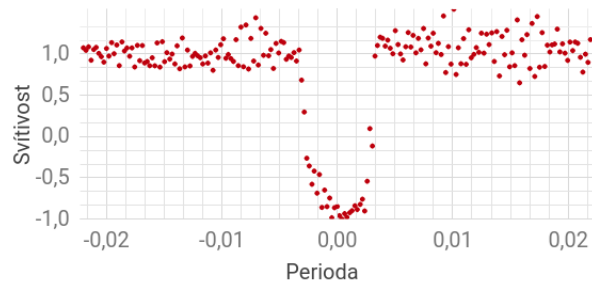
Obrázek 12: Složená světelná křivka ¹

Na obrázku 12 je uprostřed slabě patrný transit. Má malou šířku, protože trvá pouze 0,25 dne, zatímco celá perioda je dlouhá 45,3 dne. Z této složené časové řady se vytvoří dva pohledy, které budou vstupem do neuronové sítě:

- **Globální pohled** (*obr. 13*) – Šířka periody a počet bodů v časové řadě jsou fixní. Nevýhodou je, že u planet s dlouhou periodou bude transit velice nepatrný, proto pouze globální pohled nestačí. [4]
- **Lokální pohled** (*obr. 14*) – Šířka tranzitu a počet bodů v časové řadě jsou fixní. Nevýhodou je, že není viditelný celý průběh světelné křivky. Naproti tomu je ale zřetelný transit. [4]



Obrázek 13: Globální pohled na transit Kepler-10 c ¹



Obrázek 14: Lokální pohled na transit Kepler-10 c ¹

Fixní počet bodů lze zajistit nahrazením každých $\frac{\alpha}{\beta}$ sousedních bodů (α – současný počet bodů, β – požadovaný počet bodů) jediným, který bude reprezentovat jejich medián. Pro potřeby neuronové sítě je nutno oba pohledy taktéž normalizovat tak, aby platilo $H = \langle 1; -1 \rangle$. U případů, které neuronová síť vyhodnotí jako planety, je možné pokračovat výpočtem dalších informací o planetě. [4]

¹Vytvořeno autorem, zdroj dat: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.

2.1.4 Výpočet velké poloosy dráhy

2.1.5 Výpočet poloměru planety

Ze světelné křivky a poloměru hvězdy lze poloměr tranzitující planety vypočítat po vyjádření z následující rovnice [9]:

$$\frac{r^2}{R^2} = \frac{\Delta F}{F} \quad (2)$$

Vzorec 2: Poloměr planety z tranzitní metody

r = poloměr planety R = poloměr hvězdy F = jas hvězdy ΔF = změna jasu

2.1.6 Výpočet hmotnosti planety

Hmotnost planety z tranzitní metody narozdíl od metody radiálních rychlostí nelze vypočítat. Avšak z empirických pozorování je možné hmotnost planety odhadnout z následující rovnice, přičemž a a b jsou pro různé velikostní kategorie jiné. [TODO]

$$m = a * r^b \quad (3)$$

Vzorec 3: Odhad hmotnosti planety z tranzitní metody

m = hmotnost planety [hmotnost Země] r = poloměr planety [poloměr Země]

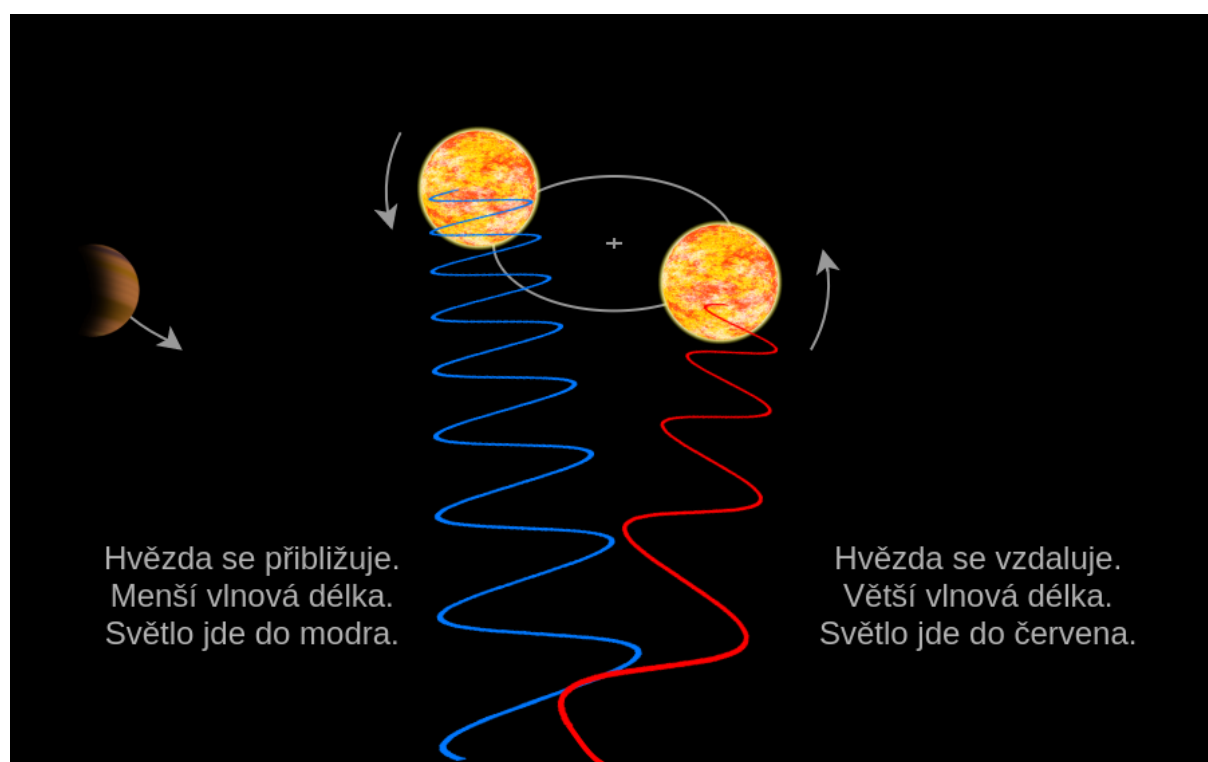
Poloměr [poloměr Země]	Odhad hmotnosti
< 6	$m = 0.9515 * r^{3.1}$
6-10	$m = 1.7013 * r^{2.0383}$
10 >	$m = 0.6631 * r^{2.4191}$

