

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra etologie a zájmových chovů



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

Numerické kompetence a symbolické operace u primátů

Bakalářská práce

Kristýna Mezerová

Speciální chovy

Vedoucí práce: PhDr. RNDr. Tereza Nekovářová, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Numerické kompetence a symbolické operace u primátů" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20. 4. 2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí mé práce, PhDr. RNDr. Tereze Nekovářové, Ph.D., za ochotu, trpělivost a cenné informace.

Numerické kompetence a symbolické operace u primátů

Souhrn

Tato bakalářská práce si kladla za cíl představit a shrnout problematiku numerických kompetencí a symbolických operací u primátů s důrazem na metodické přístupy používané při práci s těmito zvířaty.

První část vycházela zejména z teoretických odborných textů věnujících se tématům kognice a podstaty numerických kompetencí nejen u primátů, ale i jiných druhů zvířat. Vysvětlila terminologii používanou v odborné literatuře a základní hypotézy týkající se mentální reprezentace početnosti, tedy způsobu, jakým primáti vnímají množství. Tato dílčí oblast výzkumu numerických kompetencí u zvířat přitom vychází ze základního problému, a tím je absence schopnosti využívat pro reprezentaci početnosti číselný systém, který je u lidí spojený s užíváním jazyka jako prostředku pro vyjadřování, ale také vnímání množství. Poměrně velký důraz byl v této práci kladen na rozdíl mezi laboratorními a přirozenými podmínkami, v jakých lze s primáty pracovat. I z toho důvodu byla součástí teoretického základu ekologická funkce numerických kompetencí.

Druhá část byla věnována příkladům konkrétních experimentů a použitých metodických přístupů zabývajících se různými oblastmi numerických kompetencí (relativní početnost, sumace, ordinalita, symbolická reprezentace početnosti) u různých druhů primátů. Byly zde popsány konkrétní cíle, metodiky a výsledky vybraných prací. Ve shrnutí pak byly zdůrazněny výstupy, na kterých se autoři shodují, a které považují za nejdůležitější.

Statistické výsledky několika prací poukázaly na to, že primáti vnímají početnost prostřednictvím *analogue magnitude system*. To znamená, že jsou vnímaná množství zachycována v mysli jako neurčité množiny bez absolutní hodnoty, které lze mezi sebou porovnávat, ale třeba i sčítat. Dále se ukázalo, že i bez předchozího tréninku primáti zvládají jednoduché numerické úlohy s počtem stimulů menším než 4, jejichž základní princip vychází z porovnávání množství. Pomocí tréninku pak dochází k rozvíjení těchto schopností, což prokazují experimenty, ve kterých různé druhy primátů operovaly až s 10 stimuly. V několika studiích se nakonec autoři zaměřili na schopnost primátů naučit se symboly reprezentující množství, nejčastěji přímo čísla, a s nimi následně provádět základní matematické operace. I tato kompetence byla u některých druhů a do určité míry prokázána, přičemž nejvíce se opravdovému počítání přiblížili šimpanzi.

Klíčová slova: numerické kompetence, primáti, symbolické operace, početnost, metodické přístupy

Numerical Competence and Symbolic Operations in Primates

Summary

The main aim of the present bachelor thesis was to present and sum up the theme of numerical competence and symbolic operations in primates with a focus on methodical approaches used within the work with these animals.

The first part was based mainly on theoretical scientific texts focused on cognition and numerical competencies in primates but also in other animal species. I explained the terminology used in scientific literature and the fundamental hypothesis concerning the mental representation of numerosity, which means the way of the quantity perception of primates. This constituent area of the numerical competence research bases on the fundamental issue: the absence of the animal use of the numerical system which is associated with language as an expression and perception tool.

In the present thesis, relatively great importance was attributed to the difference between laboratory and natural conditions during the work with animals. That's also why one part of the theoretical base focused on the ecological function of numerical competence.

The second part was dedicated to concrete examples of experiments and methodical approaches dealing with different areas of numerical competence (relative numerosity judgement, summation, ordinality, symbolic number representation). Thus were described concrete goals, methods and results of chosen studies. In the general conclusion, I focused on several findings confirmed by multiple authors that I consider the most important. Statistical results of several studies showed that primates use the *analogue magnitude system* to represent quantities. That means that those quantities are mentally captured in the form of abstract magnitudes without an absolute value that can be compared and also for example added up. For more, it has shown that primates without previous training can deal with simple numerical tasks based on the principle of the quantity comparison with the number of stimuli <4 . Due to the training, those abilities can be developed which is confirmed thanks to experiments with the number of stimuli up to 10. Several studies were finally focused on the primate competence to learn symbols representing quantities, most often numbers, and to use them under the terms of mathematic operations. This ability was also confirmed in some primate species with certain limits. The best performance was observed in chimpanzees whose performance is the closest to the real counting process.

Keywords: numerical competence, primates, symbolic operations, numerosity, methodical approaches

Obsah

1 Úvod	8
2 Cíl práce	9
3 Literární rešerše	10
3.1 Teoretické poznatky o numerických kompetencích u primátů	10
3.1.1 Definice a základní pojmy	10
3.1.2 Vnímání početnosti - mentální reprezentace	12
3.1.3 Numerické kompetence v přirozeném a v laboratorním prostředí	14
3.1.4 Numerické kompetence z evolučního a ekologického hlediska	15
3.2 Přehled praktických studií numerických kompetencí primátů	17
3.2.1 Oblasti výzkumu numerických kompetencí primátů	17
3.2.2 Relativní početnost	18
3.2.2.1 Příklad experimentu č. 1: relativní početnost	18
3.2.2.2 Příklad experimentu č. 2: relativní početnost	21
3.2.2.3 Relativní početnost u dalších druhů primátů	24
3.2.3 Sumace.....	25
3.2.3.1 Příklad experimentu č. 3: sumace, metodika <i>violation of expectancy</i>	26
3.2.3.2 Sumace u dalších druhů primátů.....	29
3.2.4 Ordinalita	31
3.2.4.1 Příklad experimentu č. 4: relativní početnost a ordinalita	31
3.2.4.2 Příklad experimentu č. 5: ordinalita.....	33
3.2.4.3 Ordinalita u dalších druhů primátů	37
3.2.5 Symbolické reprezentace početnosti.....	37
3.2.5.1 Příklad experimentu č. 6: Symbolické reprezentace početnosti	38
3.2.5.2 Další úlohy symbolické reprezentace početnosti zkoumané u šimpanzů	39
3.2.5.3 Symbolické reprezentace početnosti u dalších druhů primátů.....	40
3.2.6 Shrnutí.....	42
4 Závěr	46
5 Literatura	48

1 Úvod

Non-humánní primáti jsou jako nejbližší příbuzní člověka zkoumáni v nejrůznějších oblastech kognice. Numerické kompetence a s nimi související symbolické operace jsou tématem, kterému se primatologové věnují již několik desítek let. Prostřednictvím různorodě navrhovaných experimentů se tak snaží zjistit, zda jsou primáti schopni *počítat*; tedy provádět operace s čísly. Toto zdánlivě jednoduché a jasné spojení („operace s čísly“) je ale ve skutečnosti mnohem komplexnější, než by se na první pohled mohlo zdát. V případě člověka je počítání realizováno prostřednictvím číselného systému. Číslo jako takové je tedy součástí vytvořeného konceptu, který souvisí s užíváním jazyka, jelikož pro jednotlivé hodnoty existuje konkrétní pojmenování. Svůj původ má ale počítání v jistých mentálních mechanismech na jazyku nezávislých (Gallistel & Gelman 1992). Tyto mechanismy využívají pro vnímání početnosti zvířata, ale také malé děti, které ještě jazyk neovládají.

Mezi numerické kompetence nepatří jen samotné počítání, které můžeme považovat za nejkompexnější operaci, ale také jednodušší úlohy založené na primární schopnosti odhadu a porovnání množství. Takto bylo definováno několik pojmů (protonumerické kompetence, subitizace, estimace) popisujících numerické operace odehrávající se v mozku na základě vizuálního či jiného vjemu (Davis & Pérusse 1988)

Autoři odborných publikací zkoumají numerické kompetence na různých úrovních; od základního vnímání relativní početnosti, přes schopnost řazení množství (ordinality) a sumace, až po samotné symbolické operace, tedy využívání číselných či jiných symbolů při numerických úlohách. Často zkoumanými druhy jsou přitom makaci rhesus (*Macaca mulatta*), šimpanzi (*Pan troglodytes*), malpy hnědé (*Cebus apella*), ale i další primáti. Ve všech zmíněných kategoriích dosahují tyto druhy určité úrovně. Důležitým faktorem je přitom rozdíl mezi přirozeným a laboratorním prostředím. V laboratořích jsou jedinci stimulováni k rozvíjení kognitivních schopností, takže je možné je vystavovat složitějším úlohám a zkoumat, co všechno je možné je naučit. Experimenty prováděné s volně žijícími zvířaty zase přináší důležité poznatky o jejich vrozených schopnostech, které mohou být důležité z hlediska ekologie druhu (Nieder 2000).

Tato práce vychází z teoretických textů a prakticky zaměřených experimentů věnovaných tématu numerických kompetencí u primátů publikovaných v odborné literatuře. Konkrétní popsání pokusů jsou rozřazeny pro přehlednost do čtyř kategorií podle typu úloh, na které jsou zaměřeny: relativní početnost, sumace, ordinalita a symbolická reprezentace početnosti. Popis cílů, metodik a výsledků jednotlivých experimentů slouží zejména k představení různých metodických přístupů v rámci zkoumání numerických kompetencí a symbolických operací u primátů, zároveň je ale také snahou shrnout jednotlivé výstupy a odpovědět na otázku, jaké úrovně v této oblasti uvedené druhy dosahují.

2 Cíl práce

Cílem této kompilační práce bylo sepsat výběrový literární přehled zaměřený na numerické kompetence u non-humánních primátů, především na možné metodické přístupy jejich zkoumání. Tomuto tématu bylo věnováno mnoho teoretických textů a praktických experimentů majících za cíl odpovědět na otázky, jakým způsobem primáti rozlišují jednotlivá množství, zda ovládají základní aritmetické operace, či do jaké míry jsou schopni pochopit koncept číselného systému používaného lidmi. Proto měla tato práce sloužit jako ucelené shrnutí základních myšlenek a výstupů těchto prací.

Nebylo možné zahrnout do této práce veškeré poznatky, k jakým autoři odborných textů dospěli, proto jsem se nejprve pokusila shrnout alespoň základní body, pojmy a hypotézy, které toto téma definují. Přehled teoretických základů byl nezbytný pro orientaci v celé problematice a pochopení motivace autorů jednotlivých experimentů.

Dalším cílem bylo právě představení konkrétních příkladů studií zaměřených na různé oblasti numerických kompetencí u některých druhů primátů. Detailní popis několika experimentů stejně jako stručné uvedení dalších prací mělo sloužit zejména jako prostředek k seznámení s různými metodickými přístupy používanými pro výzkum numerických kompetencí a symbolických operací u primátů.

3 Literární rešerše

3.1 Teoretické poznatky o numerických kompetencích u primátů

3.1.1 Definice a základní pojmy

Termín numerické kompetence je například ve slovníku Americké psychologické asociace definován jako „*schopnost některých non-humánních zvířat identifikovat kardinální čísla spojená s různými množstvími objektů a řadit tato čísla ve správném pořadí*“¹. Tato nabízená definice se konkrétně zmiňuje o zvířatech, schopnost pracovat s čísly ale není pochopitelně jejich specifickou charakteristikou, ba právě naopak. Úroveň numerických kompetencí jako kognitivních schopností dosahuje vrcholu v lidském mozku. Člověk jako jediný dokáže pracovat s číslem jako symbolem, abstraktním i konkrétním vyjádřením počtu/množství, což mu umožňuje realizovat vyšší a složitější matematické a logické operace (Nieder 2005). Odborné zdroje se však shodují na tom, že z evolučního hlediska prochází i numerické kompetence vývojem. Proto bývají předmětem zkoumání a porovnávání v různých stádiích: u dospělých lidí, u dětí, a nakonec u zvířat, z nichž jsou nejčastěji zmiňováni právě non-humánní primáti (Volk & Parhami 2020; Nieder & Dehaene 2009; Kersey & Cantlon 2007). Vzhledem k tomu, že člověk patří z taxonomického hlediska do skupiny primátů, studium ostatních zástupců tohoto řádu je zajímavé a podstatné jak ze srovnávacího hlediska, tak z důvodu vysokého stupně kognice těchto zvířat, který je stejně jako u člověka založen na anatomických a fyziologických predispozicích (Roth & Dicke 2012).

V rámci numerických kompetencí je definováno několik základních úkonů či kognitivních operací, které se liší podle složitosti.

1. Protonumerické kompetence

Tímto pojmem, v jejich pojetí nazvaným *relative numerosness judgments*, se detailně zabývají autoři Davis & Pérusse (1988). Protonumerické kompetence jsou podle nich nejjednodušší úkony, které souvisí s numerickými operacemi. Nejedná se o počítání jako takové, ale o kognitivní schopnost vnímání nerovnosti a rozlišování mezi větším a menším množstvím, což můžeme shrnout pod pojem relativní početnost. Při takovém porovnávání nehrají roli absolutní hodnoty, nejedná se ani o operace s čísly, pouze o rozhodování mezi větší a menší kvantitou objektů, kterými mohou být různé stimuly, nejčastěji však kousky potravy. Podle autorů je pro subjekty jednodušší vyřešit takovou úlohu relativní početnosti, ve které se jedná o malé a zároveň zřetelně odlišné množství (např. 2 stimuly vs. 8 stimulů).

Práci zmíněných dvou autorů se inspirovali například vědci z Georgie v Atlantě, kteří zkoumali relativní početnost na gorilách, konkrétně jejich vrozenou schopnost identifikace rozdílného množství stimulů. Během tohoto experimentu se ale ukázalo, že gorily volily větší počet stimulů až po specifickém tréninku, který experimentu předcházel (Anderson et al. 2005).

¹ Vlastní překlad definice k heslu *numerical competence*

1. Subitizace

Termín subitizace (*subitizing*) se používá pro operaci, kdy je v krátkém časovém úseku přiřazena k setu stimulů numerická hodnota, aniž by vyloženě došlo k počítání. Termín, který se dnes objevuje v různých odborných zdrojích, navrhuje E. L. Kaufman ve své publikaci z roku 1949. Prezentuje tento pojem jako vhodné pojmenování pro kognitivní operaci, která se svou podstatou odlišuje od estimace a počítání/*counting* (tyto pojmy budou vysvětleny posléze) a spočívá v rychlosti a přesnosti. Podle Kaufmana et al. (1949) je tato operace realizována při počtu stimulů, který je menší než 6. Nieder (2005) tuto hranici snižuje na 4 stimuly. I další autoři, například von Glasersfeld (1982), popisují mechanismus subitizace, přičemž uvádí, že se jedná o záležitost percepce, tedy rychlou identifikaci setu stimulů na základě předchozí zkušenosti prostřednictvím jeho vizuálního zhodnocení.

2. Estimace

Kaufman (1949) předkládá termín estimace ve srovnání s výše zmíněnou subitizací. Rozdíl mezi nimi přitom podle něj spočívá v tom, že o estimaci se jedná v případě, že je počet stimulů větší než 6. Přestože se dá říci, že v obou případech se jedná o odhad hodnoty (v případě subitizace rychlejší a přesnější), Daviss & Pérusse (1988) zmiňuje autory Klahra & Wallace (1973), podle kterých k estimaci nemůže docházet bez znalosti čísel, tedy bez schopnosti dopočítat se hodnoty, která je odhadována. Jak autoři správně zmiňují, jejich teorie je v kontrastu s předpokladem, že je estimace z pohledu kognice jednodušší operací než samotné počítání.

3. Counting

Counting, neboli počítání, je proces při kterém je uvažováno absolutní množství prvků v množině (Davis & Pérusse 1988). Na rozdíl od předchozích operací, které vychází z krátké percepce celku, u počítání dochází k uvědomování si každého jednotlivého prvku a jeho zařazení do setu. Nelze dospět k celkovému výsledku, aniž byl uvážěn každý člen samostatně. Právě proto je podle Davise & Pérusse (1988) počítání kompetencí pevně spjatou s ovládnutím jazyka, jelikož pro každý z členů existuje konkrétní forma a její pojmenování (číslo). Z toho důvodu také schopnost počítání v pravém slova smyslu tuto autoři přisuzují pouze lidem. Podle Gelmana & Gallistela (1992) ale může existovat i forma, které je na jazyce nezávislá, a tedy může fungovat pro vyjádření početnosti u zvířat a malých dětí, které ještě jazyk neovládají. Autoři takovou formu nazývají *numeron*. V protikladu k pojmu *numerlog*, který v zásadě označuje číslovku, se jedná o jakousi reprezentaci nějaké hodnoty vytvořenou myslí, aniž by se jednalo o lingvistický symbol (Gelman & Gallistel 1978 v Davis & Pérusse 1988). Příkladem může být třeba gesto nebo pohyb částí těla. Z toho pak vyplývá, že schopnost počítání/*counting* není nezbytně závislá na schopnosti užívání jazyka. Stejně tak vyjadřování pomocí jazyka nutně neznamená existenci číselného systému v rámci komunity. Přestože vycházíme z obecného pojetí, že určování přesných číselných hodnot pomocí konkrétních slov je vlastní lidem, Nieder (2005) se zmiňuje o domorodých komunitách žijících v Jižní Americe, u nichž se takový systém nevyvinul. Místo toho používají pouze výrazy pro určení například velmi malého nebo naopak většího množství.

Counting/počítání souvisí s následujícími dvěma termíny:

Kardinalita – Lyons & Beilock (2013) uvádí snad nejjednodušší vysvětlení tohoto pojmu: „*Kardinalita odpovídá na otázku, Kolik?*“² Je to tedy absolutní hodnota vyjadřující skutečné a přesné množství daných prvků, která je běžně vyjádřena číslovkou, tedy slovem nebo jeho symbolem. Toto tvrzení potvrzuje teorii, že je počítání neoddělitelně spjata s jazykem.

Ordinalita – Ordinalita na rozdíl od předchozího pojmu odpovídá na otázku „*kolikátý?*“ (Lyons & Beilock 2013). Určuje tedy pořadí a přináší informace o tom, jaké mají mezi sebou dané hodnoty vztahy (větší – menší).

Mezi numerickými operacemi se v souvislosti se schopnostmi primátů, ale také dalších zvířat, objevuje ještě jeden termín, a to transitivita. Tato operace souvisí s ordinalitou a vychází z logického odvozování vztahů mezi prvky, přičemž na základně chápání vztahu mezi dvěma dvojicemi objektů lze vyvodit vztah mezi těmi objekty, které nejsou primárně a explicitně srovnávány. Davis & Pérusse (1988) opět uvádí konkrétní příklad tohoto vztahu: „*Pokud je A vyšší než B a B je vyšší než C, je vyšší A nebo C?*“³ Následně vysvětlují, že ačkoli neexistuje přímý důkaz toho, že správná odpověď je „A“, logicky se nabízí.

3.1.2 Vnímání počtenosti - mentální reprezentace

V předchozí části byl nastíněn problém související s definicí *counting*, které je podle některých autorů realizovatelné pouze pomocí jazyka. Numerický systém, který vytváří v naší mysli číselné hodnoty, je pevně spjatý s jazykem a je pro nás samozřejmostí. Zvířata ale takový systém nevyužívají, proto se mnohé odborné práce zabývají problematikou reprezentace počtenosti. Z pohledu kognitivního vývoje zkoumají, jaké jsou pre-lingvistické předpoklady pro porozumění a ovládnutí číselného systému, a jaké kognitivní procesy jsou jeho prekurzory u zvířat, ale také u malých dětí (např. Gellman & Gallistel 1992, Cantlon et al. 2010; Frank et al. 2012).

Intenzivně se tímto tématem zabývá Andreas Nieder, který také publikoval několik textů. Tato práce se opírá zejména o jeho review z roku 2005 a 2020. Autor vychází ze zásadního limitu schopnosti vnímání počtenosti u zvířat. Tím je skutečnost, že na rozdíl od lidí (vynecháme-li výše zmíněné domorodé komunity), jimž použití jazyka umožňuje různým hodnotám přisoudit konkrétní reprezentaci v podobě určitého čísla s jedinečným a nezaměnitelným významem, zvířata nechápou koncept “čísla” a jeho symboliku, neuvědomují si jeho přenosnost a vůbec celou podstatu číselného systému.⁴ Přesto jsou ale schopna do určité míry vnímat množství, odhadovat jej a porovnávat, a to pomocí následujících dvou systémů.

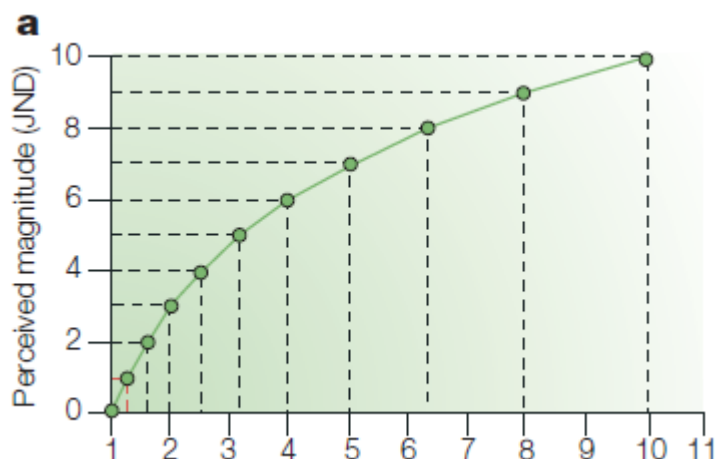
² Vlastní překlad citace

³ Vlastní překlad citace

⁴ Zde se jedná o obecné tvrzení. Jak bude popsáno v dalších částech práce, primáty jsou schopni pochopit význam číselných a jiných symbolů, nicméně se stále jedná a naučené spojení mezi hodnotou a symbolem, nikoli o pochopení a uvědomění si celého systému.