Tabulka 1: Odhad hmotnosti planety z tranzitní metody

2.2 Metoda radiálních rychlostí

Stejně jako hvězda ovlivňuje obíhající planetu, tak i planeta gravitačně ovlivňuje svou hvězdu a obě tělesa obíhají kolem společného těžiště. Tento pohyb se může projevit jako opakované přibližování a vzdalování hvězdy vůči pozorovateli na Zemi. Právě pojem radiální rychlost označuje rychlost pohybu ve směru přímky k pozorovateli. [5]

Pokud se zdroj elektromagnetického záření (hvězda) přibližuje vůči pozorovateli, záření má menší vlnovou délku a jeví se více do modra, protože právě modrá (a fialová) barva má z viditelného spektra nejmenší vlnovou délku. Obdobná situace nastává při vzdalování se zdroje vlnění od pozorovatele. Vlnová délka se zvětšuje a barva jde do červena. Tomuto efektu se říká červený (resp. modrý) posuv. [5]



Obrázek 15: Metoda radiálních vzdáleností ¹

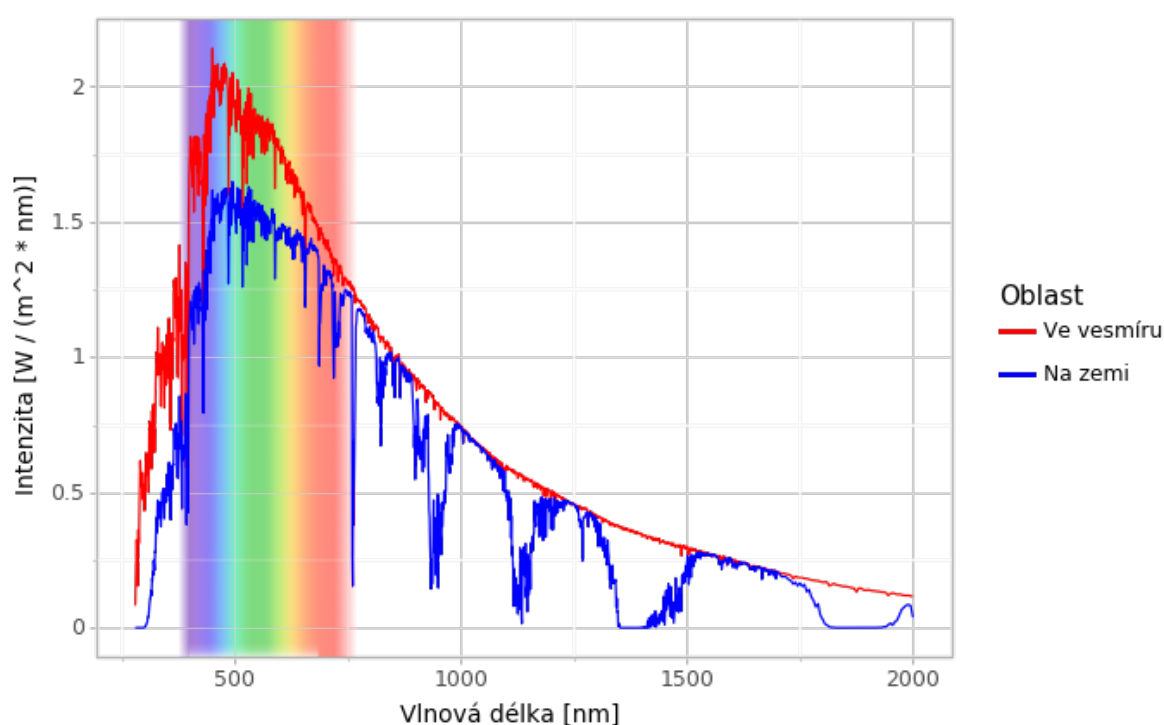
Příčinou červeného/modrého posuvu je v tomto případě Dopplerův jev, který lze uplatnit i pro jiné druhy vlnění, než to elektromagnetické – zvuk. Pokud se k nám zdroj zvuku přibližuje (např. siréna na jedoucím autě), zvuk zpravidla vnímáme vyšším tónem, protože má menší vlnovou délku (vyšší frekvenci). Při vzdalování zdroje má zvuk větší vlnovou délku a je vnímán hlubším tónem. [1]

¹Vytvořeno autorem v <https://www.draw.io> a GIMP.

Periodicky se opakující změny ve vlnové délce záření hvězdy tak mohou být důsledkem existence tělesa v této soustavě. [5]

2.2.1 Měření vlnové délky záření hvězdy

Hvězdy nevyzařují světlo pouze jedné jediné vlnové délky, nýbrž celé spektrum. Tento efekt lze vidět u duhy v zemské atmosféře, kdy jsou jednotlivé složky slunečního světla odděleny. Záření z hvězd se dokonce neomezuje pouze na viditelné světlo, ale pokrývá značnou část celého elektromagnetického spektra. Jak velká část záření přísluší jednotlivým vlnovým délkám lze měřit pomocí spektrometru. [1, 7]



Obrázek 16: Spektrum slunečního záření ¹

Změna vlnové délky záření se projevuje jako horizontální posun barevného spektra hvězdy. Nutno podotknout, že zemská atmosféra některé vlnové délky pohlcuje. Proto i přesto, že Slunce má barvu spíše do zelena vidíme tuto hvězdu ze Země žlutě. [TODO]

2.2.2 Výpočet radiální rychlosti hvězdy

Poté, co teleskop sesbírá dostatečně velkou časovou řadu vlnových délek záření hvězdy může dojít k vypočítání změn radiální rychlosti v čase. Lze tak učinit dle vzorce 3. Platí,

¹Vytvořeno autorem, zdroj dat: [7].

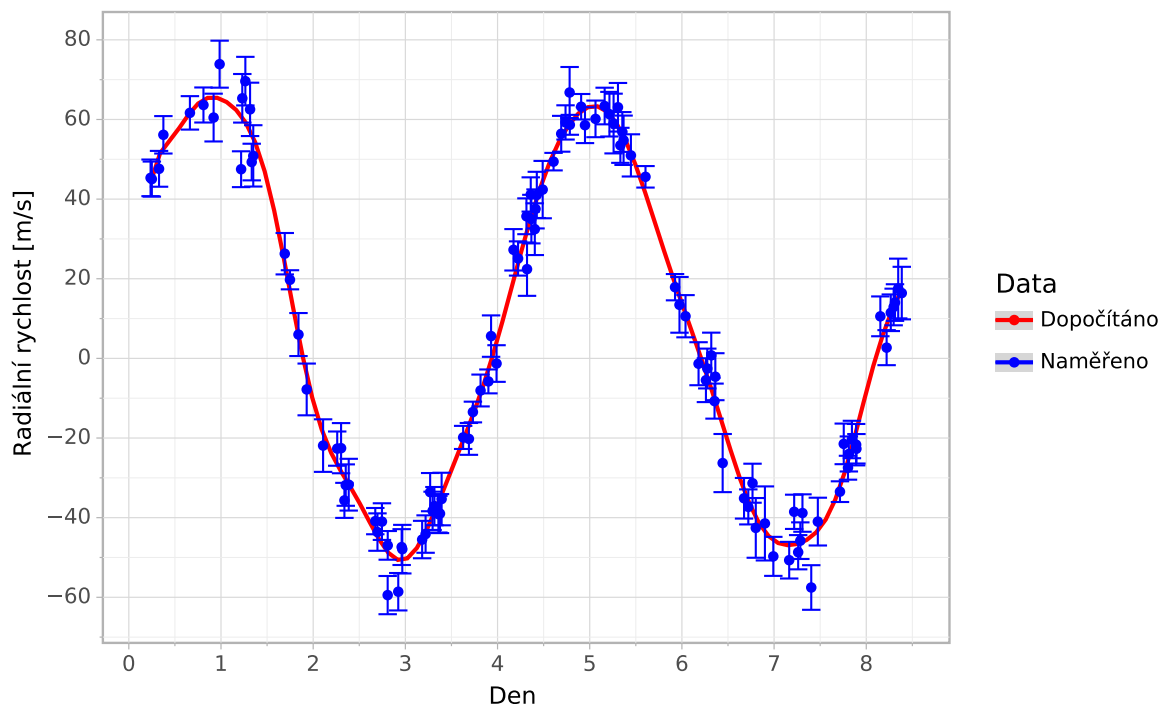
že radiální rychlost je kladná, pokud se zdroj od pozorovatele vzdaluje a záporná pokud se přibližuje. [5]

$$v = c * \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (4)$$

Vzorec 4: Radiální rychlost na základě změny vlnové délky

$\Delta\lambda$ = změna vlnové délky λ_0 = klidová vlnová délka v = radiální rychlost

Graf znázorňující radiální rychlost hvězdy 51 Pegasi může vypadat takto:



Obrázek 17: Radiální rychlost hvězdy 51 Pegasi ¹

Na první pohled je patrná jedna periodická složka s periodou 4,23 dne a amplitudou 56,04 $\frac{m}{s}$, která značí, že kolem této hvězdy obíhá jedna planeta. Pokud zde jsou přítomna i jiná tělesa, důvodů, proč je metoda radiálních rychlostí neodhalila může být několik:

- Hmotnost tělesa je vůči hmotnosti hvězdy zanedbatelná,
- Perioda oběhu tělesa je příliš velká (desítky let a více), a proto se ji nepodařilo zachytit na tak krátkém časovém úseku,
- Těleso obíhá po dráze, jejíž rovina je kolmá k přímce směrem k pozorovateli (k Zemi). To vede k tomu, že je hvězda vychylována takovým směrem, který nemá vliv na radiální rychlost hvězdy vůči Zemi.

¹Vytvořeno autorem, zdroj dat: [2].

2.2.3 Výpočet hmotnosti planety

Hlavní výhodou metody radiálních rychlostí oproti tranzitní metodě je možnost spočítat hmotnost exoplanety. Její přesnou hodnotu však lze odvodit pouze se znalostí sklonu dráhy exoplanety vůči pozorovateli. V opačném případě lze vypočítat pouze dolní mez hmotnosti planety, a to zejména kvůli $M_p * \sin(i)$ ve vzorci 5. [5]

$$\Delta v_{max} = \sqrt[3]{\frac{2\pi G}{T}} * \frac{M_p * \sin(i)}{\sqrt[3]{(M_p + M_s)^2}} * \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (5)$$

Vzorec 5: Radiální rychlost

Δv_{max} = amplituda změny rychlosti M_s = hmotnost hvězdy M_p = hmotnost planety
 $\sin(i)$ = sklon dráhy vůči pozorovateli e = excentricita dráhy T = oběžná doba

V tabulce 2 jsou uvedeny příklady výpočtu hmotnosti některých planet.

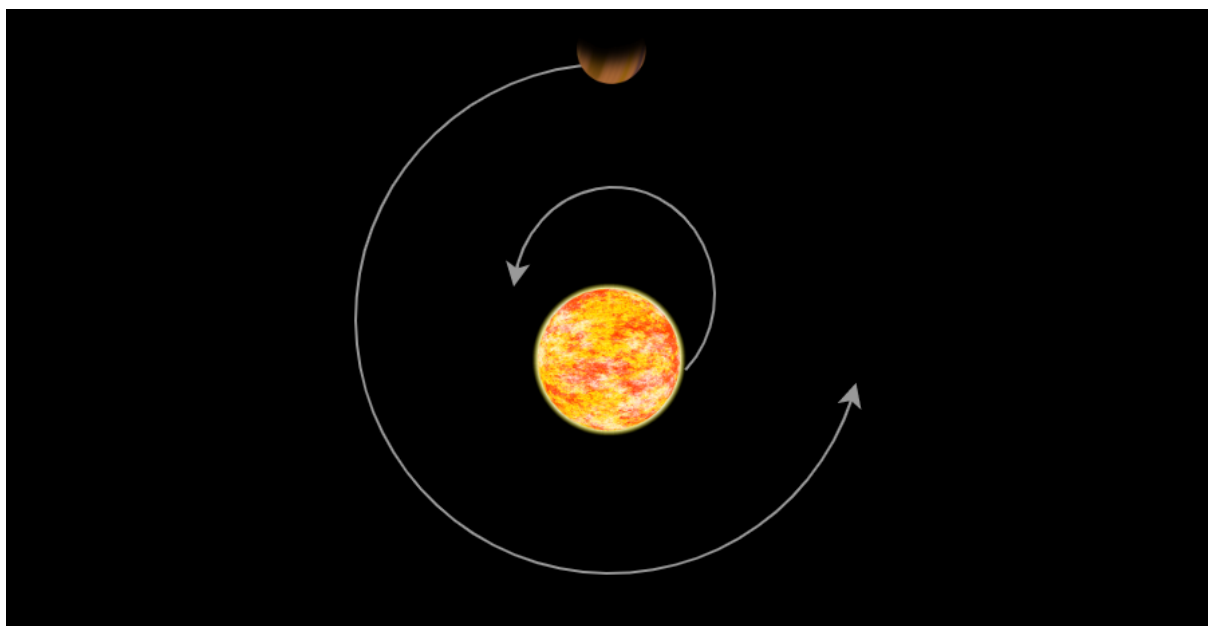
Těleso	Hvězda	$\Delta v_{max} [\frac{m}{s}]$	M_p [kg]	$\sin(i)$	e	T [r]	M_s [kg]
Země	Slunce	0,089	$2 * 10^{30}$	1	0,017	1	$5,97 * 10^{24}$
Jupiter		12,4			0,048	11,86	$1,9 * 10^{27}$
Pluto		0,00003			0,247	247,41	$1,3 * 10^{22}$
α Cen Bb	α Cen B	0,51	$1,8 * 10^{30}$		0	0,0089	$6,75 * 10^{24}$
51 Pegasi b	51 Pegasi	55,9	$2,22 * 10^{30}$		0,013	0,0116	$0,88 * 10^{27}$

Tabulka 2: Příklady výpočtu hmotnosti planet ¹

¹Vytvořeno autorem, zdroj dat: [1, 2, 5, 6].