A) Analogue magnitude system

První z možných systémů vnímání početnosti u zvířat se označuje jako *analogue magnitude system*⁵. Tento mechanismus funguje pomocí magnitud, tedy jakýchsi jednotek, které v mysli zvířete odráží velikost množiny neboli počet prvků v množině. Důležité je, že se nejedná o konkrétní hodnoty, ale o nepřesné mentální reprezentace skutečných kvantit. Charakteristiky tohoto systému odpovídají pravidlům tzv. Weber-Fechnerova zákona, který definoval německý psycholog E. H. Weber a později dále rozpracoval fyzik a psycholog G. T. Fechner. Tento zákon se dá aplikovat v rámci různých oborů, zde ovšem vysvětluje dva principy nonverbálního vnímání početnosti. První, označený jako *numerical distance efekt* popisuje Nieder (2020) takto: “*podobné numerické hodnoty je obtížné rozlišit, schopnost rozlišení se však systematicky zlepšuje, čím jsou od sebe číselné hodnoty odlišnější (či vzdálenější).*”⁶ Druhý princip, *numerical size effect*, je vysvětlován tak, že porovnáváme-li dvě kvantify, bude jejich rozlišení tím složitější, čím vyšší bude absolutní hodnota srovnávaných množin. V praxi to znamená, že je například jednodušší určit rozdíl mezi 2 a 3 prvky než mezi 19 a 20 prvky, a to proto, že relativní rozdíl je v prvním případě podstatně větší, a tedy snáze zaznamenatelný. Rozhodujícím prvkem je tedy v takovém případě poměr mezi porovnávanými hodnotami označovaný jako *ratio*. Tento princip znázorňuje následující graf (obr. 1).



Obr. 1: Znázornění skutečného a vnímaného rozdílu mezi hodnotami. Vodorovná osa znázorňuje skutečný počet prvků, svislá pak tzv. just noticeable difference, tedy to, jak subjekt dané množství vnímá. Výsledná křivka zobrazuje, že při zvyšujícím se počtu prvků se postupně zmenšuje rozdíl mezi množstvím, jaké vnímá subjekt. Zdroj: Nieder 2005

B) Object tracking system

Druhý systém, který by mohl být podle dosavadních poznatků uplatňován při vnímání početnosti u zvířat, se nazývá *object tracking system*⁷. Jeho princip spočívá ve vnímání několika

⁵ Termín *analogue magnitude system* užívá např. Sulkowski & Hauser (2000) nebo Nieder (2005). Ekvivalentem může být termín *analog numerical representation* (Beran 2007), případně *approximate number system* (Nieder 2020).

⁶ Vlastní překlad citace

⁷ Opět existuje různá terminologie: Nieder (2005; 2020) užívá spojení *object tracking system*, jiní autoři (např. Sulkowski & Hauser 2000 nebo Anderson et al. 2005) preferují pojem *object file model/system*.

jednotlivých prvků zároveň. Podle definice Piazzzy (2011) se „jedná o mechanismus, kterým jsou objekty reprezentovány jako jednotlivé prvky sledovatelné v čase a prostoru.“⁸ V případě početnosti je možné interpretovat tuto definici tak, že subjekty jsou schopné sledovat a uvědomovat si existenci více jednotlivých prvků zároveň, aniž by při tom potřebovaly chápat jejich počet. Vracíme se zde k již dříve vysvětlenému pojmu *subitizing*, tedy určení množství na základě krátké prezentace vizuálního vjemu. Ten je v mnoha případech používán jako ekvivalentní či přinejmenším úzce spojený s *object tracking system* (Nieder 2005; Piazza 2011; Agrillo & Bisazza 2015). Jak již bylo řečeno, u Kaufmana et al. (1949) najdeme jako horní kvantitativní hranici pro *subitizing* 6 prvků. Jiní autoři ale později tuto hranici snížili na počet 3 až 4 prvků (Madler & Shebo 1982; Nieder 2005). Takto je tedy teoreticky limitováno také vnímání početnosti prostřednictvím *object tracking system*.

Přestože je tento systém považovaný za možný způsob mentální reprezentace malého množství prvků u zvířat, vanMarle (2015) poukazuje na zajímavou myšlenku. Podle autorky *object tracking system* ve své definici nesplňuje kritéria pro to, aby mohl fungovat jako abstraktní reprezentace čísla/početnosti, a to z toho důvodu, že při něm dochází k percepci vizuálního vjemu spojeného s konkrétními existujícími objekty. Na rozdíl od *analogue magnitude system*, při kterém si zvíře vytváří abstraktní odraz nějakého množství, zde není nutné, aby si dané objekty spojovalo s určitou hodnotou, jelikož je jednoduše schopné je identifikovat a tudíž rozeznat. Na základě tohoto tvrzení by tedy *object tracking system* neměl být považován za možný mechanismus vnímání početnosti.

Teoreticky by mohly být při mentální reprezentaci početnosti uplatňovány oba výše popsané systémy. Pro počet prvků menší než 4 by to byl *object tracking system*, pro vyšší hodnoty pak *analogue magnitude system* (Sulkowski & Hauser 2000). Nieder (2020), který se ve svých pracích vyjadřuje pochybnosti o relevantnosti *object tracking system*, a zároveň se zabývá shrnutím dosavadních poznatků o této problematice, ale tvrdí, že „většina dat získaných na základě spontánního chování zvířat, a veškeré behaviorální a neuronální výsledky zvířat podrobených diskriminačním úlohám v kontrolovaných podmínkách, mluví ve prospěch jediného systému enumerace, a to *analogue magnitude system*.“⁹

3.1.3 Numerické kompetence v přirozeném a v laboratorním prostředí

Díky experimentům prováděným na různých zástupcích zvířecí říše, ať už se jedná o ptáky (např. Scarf et al. 2001) nebo savce (např. Boysen & Berntson 1989; Brannon & Terrace 2000; Suzuki & Kobayashi 2000) se dá tvrdit, že zvířata dosahují určité kapacity v oblasti numerosity. Otázkou ovšem je, do jaké míry mohou být tyto schopnosti vrozené a do jaké míry naučené. Pokud se jedná o zvířata v experimentu, už od dob chytrého Hanse je známo, že to, co se v případě zvířecí performance může zdát jako důkaz určité numerické kompetence, může být ve skutečnosti výsledkem dlouhodobého tréninku, samotné přípravy na testování, a také reakce na chování experimentátora. Podle Niedera (2005) se jedná o oprávněnou obavu také z toho důvodu, že subjekty v experimentu mohou v laboratoři

⁸ Vlastní překlad citace

⁹ Vlastní překlad citace

reagovat jinak na podněty, se kterými se již setkaly, a se kterými jsou zvyklé pracovat, než na podněty cizí.

Laboratorní podmínky ale na druhou stranu umožňují práci s moderními a propracovanými metodami, díky kterým je možné testovat, zda jsou trénovaná zvířata schopna složitějších numerických operací. Díky pretréninku mohou být podrobována komplikovanějším úkolům, které mají za cíl prokázat nikoliv pouze naučenou schopnost daného subjektu spojenou s mechanickým určováním početnosti, ale také porozumění vztahů mezi hodnotami. U zvířat v laboratořích je nakonec možné rozvíjet jejich schopnosti, a tím objevovat, jaké úrovně kognice jsou schopna dosáhnout.

Některé experimenty jsou uskutečňovány mimo laboratoře s volně žijícími zvířaty. Nieder (2020) vysvětluje, že u terénních studií nelze s jistotou určit, zda se zvíře například v případě volby opravdu řídí počtem stimulů anebo jiným aspektem, který s početností nemá mnoho společného: „*například 6 červených jablek znamená dvakrát tolik prostoru zabraného červenou barvou než tři jablka a zvíře může jednoduše rozlišovat spíše množství červeného prostoru, než počet jablek.*”¹⁰ Jedná se o relevantní argument, který lze ale i v přirozených podmínkách vyloučit vhodně zvolenou metodikou.

Co se týče testování divoce žijících jedinců, průlomová byla série experimentů amerického evolučního biologa Marca D. Hausera a jeho týmu, kteří se jako první začali věnovat zkoumání numerických kompetencí u makaků rhesus mimo laboratorní prostředí (Hauser 2000). Tyto studie přináší cenné poznatky o spontánních projevech numerických kompetencí těchto primátů a budou detailněji popsány později.

Celkově jsou studie prováděné se zvířaty ve volné přírodě z pochopitelných důvodů podstatně méně početné než ty se zvířaty v zajetí. Nabízí omezenější možnosti, co se týče výzkumných metod a využitého vybavení, zároveň ale umožňují zkoumat numerické kompetence i z jiného hlediska, než je maximálně dosažitelný stupeň kognice. Nieder (2020) shrnuje, že pokusy s divoce žijícími zvířaty sice umožňují testovat pouze jednoduché a základní schopnosti, zároveň ale pomáhají porozumět jejich ekologickému a evolučnímu významu.

3.1.4 Numerické kompetence z evolučního a ekologického hlediska

Úroveň kognitivních schopností může být důležitá v otázce kvality života a přežití jak druhu, tak i jednotlivců. V následující části proto budou popsány jednotlivé aspekty ekologie primátů, kde hraje vnímání početnosti důležitou roli.

Nieder (2020) přisuzuje numerickým kompetencím „adaptivní hodnotu“, což znamená, že přináší určitou výhodu z hlediska přežití a rozmnožování. Ve svém review představuje ucelený přehled oblastí, ve kterých numerických kompetencí využívají různé druhy napříč celou živočišnou říší. Pro účely této práce se zde ovšem zaměřím pouze na ty, které jsou relevantní v případě non-humánních primátů.

1. Získávání potravy

Důležitost získávání potravy pro přežití není třeba nijak vysvětlovat, jedná se o primární potřebu a motivaci k určitému chování. Množství získané energie je úměrné

¹⁰ Vlastní překlad citace

množství přijaté potravy, z čehož vyplývá, že schopnost rozpoznat například větší počet kusů potravy přináší výhodu. Tento jednoduchý princip je základem studie Hausera (2000), který zkoumá vnímání početnosti u volně žijících makaků rhesus a vyhodnocuje spontánní volbu mezi menším a větším počtem kusů ovoce.

2. Quorum sensing - rozhodování ve skupině

Primáti skupiny jsou založeny na silných a strukturovaných sociálních vazbách. Mechanismy, kterými se fungování skupiny řídí jsou různé, zdá se ale, že jedním z nich je také rozhodování založené na vnímání počtu členů ve skupině. Příkladem je chování savanových paviánů. Pohyb skupiny se řídí tím, kolik členů se rozhodne následovat tzv. iniciátora. Jakmile množství následovatelů překročí určitou hranici, je rozhodnuto a celá skupina se dává do pohybu (Fisher & Zinner 2011).

3. Mobbing – obrana proti predátorům

Mobbing je jedna z anti-predačnických strategií, která je dobře popsána zejména u různých druhů ptáků (např. Honda & Azuma 2021; Mercado et al. 2002). Jedná se o chování skupiny, kdy se ohrožení jedinci (potenciální kořist) společně přibližují k predátorovi, doráží na něj, až se sám nakonec kořisti vzdá a stáhne se. *“Být součástí větší skupiny v rámci mobbingu snižuje riziko zranění nebo smrti a větší skupiny jsou v zahánění predátora úspěšnější než ty menší. Schopnost vyhodnocení počtu obránců před tím, než se jedinec připojí k mobbingové skupině, by tedy mohla být pro jedince vysoce přínosná,*¹¹ (Dutour et al. 2021). Strategie mobbingu bohužel není tak dobře popsána u savců jako u ptáků, přesto ale byla pozorována i u některých skupin primátů, například u etiopských populací dželad (Iwamoto et al. 1996) nebo u některých druhů titů (Dolotovskyy et al. 2019), kteří se tak brání proti útokům predátorů, zejména kočkovitým šelmám.