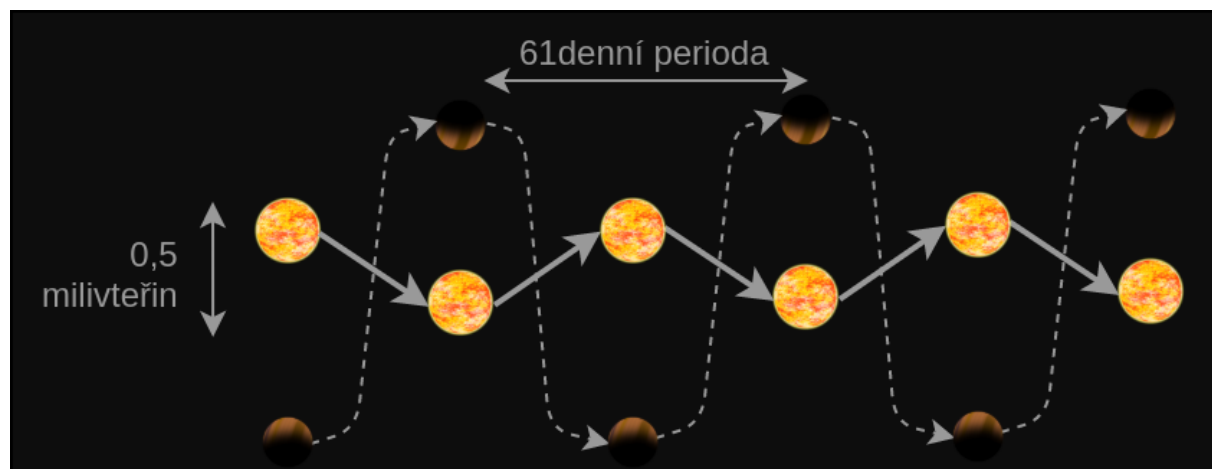
2.3 Astrometrická metoda

Astrometrická metoda využívá stejné vlastnosti vzájemného působení těles jako metoda radiálních rychlostí. Namísto zkoumání vlnové délky záření se však zaměřuje na polohu hvězdy. Hvězda, kolem níž obíhá dostatečně hmotné těleso, se bude v důsledku působení tělesa nepatrně vychylovat ze své pozice – bude obíhat kolem těžiště soustavy. [5]



Obrázek 18: Astrometrická metoda ¹

Pohyb hvězdy tak není přímočarý, ale vlnitý. Kolísání hvězdy je však pro pozorovatele na Zemi často pouze v řádu stovek úhlových mikrovteřin až jednotek milivteřin. [5] Z tohoto důvodu byla astrometrickou metodou dosud objevena pouze jediná exoplaneta. [6]



Obrázek 19: Kolísání hvězdy Gliese 876 s planetou ¹

¹Vytvořeno autorem v <https://www.draw.io> a GIMP.

Dá se však očekávat, že se zlepšující se technikou bude tato metoda úspěšnější.

2.4 Gravitační mikročočky

2.5 Přímé zobrazení

2.6 Pulsar timing

3 UMĚLÁ INTELIGENCE

3.1 Neuronová síť

3.1.1 Konvoluční neuronová síť

4 EXISTUJÍCÍ ŘEŠENÍ

4.1 Planet Hunters

TODO

4.2 Astronet

TODO: [4]

5 POUŽITÉ TECHNOLOGIE

5.1 TypeScript

5.1.1 React

5.1.2 Styled Components

5.1.3 NPM

5.2 Python

5.2.1 Flask

5.2.2 Astropy

5.2.3 LightKurve

5.2.4 TensorFlow

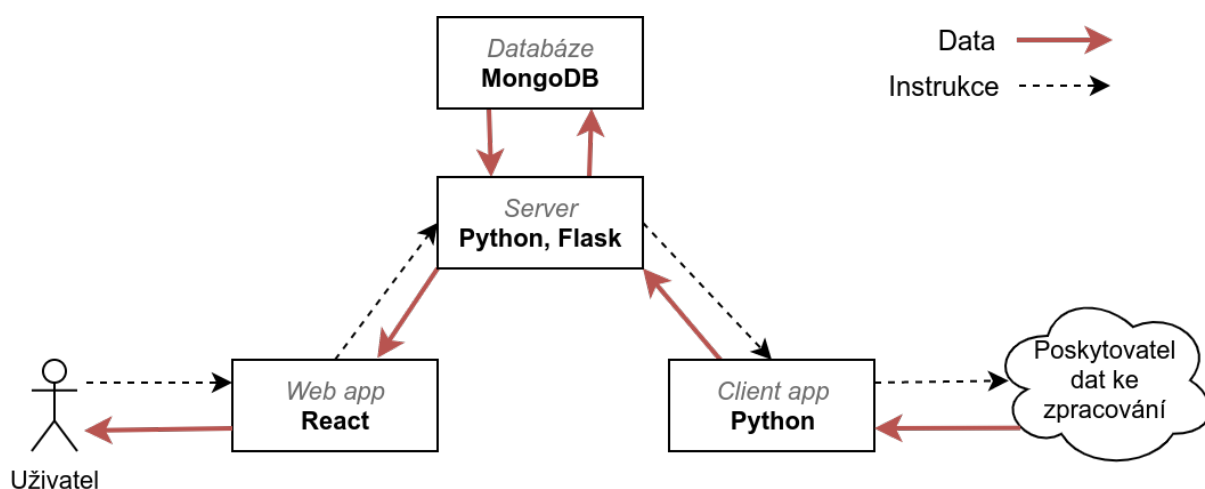
5.2.5 Pip

5.3 MongoDB

5.4 Socket.io

5.5 Git

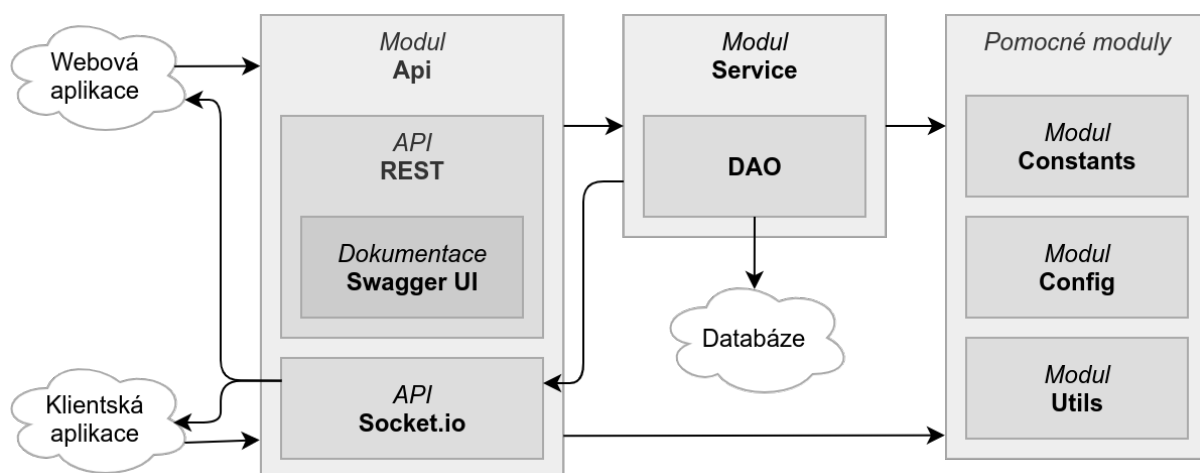
6 NÁVRH A VÝVOJ APLIKACE



Obrázek 20: Komponenty projektu a jejich komunikace ¹

6.1 Server

Úkolem serveru je přidělování výpočetních úloh připojeným klientským aplikacím, ukládání persistentních dat do databáze a komunikace s uživatelem skrze webovou aplikaci. Je naprogramován ve webovém frameworku Flask v jazyce Python a jeho adresářová struktura se dělí na následující moduly:



Obrázek 21: Architektura serveru ¹

- **api** – Definice REST a Socket API a zpracování příchozích požadavků. To zahrnuje autentizaci a autorizaci odesílatele a následné provedení operace v servisní vrstvě.

¹Vytvořeno autorem v <https://www.draw.io>.

- **config** – Konfigurace serveru (např. připojení k databázi). Základním konfiguračním souborem je `base.cfg`, který je použit automaticky. Bez nutnosti tento soubor měnit je možné vytvořit nový soubor (např. `test.cfg`) s novou konfigurací a pomocí argumentu při spuštění serveru nastavit, aby se použila tato konfigurace (`./src/main.py --env test`). [TODO]
- **constants** – Veškeré konstantní položky, ať už technického či fyzikálního typu.
- **service** – Servisní vrstva obsahující logiku serveru a manipulaci s databází.
- **utils** – Pomocné třídy uchovávající specifickou funkcionalitu.

6.1.1 REST API

K vytvoření rozhraní je nejdříve třeba nadefinovat příslušné struktury, které rozhraní bude očekávat nebo naopak vracet. Modul `fields` umožňuje určit složky jednotlivých struktur a taktéž pro ně nastavit pravidla jako např. maximální délka, datový typ nebo seznam povolených hodnot.

```
credentials = api.model("Credentials", {
    "email": fields.String(required=True, max_length=50),
    "password": fields.String(required=True, max_length=100)
})

user = api.model("User", {
    "name": fields.String(required=True, max_length=30),
    "role": fields.Integer(required=True, enum=UserRole.values())
})
```

Zdrojový kód 1: Vytvoření modelů v REST API.

Následně může dojít k nadefinování koncových bodů rozhraní. Koncovým bodem jsou metody jakékoliv třídy, jež je potomkem `Resource`, přičemž názvy metod třídy odpovídají názvům metod HTTP.

```
@api.route("/login")
class Login(Resource):

    @api.response(HttpStatus.OK, user)
    @api.response(HttpStatus.BAD_REQUEST, "Invalid credentials.")
    @api.expect(credentials)
```

```
def post(self, credentials):
    return user_service.authenticate(credentials)
```

Zdrojový kód 2: Vytvoření koncového bodu v REST API.

Veškeré vstupní parametry od uživatele jsou automaticky parsovány, při nesprávnosti vstupních parametrů je odeslána chybová odpověď a díky anotacím je také automaticky generována dokumentace REST API v nástroji Swagger UI dostupná na adrese `exoplanets.now.sh/api-docs`. Ukázka dokumentace REST API je umístěna v příloze [TODO] na konci dokumentu.

6.1.2 Socket.io API

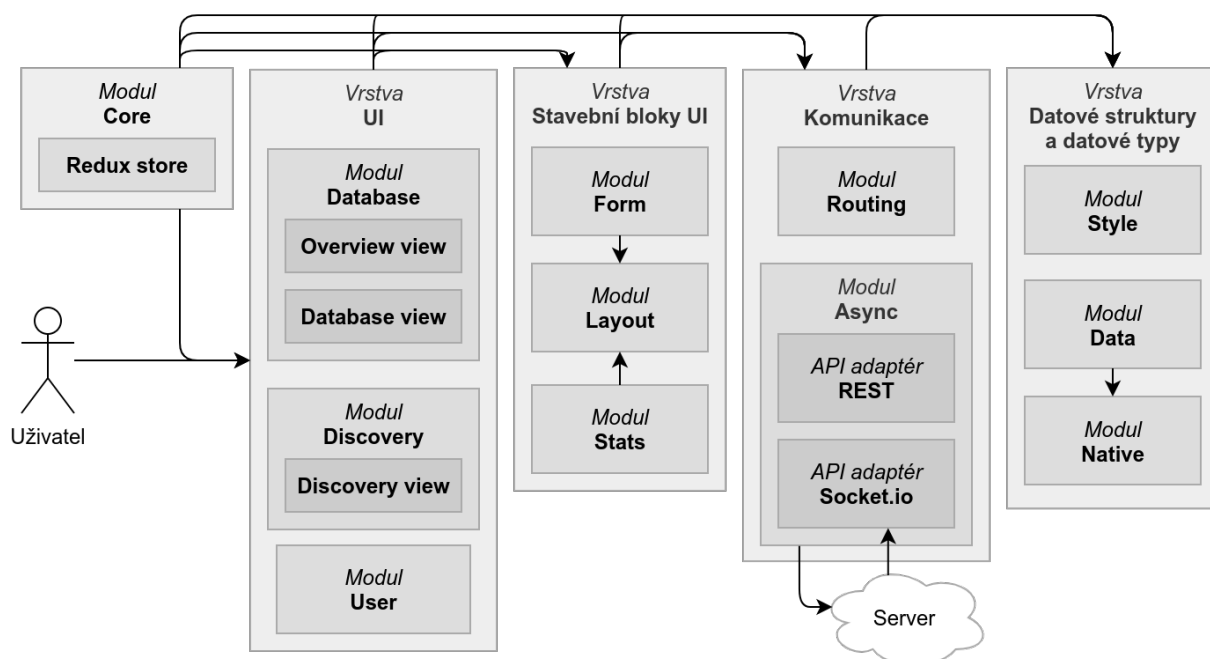
Protože je třeba v reálném čase synchronizovat webovou a klientskou aplikaci a umožnit serveru iniciovat s těmito aplikacemi komunikaci, server kromě rozhraní HTTP poskytuje také rozhraní Socket.io.

```
# Client:
@socketio.event
def process(task):
    print(f"Data processing from address {task['url']}...")

# Server:
task = {'type': "LIGHT_CURVE", "url": "http://exoplanetarchive.ipac"}
socketio.emit("process", task)
```