4. Spolupráce při lovu

Primáti nejsou první skupinou, která nás napadne v souvislosti se skupinovým lovem. Ten je ale běžný u šimpanzů, jelikož součást jejich jídelníčku tvoří i savci, například menší druhy primátů. Právě při lovu takové kořisti šimpanzi spolupracují, ať už se jedná o kooperaci jedinců a nebo systematický lov ve skupině, kdy mají všichni jedinci určitou roli a zároveň si uvědomují úlohy ostatních lovců (Boesch 1994). Bylo prokázáno, že větší počet lovců ve skupině přináší větší úspěch při lovu (Samuni et al. 2018). I když tento poznatek nevede přímo k závěru, že loveckou strategii volí na základě toho, kolik z nich se lovu účastní, rozhodně by takový systém byl z hlediska přežití nespornou výhodou pro tyto primáty.

5. Obrana teritoria

Větší počet jedinců může být pochopitelně výhodou i při obraně teritoria, které zvířatům nabízí potřebné zdroje. Mezi cizími skupinami primátů dochází k potyčkám, jejichž výsledkem je získání nebo naopak ztráta potravy, partnerů k páření nebo útočiště (Roth et al. 2016). Čím více zdrojů se na daném území nachází, tím větší je motivace pro jeho obranu. Velikost skupiny

¹¹ Vlastní překlad citace

je přitom jedním z rozhodujících faktorů (Scarry 2013). Nieder (2020) vysvětluje, že uvědomění si počtu jedinců ve skupině vede ke správnému vyhodnocení situace a rozhodnutí, zda je výhodnější pustit se do konfrontace, anebo se naopak stáhnout. Nejvíce je tento jev pravděpodobně popsán opět u šimpanzů, u kterých je navíc agresivita poměrně běžným projevem chování. V případě konfliktu projevují samci větší agresivitu a ochotu pustit se do boje v případě, že má jejich skupina početní výhodu (Wilson et al. 2001; 2002). Z toho vyplývá, že jsou tato zvířata schopna určit počet členů ve skupinách, přinejmenším relativním způsobem.

3.2 Přehled praktických studií numerických kompetencí primátů

V následující části práce bude detailněji představen výběr studií, které byly věnovány numerickým kompetencím a symbolickým operacím primátů. Hlavní pozornost bude věnována různým metodikám, které se v rámci experimentů využívají, a samozřejmě také výsledkům, kterých v dané oblasti dosáhly různé zkoumané druhy. Pro názornost budou detailněji popsány vybrané výzkumy, které dle mého názoru nejlépe ilustrují danou problematiku, případně přináší zajímavou metodiku nebo nové poznatky v oblasti numerických kompetencí a symbolických operací primátů.

3.2.1 Oblasti výzkumu numerických kompetencí primátů

Studie prováděné za účelem zkoumání numerických kompetencí primátů se zaměřují na určité úlohy, které jsem pro účely této práce rozdělila do čtyř skupin na základě jejich charakteristik a stupňů obtížnosti.

V první řadě se jedná o relativní početnost (v odborných zdrojích *quantity judgement*, nebo *numerousness judgement*), která je východiskem pro další složitější operace. Principem úloh zaměřených na zkoumání relativní početnosti je možnost výběru mezi dvěma či více různými množstvími široké škály potravních i nepotravních stimulů. Jak bude přiblíženo v další části práce, tyto úlohy mohou být také aplikovány při zkoumání spontánního/nenaučeného chování zvířat žijících mimo laboratorní podmínky. Jejich výsledky pak vypovídají o úrovni vrozených kompetencí zkoumaných zvířat.

Složitější typ úlohy dále představuje sumace, která sice vychází z relativní početnosti, vyžaduje ale vyšší úroveň kognice. Rumbaugh vysvětluje, že subjekty jsou schopny sumace, pokud dokáží správně porovnat množství získaná součtem menších hodnot (Rumbaugh et al. 1987). Jednoduše řečeno jsou schopny správně označit výsledek sčítání, případně odčítání.

Do třetí kategorie, které se práce bude věnovat, je zařazena ordinalita, tedy nejen vnímání určitých množství, ale zejména pochopení jejich vzájemných vztahů a schopnost seřadit je v určitém pořadí.

Poslední kategorií je využívání a chápání symbolických reprezentací početnosti, mezi které patří i samotná čísla. Vyžaduje nejvyšší stupeň kognice, protože se jedná o kombinaci předchozích operací a užití čísel nebo jiných symbolů jako reprezentací pro určité hodnoty. Do této kategorie se dají zařadit veškeré numerické operace, které probíhají prostřednictvím

číselných nebo jiných symbolů, tedy jak relativní početnost a samotné počítání (*counting*) ve smyslu kardinality, tedy uvědomění si a určení konkrétního absolutního počtu, tak ordinalita. Každá ze studií použitých jako podklad pro tuto práci nabízí odborný a detailní vhled do konkrétních problémů, se kterými se autoři při práci setkali, nebo ze kterých vycházeli. Stejně tak každá z nich je založena na statistických analýzách výsledků, jež odkrývají další otázky k řešení. Jako cíl této práce si ovšem pokládám spíše než podrobný popis statistických výsledků snahu o přiblížení, jakým způsobem probíhají experimenty zaměřené na numerické kompetence, jakým oblastem se autoři věnují, a jaké úrovně v nich primáti dosahují - tedy zjednodušeně, zda úspěšně plní zadané úlohy.

3.2.2 Relativní početnost

Úlohy relativní početnosti spočívají v porovnávání dvou různých kvantit. Jedná se tedy o jednoduchý princip, který hledá odpověď na otázku, zda primáti dokáží rozpoznat větší a menší počet prvků, a ověřuje pravdivost hypotéz vyslovených v souvislosti s vnímáním početnosti u primátů, zejména ohledně způsobu, jakým dochází k mentální numerické reprezentaci. Cílem experimentů je pak samozřejmě definovat, kam až sahá úroveň kognitivních schopností sledovaných subjektů, a jaká je jejich horní hranice.

Zkoumání relativní početnosti nevyžaduje použití příliš složitých metodik. Naopak je možné využít i takových, kdy není nutná předchozí příprava subjektů. Díky tomu lze porovnávat výkony zvířat, která neabsolvovala trénink, a těch, která byla na fázi testování předem připravena. Takové srovnání bylo provedeno u goril nížinných (Anderson et al. 2005). Oproti předpokladům většina netrénovaných zvířat neprokázala systematickou schopnost správně zvolit větší množství, a až po absolvování tréninku začala dosahovat vyšší procentuální úspěšnosti.

Naopak u makaků rhesus bylo dosaženo pozitivních výsledků i u netrénovaných zvířat, navíc mimo laboratorní podmínky. Nabízí se tedy zajímavé srovnání výsledků experimentu s volně žijícími zvířaty a trénovanými zvířaty v lidské péči.

V první části práce byla jedna z kapitol věnována evolučnímu významu numerických kompetencí. Proto patří z mého pohledu studie zaměřené na chování zvířat mimo laboratoře mezi ty nejpřínosnější. Vrozená schopnost vnímat početnost byla zkoumána například u tamarinů pinčích (*Saguinus oedipus*) (Uller et al. 2001), nebo u makaků rhesus (*Macaca mullata*) (Hauser et al. 2000). Druhá z uvedených studií zde poslouží jako názorný příklad.

3.2.2.1 Příklad experimentu č. 1: relativní početnost

Jedná se o první systematickou studii zabývající se touto problematikou u netrénovaných primátů (Hauser et al. 2000). Kolektiv autorů se v ní zaměřil na polodivokou smíšenou populaci makaků rhesus žijící na portorickém ostrově Cayo Santiago.

Cíle experimentu

Jelikož byly již dříve uskutečněny experimenty založené na volbě mezi dvěma množstvími potravních stimulů v laboratorních podmínkách (např. Washburn & Rumbaugh

1991), chtěli autoři této studie zkoumat stejnou problematiku ovšem u netrénovaných subjektů. Zároveň bylo cílem zjistit, jak vysoké počty stimulů jsou makaci schopni rozlišit, právě v porovnání s trénovanými zvířaty, ale také s malými dětmi.

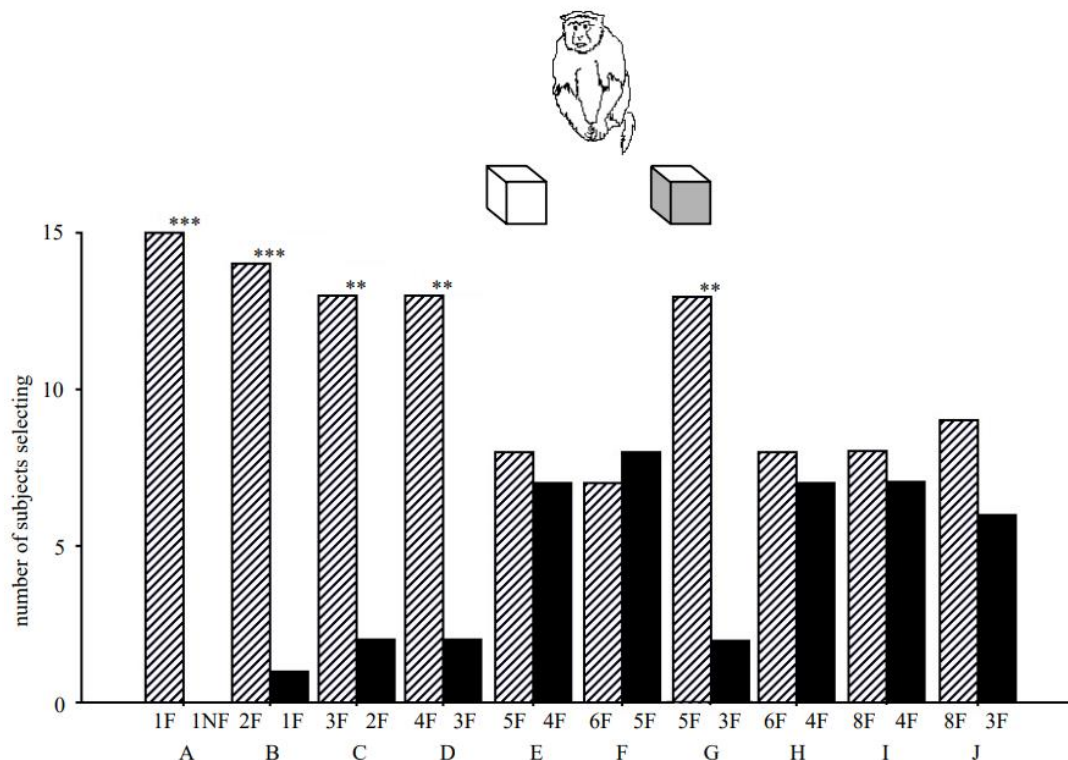
Metodika

Na začátku každého pokusu se dva výzkumníci přiblížili k vybranému subjektu, před který umístili dva různě barevné neprůhledné boxy ve vzdálenosti 2 metrů. Nejprve subjektu ukázali, že jsou oba boxy prázdné, poté do nich umístili daný počet stimulů, přičemž se ujistili, že subjekt pozorně sleduje jejich činnost. Dále se výzkumníci otočili a vzdálili tak, aby se k boxům mohl přiblížit subjekt. Následně bylo zaznamenáno, ke kterému boxu se přiblíží jako první. Každý subjekt byl testován jen jednou. Studie se skládala ze dvou experimentů. V prvním byly použity pouze potravní stimuly, v druhém kombinace potravních a nepotravních stimulů.

Výsledky

V první fázi experimentu 1 byl do jednoho z boxů umístěn kámen a do druhého kus jablka za účelem zjištění, zda bude zvolený postup v praxi fungovat. Z 15 testovaných subjektů se všech 15 přiblížilo k boxu, který obsahoval kus jablka.

V další etapě experimentu 1 už byly do boxů umisťovány pouze potravní stimuly v různých kombinacích. Ty jsou spolu s výsledky zobrazeny v následujícím grafu (obr. 2).



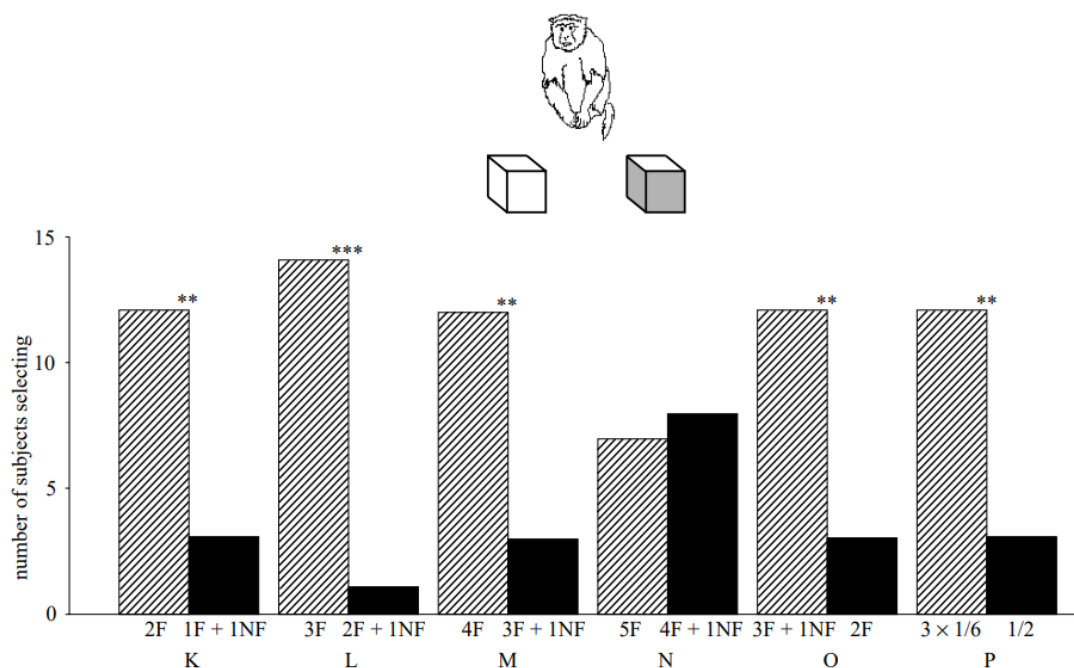
Obr. 2: Graf k experimentu 1. Sloupce grafu znázorňují počet subjektů, který zvolil v daných podmínkách konkrétní možnost (F: potravní stimuly, NF: nepotravní stimuly, např. podmínka A: 1F = 1 potravní stimul vs. 1NF = 1 nepotravní stimul). Hvězdičky umístěné u některých sloupců grafu značí signifikantní výsledek.

Zdroj: Hauser et al. 2000

Z uvedeného grafu vyplývá, že většina subjektů volila větší množství ve všech případech kromě kombinace 6 vs. 5 stimulů. Signifikantní úspěšnost přitom byla zaznamenána u kombinací 2 vs. 1, 3 vs. 2, 4 vs. 3 a 5 vs. 3.

Autoři uvedli, že výsledky experimentu by mohly být závislé nikoli na rozlišování množství, ale na vnímání času, jelikož s každým kouskem jablka se úměrně prodlužovala doba, jakou je experimentátor vkládal do boxů. Tuto hypotézu se proto následně pokusili vyvrátit prostřednictvím experimentu 2.

Tentokrát vytvořili 4 podmínky, při kterých oba boxy vždy obsahovaly stejný počet stimulů, jeden z kusů jablka ovšem zaměnili za kámen. Do jednoho boxu tak během experimentu například vložili 2 kusy jablka a do druhého jeden kus jablka a jeden kámen. Výsledky jsou opět zpracovány pomocí grafu (obr. 3).



Obr. 3: Grafk experimentu 2. Sloupce grafu znázorňují počet subjektů, které zvolily set složený pouze z potravních stimulů, a které zvolily kombinaci. Hvězdičky umístěné u některých sloupců grafu značí signifikantní výsledek.

Zdroj: Hauser et al. 2000

Subjekty ve většině případů volili box s větším počtem potravních stimulů, což znamená, že čas nebyl rozhodujícím faktorem volby a makaci si uvědomovali, v jakém z boxů se nachází více kusů jablka. Problematická byla opět podmínka 5 vs. 4, stejně jako v experimentu 1. Experimentátoři však bohužel nepokračovali s testováním vyšších hodnot jako tomu bylo v předchozím případě.

V poslední části experimentu 2 (sloupce grafu označené písmenem P) bylo cílem pozorovat, zda je volba subjektů závislá na počtu kusů potravy, anebo na jejich objemu. Subjekty dostaly na výběr buď 3 šestiny jablka anebo 1 polovinu; tedy různě velké kusy, ale na každé straně dohromady stejný objem. Pokud by byl rozhodující objem, byla by volba náhodná, jelikož byl na obou stranách stejný. To by znamenalo, že je makakům jedno, jak velké kusy potravy si vyberou, protože rozumí tomu, že ať si vezmou jakoukoliv z možností, bude to pro ně mít stejný přínos. Sloupce grafu by tedy byly vyrovnané. Z výsledku experimentu autoři

vyvozují, že si makaci nejsou schopni uvědomit celkový objem potravy, a proto raději vybírají podle počtu kusů.

Shrnutí

Na základě provedeného experimentu autoři vyvozují, že jsou makaci rhesus schopni spontánně rozlišovat mezi množstvím 1, 2 a 3. Naopak pokud jsou v kombinaci množství větší než 4, je pro ně výběr většího počtu problematický. Z toho autoři usuzují, že v tomto případě numerická reprezentace není realizována prostřednictvím *analogue magnitude system*. I když připouští, že tento systém je u makaků rhesus možný, domnívají se, že nikoli jako spontánní mentální proces v těchto podmínkách.

V rámci tohoto experimentu byly bohužel vybrány jen kombinace množství, které jsou zobrazeny ve výše uvedených grafech. Pro úplnou představu o spontánních numerických kompetencích makaků ale poněkud chybí „mezistupně“. Například v experimentu 1 je zarážející rozdíl mezi výsledky u kombinace 5 vs. 3 a 8 vs. 3. Zároveň ale chybí možnosti 6 vs. 3 a 7 vs. 3, které by jej pomohly pochopit. Stejně tak chybí kombinace 4 vs. 2. Lze tedy jen předpokládat, že by v takovém případě makaci volili 4 stimuly.

V laboratorních podmínkách mohou být subjekty postupně trénovány na plánované úlohy. Postupně jsou seznamovány s předměty používanými v rámci experimentu, v případě počítačových programů jsou navykány na práci s monitorem nebo joystickem (např. Beran 2007, Beran et al. 2008). Součástí procesu může být také přípravná fáze, kdy je cílem subjekty naučit například volbu většího množství stimulů, a až po dosažení požadovaných výsledků se přistupuje k samotnému experimentu (např. Barnard et al. 2013). Přitom zvířata prochází procesem učení, a tak je možné zaměřit se na to, jaké úrovně kognice v dané oblasti jsou vlastně schopny dosáhnout, pokud je pomocí tréninku rozvíjena.

Jelikož byl v předchozím případě jako příklad uveden experiment týkající se makaků rhesus, bude i zde pro srovnání popsána studie zabývající se tímto druhem ovšem v lidské péči.

3.2.2.2 Příklad experimentu č. 2: relativní početnost

Beran (2007) zahrnul do své studie 4 dílčí experimenty, z nichž každý byl zaměřen na jeden z faktorů, který by mohl ovlivnit volbu subjektu: samotné množství, čas a objem. Subjekty byli dva jedenáctiletí samci druhu makak rhesus, kteří se již předtím zúčastnili studií zaměřených na numerické kompetence a byli zvyklí na manipulaci s joystickem. Princip úlohy byl stejný ve všech 4 dílčích experimentech, autoři se pouze pomocí úpravy počítačového programu postupně zaměřovali na vliv faktoru času a obsahu. Proto zde bude podrobně popsána pouze základní princip použitý v prvním experimentu.

Cíle experimentu

Autor chtěl pomocí prvního z experimentů odpovědět na dvě zásadní otázky. První z nich zní, zda makaci dokáží určit větší množství i v případě, že je počet stimulů větší než 4. Je tedy reakcí na výše popsaný experiment Hausera (2000). Druhou otázkou je, zda je při volbě rozhodující absolutní velikost množství anebo poměr mezi dvěma možnostmi.

Metodika

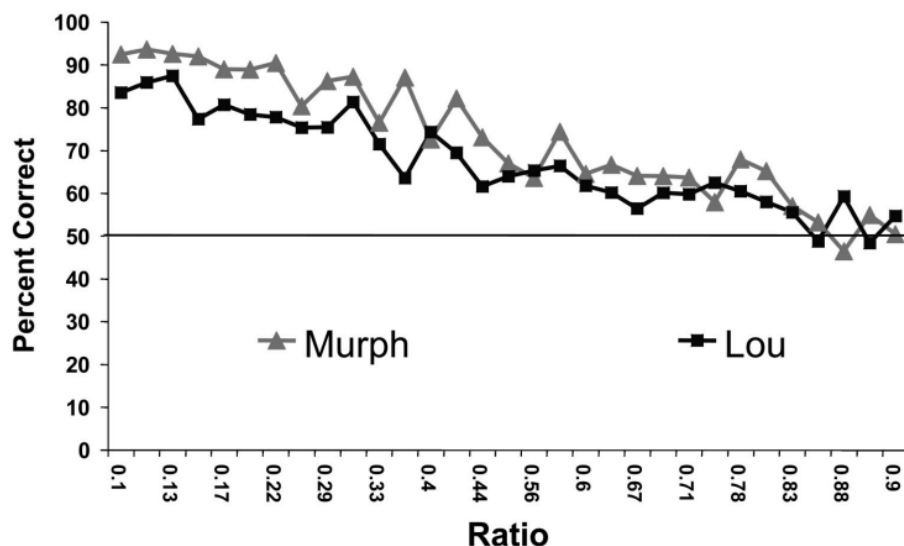
Jak už bylo zmíněno, při tomto experimentu byl využit počítačový systém. Konkrétně se jednalo o *Language Research Center's Computerized Test System* založený na propojení monitoru s joystickem, který je velmi často používán při behaviorálních studiích na celém světě. Joystick sloužil k ovládání kursoru na monitoru, na kterém se po začátku každého pokusu objevily dva černé obdélníky označené písmeny A a B. Poté se nad jedním z obdélníků objevila zavřená dlaň, ze které začaly postupně padat malé čtverce reprezentující určitý počet stimulů. Následně se dlaň přesunula nad druhý obdélník, kam také postupně upustila stimuly. Cílem bylo určit, v jakém z obdélníků se na konci opakování nachází větší počet čtverečků. Nakonec dlaň zmizela a objevil se kursor, kterým měl subjekt označit jeden z obdélníků. Při správné odpovědi (tedy větším množstvím) se ozval melodický tón následovaný odměnou v podobě granule. Špatná odpověď byla následována zabzučením a zbělením monitoru na deset sekund. K celému zařízení měly subjekty neustále přístup, k testování tedy docházelo kdykoliv, pouze na základě jejich dobrovolného přístupu.