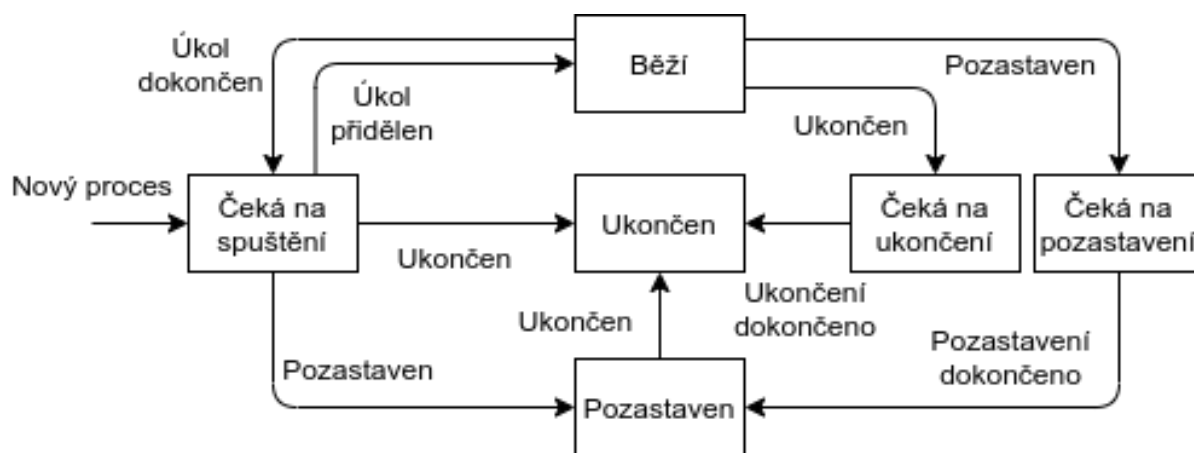
Zdrojový kód 3: Ukázka komunikace pomocí socket.io.

6.2 Webová aplikace



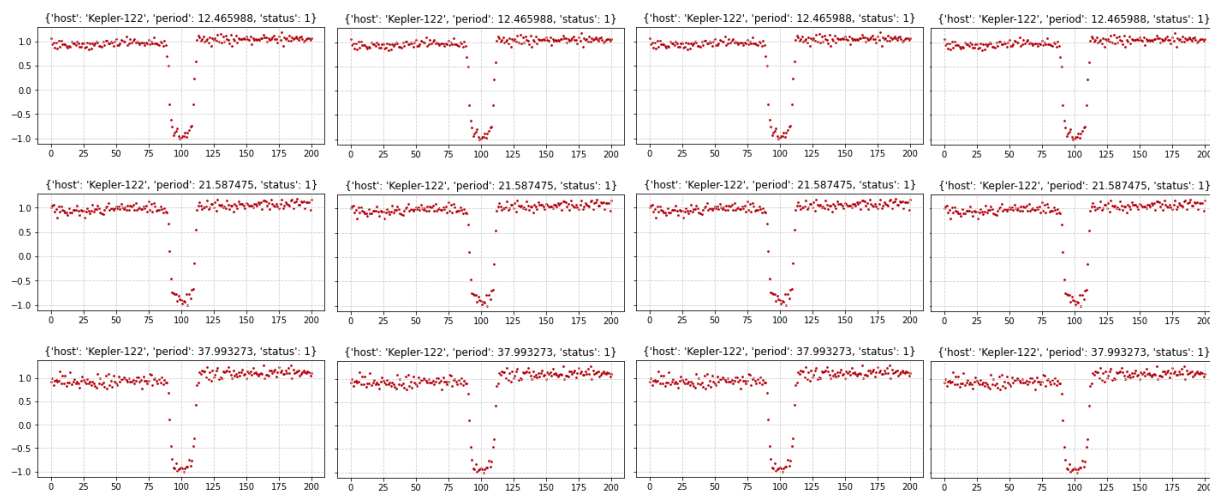
Obrázek 22: Architektura webové aplikace ¹

6.3 Klientská aplikace



Obrázek 23: Stavy procesů a přechody mezi nimi ¹
¹Vytvořeno autorem v <https://www.draw.io>.

6.4 Neuronová síť



Obrázek 24: Trénovací množina ¹

TODO: Odebrat osy a popisky z obrázku.

6.5 Databáze

6.6 Datasety

Většina dat se do databáze nevkládá manuálně, jelikož je třeba pracovat se stovkami tisíc či miliony datových položek. Namísto toho administrátor pouze definuje přístupový bod k nějakému datasetu dostupnému přes webové rozhraní a následně dojde k automatickému zpracování datasetu a všech položek v něm. Některé typy datasetů jsou určeny k jednorázovému uložení do databáze a není nutno je nijak dále zpracovávat. Zpracování jiných je naopak výpočetně náročné a připojené klientské aplikace tak činí postupně položku po položce. Jednotlivé typy datasetů jsou popsány níže.

U všech typů datasetů je také vyřešena situace, kdy by se jedna a ta samá položka (např. hvězda) nacházela ve dvou datasetech zároveň. V takovém případě dojde k uložení obou hodnot a uživatel v aplikaci pak bude vidět údaje dané položky z obou datasetů vedle sebe.