V tomto konkrétním experimentu prošli makaci nejprve tréninkovou fází, během které se měli naučit volit větší množství. Pro takový trénink byly zvoleny kombinace 1 vs. 0, 1 vs. 4 a 2 vs. 5. V samotném experimentu pak byly použity různé kombinace počtu stimulů od 1 do 10 v náhodných sekvencích. Oba makaci celkem uskutečnili více než 5 000 opakování.

Upravené podmínky v dalších třech experimentech spočívaly v tom, že se nejprve rozdíl počet stimulů na obou stranách přemísťoval do obdélníků během stejné doby, a tím byl eliminován faktor času (experiment 2). Dále byly subjektům prezentovány stimuly ve dvou různých velikostech, na jedné straně tedy mohl být například větší počet čtverečků, které dohromady zabíraly menší povrch než druhá možnost (experiment 3). V poslední části se autoři opět zaměřili na faktor času a upravili podmínky tak, že se čtverečky přemísťovaly do obdélníků v různých rychlostech, menší počet čtverečků tedy mohl padat k obdélníku delší dobu než větší počet na druhé straně (experiment 4).

Výsledky

Stanoveným cílem tohoto experimentu bylo mimo jiné určení, zda je při volbě důležitější absolutní hodnota nebo poměr mezi dvěma množstvími v setu. Z tohoto důvodu jsou výsledky prezentovány pomocí grafu (obr. 4), který zobrazuje procentuální úspěšnost obou subjektů v závislosti na poměru mezi dvěma množstvími (*ratio*).



Obr. 4: Graf k experimentu zobrazující úspěšnost obou subjektů (Murph a Lou) v závislosti na poměru prezentovaných setů.

Zdroj: Beran 2007

Z grafu (obr. 4) jednoznačně vyplývá závislost mezi úspěšností a poměrem u obou subjektů: čím nižší je poměr, tím vyšší je počet správných odpovědí, což je charakteristické pro *analogue magnitude system*. Tyto výsledky byly také prokázány pomocí statistické analýzy. Křivka grafu je přitom poměrně vyrovnaná a nedošlo zde k propadu, jako tomu bylo u experimentu s divokými makaky (Hauser 2000), i když počet stimulů překročil hranici čtyř. Makaci signifikantně častěji volili větší množství bez ohledu na absolutní počet porovnávaných stimulů, pokud byl poměr mezi hodnotami vyšší než 0,833.

Pro doplnění je třeba také uvést ve stručnosti výstupy z dalších tří dílčích experimentů. Během experimentů 2 a 3 si sice makaci vedli statisticky hůře než během experimentu 1, i tak ale v úlohách uspěli. Ve čtvrtém experimentu se ale ukázalo, že pokud doba prezentace obou setů nekorespondovala s jejich velikostí, odpovídali makaci náhodně, byli tedy ovlivněni i faktorem času.

Shrnutí

Podle výsledků právě popsaného experimentu jsou makaci rhesus schopni v rámci volby mezi dvěma množstvím rozpoznat to větší i v případě, že je počet stimulů vyšší než čtyři (zde byl maximální počet stimulů 10), což je v rozporu s poznatky Hausera (2000). Ten také z toho důvodu podotýkal, že numerická reprezentace se u makaků neodehrává prostřednictvím *analogue magnitude system*. Beran (2007) naopak vychází z toho, že úspěšnost volby je závislá na poměru mezi množstvím, k hypotetickému využití tohoto systému se tedy přiklání.

Rozdílné výstupy obou studií mohou být zapříčiněny velikostí testovaného vzorku: prvního experimentu se zúčastnilo několik desítek makaků, přičemž pro druhý byli použiti pouze dva. Dalším důvodem může být také motivace, která zde byla vyšší, jelikož pouze správná odpověď byla odměněna potravou. Nakonec je rozdíl ve zkušenosti subjektů, které byly v tomto případě jednak již dříve použity pro různé studie, zároveň prošly přípravnou fází

skládající se z několika tisíc opakování. I během testovací fáze pak proběhlo velké množství opakování oproti předchozímu pokusu, kde byl každý subjekt testován jen jednou.

Nakonec z této studie vyplynulo zajímavé zjištění, že se makaci za určitých podmínek nemusí řídit pouze množstvím, ale také časem, konkrétně dobou, během které jsou stimuly umisťovány do cílové pozice.

3.2.2.3 Relativní početnost u dalších druhů primátů

Malpa hnědá (*Cebus apella*)

Ve studii Michaela J. Berana a jeho spolupracovníků z roku 2008 subjekty (6 opic) volily větší množství digitálních čtverečků zobrazených v řadě na monitoru pomocí ovládání joystickem. Jednalo se o zkušená a předem trénovaná zvířata. Cílem experimentu byla v první fázi správná volba většího počtu (kombinace 1 vs. 5, 3 vs. 7, 5 vs. 9, 3 vs. 5, 5 vs. 7). V další fázi pak došlo k manipulaci se zobrazenými čtverečky tak, že se buď změnil jejich počet, nebo byla změněna pouze jejich konfigurace při zachování původního počtu. Volba většího počtu čtverečků byla v celkovém souhrnu signifikantně vyšší než úroveň náhodného výběru odpovědi. Výsledkem experimentu tedy bylo prokázání jisté úrovně vnímání množství u tohoto druhu.

Pavián anubi (*Papio anubis*)

8 paviánů bylo použito v experimentu zaměřeném na podstatu vnímání početnosti, tedy na způsoby mentální numerické reprezentace u primátů (Barnard et al. 2013). Autoři vycházeli z již dříve stanovených hypotéz týkajících se *analogue magnitude system* a *object tracking system*. Zvolená metodika spočívala ve dvou různých množstvích potravních stimulů (od 1 do 8) umístěných do neprůhledných nádob, mezi kterými si subjekty mohly vybírat (různé kombinace počtů za následujících podmínek; obě možnosti <5, obě možnosti >4, jedna možnost <5, druhá >4). Jednalo se přitom o zvířata chovaná v zoologické zahradě, která prošla přípravnou fází, ale neměla předchozí zkušenosti s žádnými experimenty. V každé ze tří podmínek byla úspěšnost paviánů signifikantně vyšší než úroveň náhody. Výsledky zároveň potvrzují hypotézu *analogue magnitude system*, jelikož byly závislé na poměru mezi prezentovanými množstvím.

Lidoopi: šimpanz (*Pan troglodytes*), gorila nížinná (*Gorilla gorilla gorilla*), orangutan bornejský (*Pongo pygmaeus*), bonobo (*Pan paniscus*)

Všechny zmíněné druhy byly zahrnuty v experimentu zaměřeném na to, zda primáti jinak vnímají počet stimulů, které jsou prezentovány najednou jako celek, a počet, kde jsou zobrazovány jeden za druhým (Hanus & Call 2007). Jednalo se o subjekty chované v lidské péči, které měly předchozí zkušenost s kognitivními úlohami (4 bonobové, 12 šimpanzů, 7 goril a 7 orangutanů). V první fázi experimentu jim byla nabídnuta volba mezi dvěma nádobami, které již viditelně obsahovaly 0–10 granulí. Nádoby byly prezentovány nejprve najednou, poté postupně každá zvlášť. I přes individuální výjimky lidoopi podle statistické analýzy v této úloze celkově uspěli. Výsledky byly opět závislé na poměru mezi množstvím, a byly znatelně lepší u simultánně prezentovaných stimulů.

V druhé fázi experimentu byly granule postupně umísťovány do neprůhledných kalíšků, bylo tedy nutné si zapamatovat, kolik jich bylo. V této úloze byly subjekty méně úspěšné, šimpanzi a orangutani si v průměru vedli lépe než gorily a bonobové. Byly zaznamenány velké individuální rozdíly, v celkovém souhrnu však ani jeden z druhů neuspěl v případě různých kombinací počtů stimulů 4–10. Bonobové dokonce neuspěli ani v úlohách s nižšími hodnotami (0-6 stimulů). Na základě těchto výsledků se zdá, že si lidoopi jednoduše nedokázali zapamatovat, kolik granul již bylo do kalíšku umístěno.

Gorily byly použity ještě v dalším experimentu, jehož cílem bylo zkoumat rozdíl mezi kognitivní úrovní mladých a starých zvířat (Anderson et al. 2005). Během testování byly použity kombinace 1 vs. 2, 1 vs. 3, 1 vs. 4, 2 vs. 3, 2 vs. 4 a 3 vs. 4 stimuly. Na základě statistických výsledků byly pouze 4 z 11 subjektů schopny signifikantně volit větší množství stimulů. Ve studii ovšem není specifikováno, zda u některých kombinací subjekty odpovídaly správně, nebo byla jejich celková performance náhodná. K celkovému zlepšení u všech goril každopádně došlo až poté, co absolvovaly další trénink. Takový výsledek ovšem pravděpodobně nevypovídá o nízké úrovni kognice tohoto druhu, ale spíše o nedostatku motivace. Sami autoři uvádí, že subjekty mohly být ovlivněny přípravnou fází testování, která spočívala ve familiarizaci s testovacím aparátém. V této fázi gorily dostávaly na výběr mezi stejnými počty stimulů, mohly si tedy zvyknout na to, že každá z možností nabízí stejnou odměnu.

3.2.3 Sumace

Chápání jednoduchých aritmetických operací je postaveno na primární schopnosti rozpoznání většího a menšího množství. V rámci experimentů bývají úlohy relativní početnosti popsáné výše prvním krokem ke studiu vyšší úrovně numerických kompetencí spočívající v porozumění základních principů sčítání a odčítání. Tyto dvě oblasti se tedy vzájemně prolínají.

Stejně jako základní relativní početnost byla i sumace zkoumána u různých druhů primátů, v laboratorních podmínkách i u volně žijících zvířat. Nejčastější metodika v experimentech použitých jako podklady pro tuto práci je výběr mezi dvěma sety potravních stimulů (případně kombinace potravních a nepotravních stimulů), na kterých byla provedena změna v podobě přidání nebo odebrání určitého počtu stimulů. V této kategorii (na rozdíl od symbolických operací) je tedy sčítání a odčítání demonstrováno prostřednictvím manipulace s objekty, které zároveň slouží jako odměna (Anderson et al. 2005, Sulkowski & Hauser 2000, Call 2000).

V dalších studiích (Flombaum et al. 2004, Uller et al. 2001, Hauser et al. 1996) je využit také jiný způsob, a to metodika *violation of expectancy* (narušení očekávání¹²). Jedná se o princip, který spočívá v tom, že je subjektům prezentován buď “možný” výsledek (např. $1+1=2$) anebo výsledek “nemožný” ($1+1=3$). Následně je sledován průměrný čas, během kterého subjekty sledují oba výsledky, přičemž hypotéza říká, že pokud správně chápou princip matematické operace, bude sledovací čas u “nemožného” výsledku delší, protože subjekt takový výsledek neočekává, a je jím tedy překvapen. Tato metodika byla použita v experimentu provedeném na polodivoké populaci makaků rhesus (Hauser et al. 1996; Flombaum et al. 2005)

¹² Návrh překladu anglického termínu

a v laboratorních podmínkách na tamarínech pinčích (Uller et al. 2001). Právě tato studie zde bude uvedena jako názorný příklad z důvodu novějšího původu, a zajímavé metodiky.

Sumace je také součástí několika experimentů, které využívají symbolických reprezentací početnosti. Ty jsou zde ovšem řazeny do samostatné kategorie, proto budou představeny až později.

3.2.3.1 Příklad experimentu č. 3: sumace, metodika *violation of expectancy*

V tomto experimentu (Uller et al. 2001) bylo použito 10 tamarínů pinčích (*Saguinus oedipus*), kteří se již dříve zúčastnili jiných studií netýkajících se numerických kompetencí.

Cíl experimentu

Autoři se opírali o předchozí studie, které využívaly metodiky *violation of expectancy* a byly zaměřené nejen na non-humánní primáty (konkrétně makaky rhesus), ale také děti. Jejich cílem proto bylo prokázat, zda je metoda narušení očekávání aplikovatelná také u jiného druhu v odlišných podmínkách. Například oproti Hauserovi et al. (1996) se jednalo o malý počet subjektů žijících v zajetí. Druhým cílem pak bylo rozšířit oblast poznání kognitivních schopností tamarínů.

Metodika

Testování probíhalo ve speciálních boxech vyrobených z plexiskla a upravených pro účely tohoto experimentu. Přední strana byla průhledná, tak aby skrz ni bylo vidět ven na operační prostor, kde se odehrávala manipulace se stimuly. Na této straně byla také dvě malá neprůhledná dvířka, za kterými byla připevněna deska, kam se daly stimuly položit. Subjekty tedy sledovaly ruce experimentátora držící barevné cereálie (tamaríny velmi oblíbené). Samotný experimentátor byl vždy schovaný za zástěnou. Druhý experimentátor - pozorovatel - byl také schovaný a jeho úkolem bylo pozorovat subjekt, zda věnuje testování dostatečnou pozornost. Pokud by tamarín projevoval nezáměr, nešlo by tuto metodiku zrealizovat a testování by bylo ukončeno. Celý průběh byl přitom zaznamenáván na kameru.

Experiment 1

Během přípravné fáze byly subjekty nejprve seznámeny s celým testovacím aparátem. Následně před nimi experimentátor začal manipulovat se stimulem, a to tak, že ho držel v ruce a prezentoval ho subjektu po dobu 5 sekund tak, aby ho dobře viděl. Poté stimul položil na desku před otevřenými dvířky a ruku stáhl, opět tak, aby opice dobře viděla, že je ruka prázdná. Úkolem pozorovatele bylo odpočítat 10 sekund, během kterých se nahrával čas sledování stimulu subjektem. Stejný proces se poté opakoval se dvěma stimuly (jeden stimul v každé ruce). Cílem tohoto tréninku bylo, aby si subjekt uvědomil přemístění stimulů z ruky na desku a zároveň zachování jejich počtu. V další fázi experimentátora zavřeli dvířka v přední straně boxu, tudíž deska, na kterou se stimuly pokládaly, nebyla vidět.

Bezprostředně po přípravné fázi následovala fáze testovací. Nejprve se na krátkou chvíli otevřela dvířka tak, aby subjekt viděl, že deska před nimi je prázdná. Poté mu experimentátor

ukázal nejprve stimul, pak prázdnou ruku na jedné straně a stimul a prázdnou ruku na druhé straně (stejně jako v přípravné fázi). Po otevření dvířek byly na desce položeny oba stimuly (očekávaný výsledek) anebo jen jeden z nich (neočekávaný výsledek). Předpokládaná hypotéza zněla tak, že u neočekávaného výsledku bude pozorovací čas subjektů delší než u toho očekávaného.

Experiment 2

Fáze druhého experimentu proběhly stejně jako u toho předchozího. Jediným rozdílem bylo, že stimuly nebyly pokládány na desku, ale do krabičky, která byla vyrobena tak, že se její přední strana dala sundat, aby bylo vidět do nitra krabičky. Zároveň byl na této odnímatelné straně připevněn skrytý sáček, do kterého se jeden ze stimulů dal nepozorovaně umístit. Tato metoda byla použita z toho důvodu, že přesně takto byly provedeny experimenty s makaky rhesus a s dětmi.

Experiment 3

Metodika u dalšího testování zůstala stejná jako u toho předchozího, byla tedy využita krabička s odnímatelnou přední stranou. V tréninkové fázi byly do krabičky umísťovány buď v každé ruce jeden stimul anebo v každé ruce jeden a půl stimulu (aby byl celkový výsledek 3). V samotné testovací fázi byly dovnitř umísťovány viditelně jen dva stimuly, třetí byl skrytý v sáčku připevněném na přední straně krabičky. Experimentátor ho v polovině případů umístil k ostatním dvěma, tak aby to tamarín nemohl vidět. V tomto případě byl tedy neočekávaný výsledek 3 stimuly.

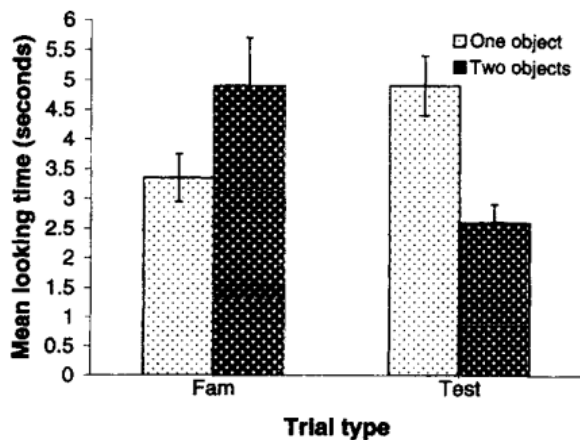
Experiment 4

Poslední dílčí experiment se od předchozích tří lišil tím, že byl zaměřen nikoli na absolutní počet stimulů, ale na jejich velikost/objem. V tréninkové fázi šlo tedy o to, že experimentátor před tamaríny manipuloval buď se dvěma cereáliemi slepenými dohromady, které následně položil do krabičky, anebo se čtyřmi cereáliemi slepenými dohromady, tedy přesně dvakrát větším stimulem. V testovací fázi viditelná manipulace probíhala pouze se dvěma malými stimuly. Očekávaným výsledkem tedy byly dva stimuly na dně krabičky. V polovině případů byly ale zaměněny za jeden velký stimul. Výsledky testování měly poukázat na to, zda tamaríni zaměřují pozornost na absolutní počet stimulů anebo jejich velikost.

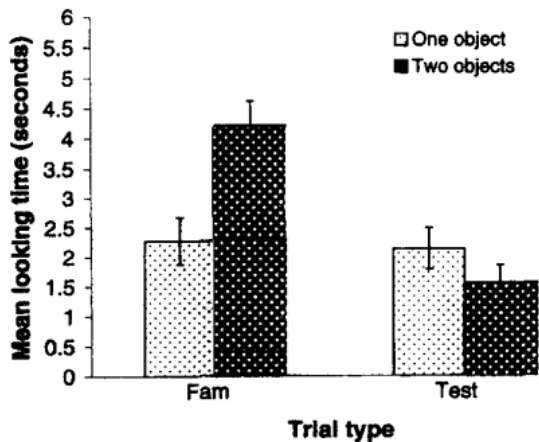
Výsledky experimentu

U každého z experimentů byly už během přípravné fáze zaznamenávány časy sledování stimulů. Ty pak sloužily jako směrodatné srovnání s naměřenými časy během testování. Během tréninku se totiž ukázalo, že za normálních okolností naměřená průměrná hodnota koresponduje s počtem stimulů. Sledovací čas pro 2 stimuly tedy bude kratší než pro 3 stimuly. Skutečnost, že v testovacích fázích byla tato úměra narušena, vypovídá o tom, že si tamaríni uvědomovali porušení numerických pravidel.

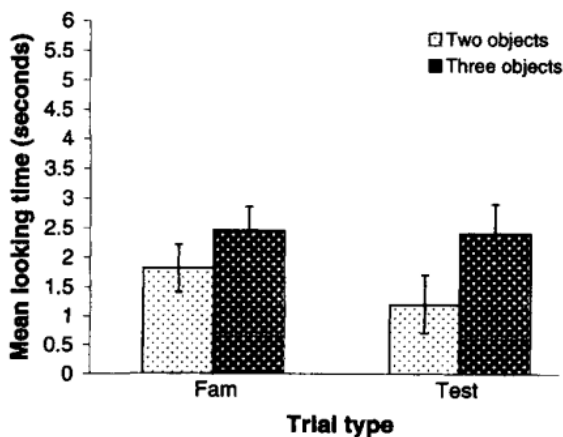
Výsledky tréninkových i testovacích fází všech čtyř dílčích experimentů jsou zobrazeny v následujících grafech (obr. 5-8).



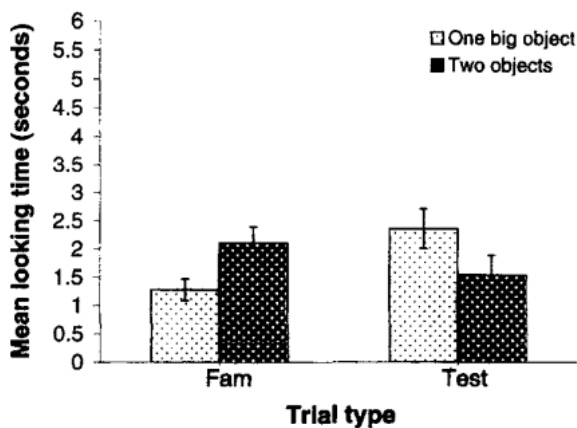
Obr. 5: Graf k experimentu 1. Sloupce grafu znázorňují průměrný čas sledování stimulů v sekundách. V přípravné fázi (Fam) průměrný čas sledování koresponduje s vyšším počtem stimulů. V testovací fázi (Test) je tomu ale naopak. Zdroj: Uller et al. 2001



Obr. 6: Graf k experimentu 2. Sloupce grafu znázorňují průměrný čas sledování stimulů v sekundách. Rozdíl mezi časy sledování v testovací fázi (Test) je menší než v experimentu 1. V obou případech se ale jedná o signifikantní výsledek. Zdroj: Uller et al. 2001



Obr. 7: Graf k experimentu 3. Sloupce grafu znázorňují průměrný čas sledování stimulů v sekundách. V obou fázích byl sice zaznamenán delší pozorovací čas u tří stimulů, v testovací fázi (Test) je ale rozdíl podstatně větší. Jedná se o signifikantní výsledek. Zdroj: Uller et al. 2001



Obr. 8: Graf k experimentu 4. Sloupce grafu znázorňují průměrný čas sledování stimulů v sekundách. V testovací fázi (Fam) věnovali tamarini jednomu velkému stimulu méně pozornosti než ve fázi testovací (Test), kde se jednalo o neočekávaný výsledek. Zdroj: Uller et al. 2001

Každý ze sloupců zobrazuje průměrnou dobu, po kterou subjekty sledovaly očekávaný a neočekávaný výsledek. Tvar grafu u experimentů 1, 2 a 4 (obr. 5, 6 a 8) ukazuje, že tamarini jednoznačně věnovali větší pozornost neočekávanému výsledku; v tréninkové fázi sledovali

déle větší počet stimulů, ve fázi testovací se ale naopak déle dívali na menší počet, což znamená, že byli takovým výsledkem překvapeni. U experimentu 3 (obr. 7) byl naopak sledovací čas delší u tří stimulů, což by sice odpovídalo tomu, že se jednalo o větší počet stimulů, zároveň je ale rozdíl mezi sledovacími časy u 2 vs. 3 stimulů v tréninkové fázi a v testovací fázi mnohem větší, což opět značí, že subjekty byly takovým výsledkem překvapeny.