¹Vytvořeno autorem v <https://www.draw.io>.

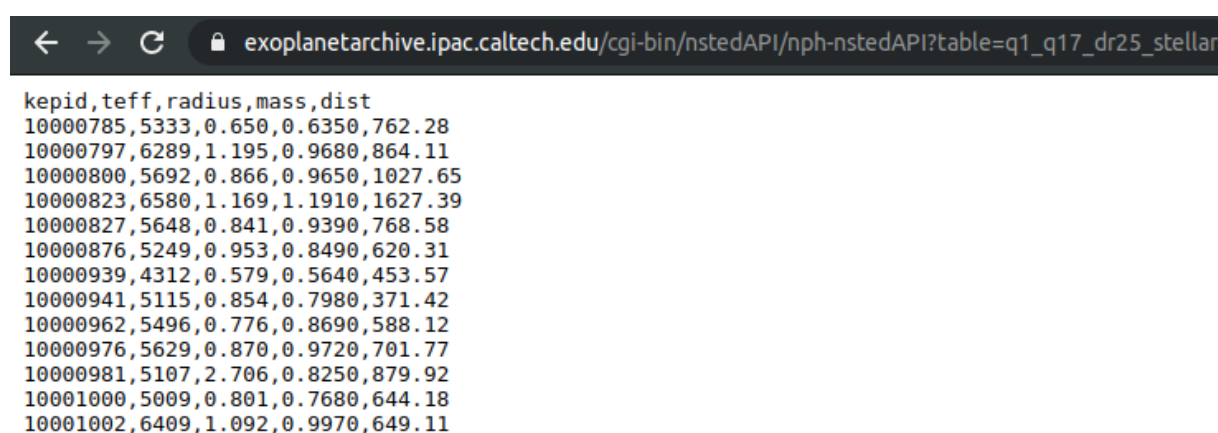
6.6.1 Target pixel files

6.6.2 Světelné křivky hvězd

6.6.3 Radiální rychlosti hvězd

6.6.4 Hvězdy

Informace o vlastnostech hvězd nejsou pro hledání exoplanet nutné, avšak pro spočítání dalších údajů o nalezené exoplanetě je třeba je zahrnout do výpočtů. Datasetsy tohoto typu jsou k dostání přes webová rozhraní nejčastěji ve formátu `csv`.



Obrázek 25: Část datasetu s vlastnostmi hvězd ¹

Tyto datasetsy neobnáší žádné další složité výpočty, pouze jsou společně s dopočítanými údaji jednorázově uloženy do databáze. Základními údaji, které jsou pro každou hvězdu třeba, jsou (šedou barvou jsou dopočítané údaje):

Název	Zdánlivá magnituda	Rovníkový průměr	Spektrální typ
Vzdálenost od Země	Hmotnost	Absolutní magnituda	Povrchová gravitace
Metalicita	Povrchová teplota	Průměrná hustota	Obyvatelná zóna

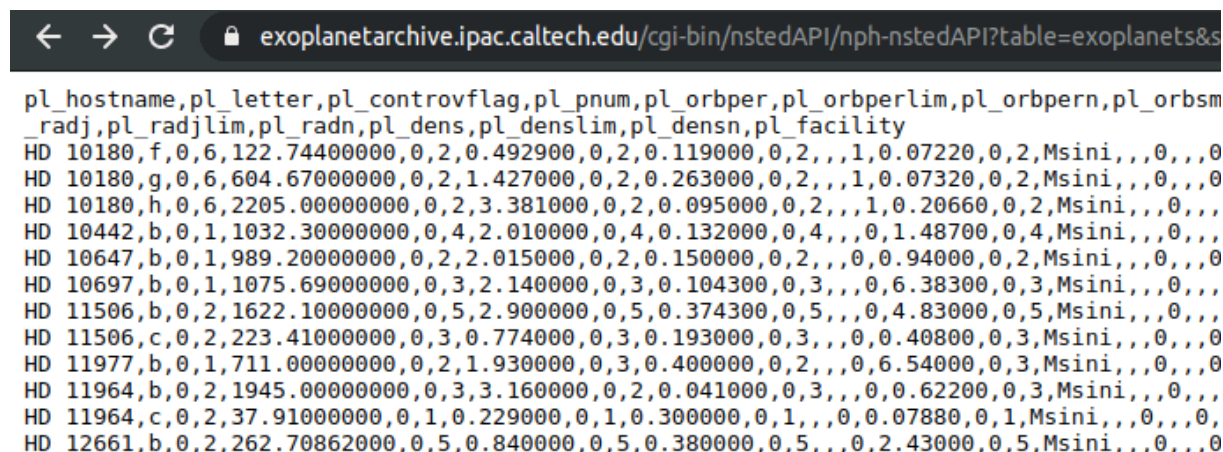
Tabulka 3: Údaje o hvězdách ukládané do databáze

Aplikace je postavena flexibilně a umožňuje libovolně namapovat sloupce z datasetů do sloupců v databázi. Datasetsy tak mohou mít pořadí i názvy jednotlivých sloupců libovolné.

¹Dataset pochází ze stránek <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.

6.6.5 Planety

Datasety s planetami nejsou pro běh aplikace taktéž nutné, protože veškeré informace o exoplanetách jsou vypočítány z jiných datasetů. Platí však, že čím více nezávislých zdrojů se na údajích o exoplanetě shodne, tím spíše budou tyto údaje platné. Proto je umožněno ukládat do databáze i datasety s údaji o planetách – mohou potvrdit nebo vyvrátit údaje vypočtené v rámci aplikace.



Obrázek 26: Část datasetu s vlastnostmi planet ¹

Opět se jedná o datasety nejčastěji ve formátu `csv`, které není nutno nijak složitě zpracovávat, pouze uložit do databáze.

Název	Povrchová teplota	Excentricita dráhy	Rovníkový průměr
Velká poloosa	Typ	Hmotnost	Perioda oběhu
Tranzit přes hvězdu	Průměrná hustota	Rychlost oběhu	Podmínky pro život

Tabulka 4: Údaje o planetách ukládané do databáze

6.6.6 Názvy

Často se stává, že jedno a to samé těleso je v různých datasetech pod různým označením.

K zamezení toho, aby byly tyto položky vedeny jako dvě různé soustavy je nutno aplikaci poskytnout informace o používaných názvech jednotlivých objektů. Právě k tomu slouží tento typ datasetů.

¹Zdroj: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.

²Zdroj dat: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=Kepler-10>.

Katalog	Účel	Označení Kepler-10
KIC (K epler I nput C atalog)	Hledání exoplanet (Kepler)	KIC 11904151
KOI (K epler O bject of I nterest)	Výběr z KIC	KOI-72
Kepler	Potvrzené exoplanety z KOI	Kepler-10
2MASS (2 Micron A ll- S ky S urvey)	Infra. průzkum oblohy	2MASS J19024305+5014286
GSC (G uide S tar C atalog)	Pozorování hvězd (Hubble)	GSC 03549-00354
Gaia DR (G aia D ata R elease)	Měření polohy hvězd (Gaia)	Gaia DR2 2132155017099178624
USNO-B1.0	Pozorování hvězd a galaxií	USNO-B1.0 1402-00324696
UCAC3	Pozorování hvězd	UCAC3 281-142262

Tabulka 5: Pojmenování soustavy Kepler-10 v různých katalozích ²

7 ROZVRŽENÍ APLIKACE

7.1 Přehled

7.2 Databáze

7.3 Detail systému

Na jediné stránce jsou shrnuty všechny známé informace o systému. Kromě hodnot veličin hvězdy a případných planet jsou zde zaznamenána všechna pozorování, vizuální porovnání velikostí a vzdáleností oproti sluneční soustavě, seznam referencí a v poslední řadě také interaktivní 3D model systému.

7.4 Objevování

7.5 Náповěda

7.6 Autentizace

ZÁVĚR

TODO: Verifikace výsledků.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LOVIS, Christophe, FISCHER, Debra A. Radial Velocity Techniques for Exoplanets. *University of Arizona Press*. [online]. 2011. [cit. 25. 12. 2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/253789798_Radial_Velocity_Techniques_for_Exoplanets
- [2] MARCY, Geoffrey. The planet around 51 Pegasi. *The astrophysical journal* 481(2). [online]. 1997. [cit. 29. 12. 2019]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/304088>
- [3] PERRYMAN, Michael. Extra-solar planets. *Reports on Progress in Physics* 63(8). [online]. 31. 5. 2000. [cit. 8. 10. 2020]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0005602>
- [4] SHALLUE, Christopher, VANDERBURG, Andrew. Identifying Exoplanets with Deep Learning: A Five-planet Resonant Chain around Kepler-80 and an Eighth Planet around Kepler-90. *The Astronomical Journal* 155(2). [online]. 30. 1. 2018. [cit. 8. 10. 2020]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aa9e09>
- [5] Metody objevování planet. *Astronomia*. [online]. 23. 1. 2013. [cit. 23. 12. 2019]. Dostupné z: <http://hvezdy.astro.cz/exoplanety/51-metody-objevovani-planet>
- [6] NASA Exoplanet Archive. *NASA Exoplanet Science Insititute*. [online]. 12. 8. 2019. [cit. 25. 12. 2019]. Dostupné z: https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/API_exoplanet_columns.html
- [7] Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173. *nrel*. [online]. ???. ?. ????. [cit. 27. 12. 2019]. Dostupné z: <https://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>
- [8] TESS Exoplanet Mission. *NASA*. [online]. 24. 8. 2020. [cit. 8. 10. 2020]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/about-tess>

- [9] Detection and characterization of extrasolar planets: the transit method. ??? [online]. 2005. [cit. 8. 10. 2020]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.125.4155&rep=rep1&type=pdf>

Exoplanets data http://exoplanets.org/detail/alpha_Cen_B_b

Wavelength <http://spiff.rit.edu/classes/phys240/lectures/expand/expand.html>

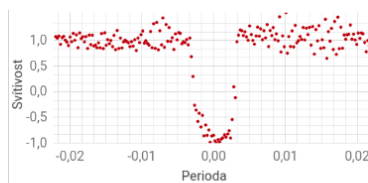
TODO: Doplň reference ze zadání diplomové práce.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	Architektura neuronové sítě	47
-----------	-----------------------------------	----

PŘÍLOHA A – ARCHITEKTURA NEURON. SÍTĚ

Conv1D		<i>Input: 1001x1</i>
Filters: 16	Kernel: 3	<i>Output: 1001x1</i>
Stride: 1		Activation: ReLu

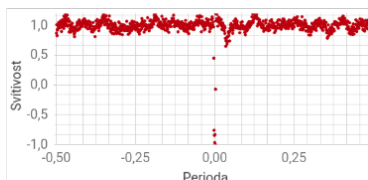


Conv1D		<i>Input: 1001x1</i>
Filters: 16	Kernel: 3	<i>Output: 1001x1</i>
Stride: 1		Activation: ReLu

MaxPool1D		<i>Input: 1001x1</i>
Pool: 2	Stride: 1	<i>Output: 999x16</i>

MaxPool1D		<i>Input: 1001x1</i>
Pool: 2	Stride: 1	<i>Output: 999x16</i>

Conv1D		<i>Input: 1001x1</i>
Filters: 16	Kernel: 3	<i>Output: 1001x1</i>
Stride: 1		Activation: ReLu



Conv1D		<i>Input: 1001x1</i>
Filters: 16	Kernel: 3	<i>Output: 1001x1</i>
Stride: 1		Activation: ReLu

MaxPool1D		<i>Input: 1001x1</i>
Pool: 2	Stride: 1	<i>Output: 999x16</i>

MaxPool1D		<i>Input: 1001x1</i>
Pool: 2	Stride: 1	<i>Output: 999x16</i>

Conv1D		<i>Input: 1001x1</i>
Filters: 16	Kernel: 3	<i>Output: 1001x1</i>
Stride: 1		Activation: ReLu

Conv1D		<i>Input: 1001x1</i>
Filters: 16	Kernel: 3	<i>Output: 1001x1</i>
Stride: 1		Activation: ReLu

MaxPool1D		<i>Input: 1001x1</i>
Pool: 2	Stride: 1	<i>Output: 999x16</i>

MaxPool1D		<i>Input: 1001x1</i>
Pool: 2	Stride: 1	<i>Output: 999x16</i>

Flatten	<i>Input: 1001x1</i>	
	<i>Output: 1001</i>	

Flatten	<i>Input: 1001x1</i>	
	<i>Output: 1001</i>	

Concatenate		<i>Input: 1001x1</i>
		<i>Output: 1001</i>

Dense		<i>Input: 1001x1</i>
Neurons: 16	Activ.: Tanh	<i>Output: 999x16</i>

Dropout		<i>Input: 1001x1</i>
		<i>Output: 1001</i>

Dense		<i>Input: 1001x1</i>
Neurons: 16	Activ.: Tanh	<i>Output: 999x16</i>