Shrnutí

Sami autoři uvádí, že cílem této studie nebylo odpovědět na otázky typu jakým způsobem probíhá numerická reprezentace u primátů, ale prokázat, že metodika *violation of expectancy* je relevantním nástrojem v této problematice. Ve všech čtyřech experimentech tamaríni průměrně sledovali neočekávaný výsledek déle než ten očekávaný, čímž se záměr autorů studie naplnil. Zároveň výsledky dílčích experimentů naznačují, že tamaríni v této studii chápali princip sčítání (například, že 1+1 stimul se nemůže rovnat 1), i když na takto malém počtu stimulů. Nakonec také vyšlo najevo, že jsou vnímavější vůči počtu stimulů než vůči jejich objemu.

3.2.3.2 Sumace u dalších druhů primátů

Orangutan bornejský (*Pongo pygmaeus*)

Call (2000) publikoval experiment zkoumající numerické schopnosti tří orangutaních samců, kteří již měli předchozí zkušenosti s kognitivními úlohami. První část studie byla věnována základnímu vnímání početnosti: subjekty vybíraly za různých podmínek mezi dvěma množstvím potravních stimulů (1-6), přičemž dosáhly signifikantní procentuální úspěšnosti ve volbě vyššího množství. V druhé části experimentu byl vždy k jednomu ze dvou setů přidán určitý počet stimulů (tak aby opět celkový počet nebyl vyšší než 6), nebo byl naopak odebrán. Následně měli orangutani opět vybírat správnou odpověď, tedy vyšší finální počet. Bylo zjištěno, že větší problém dělalo subjektům odebrání stimulů než jejich přidávání. Celková úspěšnost sice byla nižší než v první fázi pokusu, stejně se ale pohybovala signifikantně nad úrovní náhodné volby.

Šimpanz (*Pan troglodytes*)

Na podobném principu postavil svou studii i Beran (2001). Zde byli použiti dva šimpanzi. V první fázi experimentu volili mezi dvěma počty potravních stimulů (1-9) umístěných najednou do dvou kalíšků. V další byly do stejných kalíšků umístěny různé počty stimulů ovšem postupně ve dvou sekvencích. V jednom kalíšku tedy bylo ve výsledku například 2+1 stimulů a v druhém 2+2 stimuly. V obou těchto dílčích experimentech volili šimpanzi signifikantně častěji vyšší celkový počet. Třetí fáze byla ještě složitější, jelikož byl celkový počet stimulů do kalíšků umístěn natřikrát, jednalo se tedy o součet tří počtů. V poslední fázi pak byl vždy z jednoho kalíšku jedním stimul odebrán. Pouze jeden ze šimpanzů v těchto dvou úlohách uspěl. Zajímavé ovšem je, že dosahoval stejné i vyšší úspěšnosti než v prvním dílčím experimentu. Druhý ze šimpanzů sice u některých kombinací odpovídal

správně, celkově ale neuspěl. Výsledky v úlohách sumace byly tedy v tomto případě individuální.

Gorila nížinná (*Gorilla gorilla gorilla*)

Na sumaci byl zaměřen již výše zmíněný experiment zkoumající úroveň kognice u mladých a starých goril (Anderson et al. 2005). Experimentátoři měli k dispozici 6 zvířat ve věku 37 – 43 let a 5 zvířat ve věku 6 – 13 let. Přestože si v úlohách relativní početnosti bez tréninku tato zvířata nevedla příliš dobře, v sumaci poté dosáhla překvapivě vysokých výsledků. Princip byl takový, že měly subjekty vždy na výběr mezi dvojicí misek, v nichž byly různé kombinace potravních stimulů v počtu 0-4, tedy například 1+3 vs. 4+2. Všechny jedenáct subjektů vybíralo signifikantně častěji vyšší celkový počet, přičemž mladá zvířata dosáhla vyšší procentuální úspěšnosti, ale také byly jejich odpovědi rychlejší než u starších goril.

Malpa hnědá (*Cebus apella*)

Na tomto druhu byl proveden metodicky jednoduchý experiment zaměřený na relativní početnost v první fázi, v druhé pak na sumaci (Beran et al. 2008). Úlohy byly vystavěny na principu výběru mezi různými počty stimulů (1-6). Subjektům (7 opic) byly při každém opakování ukázány dva sety stimulů (1-5 kusů), které byly následně zakryty. Poté byly k jednomu z nich přidány 1-3 stimuly tak, aby se ve výsledku rozdíl mezi celkovými počty stimulů lišil o 1–3 kusy. Výsledné možnosti byly rozděleny do tří kategorií: skryté sety se stejným počtem stimulů – celkový vyšší počet dosažen přidáním viditelných stimulů; viditelné stimuly přidány k setu s celkově vyšším počtem stimulů; viditelné stimuly přidány k setu s celkově nižším počtem stimulů. V každé kategorii malpy uspěly se statisticky signifikantními výsledky 72,2 %, 77,6 % a 70,1 %. Úspěšnost signifikantně vyšší než úroveň náhody byla přitom zaznamenána u všech kombinací kromě těch, kde byl poměr mezi množstvím vyšší než 0.8. Výstupem experimentu tedy je, že tyto opice zvládají sumaci s malým počtem stimulů.

Makak rhesus (*Macaca mulatta*)

Na rozdíl od jiných druhů primátů byla sumace několikrát studována mimo laboratorní podmínky na polodivoké populaci makaků ostrova Cayo Santiago. Sulkowski & Hauser (2001) se zaměřili na odčítání. Postup při experimentu byl v zásadě stejný jako u Hausera et al. (2000) s tím rozdílem, že každému subjektu byla předvedena jednoduchá operace, během které byl od předem známého počtu potravních stimulů ukrytých za neprůhlednou deskou odebrán určitý počet stimulů. Poté se makak mohl přiblížit k jedné z možností, což definovalo výběr odpovědi. Experimentátoři operovali s počty 0–3 kousky potravy v různých kombinacích (např. 2 – 1 vs. 2 – 2), v další fázi pak začlenili také nepotravní stimuly (např. 3 – 1 potravní stimul vs. 2 – 1 nepotravní stimul). Nakonec došlo také na kombinace odčítání a sčítání (např. 2 – 1 vs. 1 + 1). Každé etapy se účastnilo 15 subjektů (každý z nich měl pouze jeden pokus) a v každé z nich minimálně 13 subjektů vybralo větší množství. Výstupem tedy je, že makaci rozumí bez předchozího tréninku základní operaci odčítání při počtu stimulů ≤ 3 .

Polodivocí makaci byli testováni i na operace sčítání do počtu až 8 kusů potravních stimulů (Flombaum et al. 2005). Makakům byly předvedeny operace: $3 + 1$, $2 + 2$ a $4 + 4$. Jedné skupině opic byl následně odhalen správný výsledek, druhé výsledek “nemožný”. Podle metodiky *violation of expectancy* byl změřen celkový čas pozorování výsledku, přičemž vyšší byl naměřen u nesprávných výsledků operací $3 + 1$ a $4 + 4$. Nejednoznačný byl výstup u etapy, kdy byly jako výsledky operace $2 + 2$ prezentovány potravní stimuly v počtu 4 (očekávaný výsledek) a 6 (neočekávaný výsledek). Průměr naměřených časů byl téměř stejný, přičemž autoři se domnívají, že to bylo způsobeno vyšším poměrem ($2/3$), což bylo pro makaky obtížnější rozlišit. V poslední etapě testování se experimentátoři zaměřili na velikost potravních stimulů a položili si otázku, zda se makaci řídí počtem stimulů anebo celkovým objemem. Jako výsledek operace $3+1$ tedy nabídli subjektům buď 4 velké stimuly nebo 8 malých, které ale měly dohromady stejný objem. Signifikantně delší pozorovací čas byl opět zaznamenán u nemožného výsledku, tedy u 8 stimulů. Podle autorů výstupy této studie dokazují, že makaci vnímají početní operace prostřednictvím jejich magnitud (viz *analogue magnitude system*) a rozsah jejich kapacity je limitován nejen množstvím, ale také poměrem.

3.2.4 Ordinalita

Většina studií zabývajících se numerickými kompetencemi primátů je zaměřena na nominální hodnotu, tedy absolutní počet předkládaných prvků, které jsou mezi sebou porovnávány. Jak ale namítají Brannon a Terrace (2000), není zcela jasné, zda při takových úlohách primáti opravdu chápou vztahy mezi jednotlivými množstvím, anebo jsou schopni se postupně naučit konkrétní hodnoty následně označené za správnou odpověď. Proto se tito autoři zaměřují na ordinalitu, která je založena na vztazích jednotlivých prvků v rámci množiny. I když je počet studií týkajících se této problematiky nižší, věnují se jí i jiní autoři. Thomas & Chase prokázali základní úroveň chápání ordinality u kotulů veverovitých již v roce 1980. Brannon & Terrace (1998, 2000) pracovali s makaky rhesus, a z jejich metodiky nakonec vycházel také Judge, Evans & Vyas (2005), kteří zkoumali ordinalitu u malp hnědých. Zde budou jako příklady uvedeny studie Thomase & Chase (1980) kombinující relativní početnost a ordinalitu a studie Brannonové & Terrace (1998, 2000), která z mého pohledu nejlépe prezentuje schopnost chápání ordinality u primátů.

3.2.4.1 Příklad experimentu č. 4: relativní početnost a ordinalita

Tato studie byla provedena se třemi samci kotula veverovitého (*Saimiri sciureus*), kteří se sice narodili ve volné přírodě, ale již měli zkušenosti s jinými experimenty. Tento experiment pak sám o sobě obsahoval poměrně intenzivní přípravnou fázi, ve které si subjekty navykaly na testovací aparát.

Cíl experimentu

Pro autory bylo zásadním bodem zaměřit se na relativitu v rámci několika různých prezentovaných množství. To samozřejmě vychází ze samotné relativní početnosti zmiňované výše, protože se jedná o porovnávání množství. Zde ale došlo k rozšíření tohoto principu a to tak, že se experimentátoři rozhodli dát subjektům na výběr mezi třemi možnostmi. Největší

množství přitom nebylo vždy správnou odpovědí. Aby mohli kotulové zvolit správnou odpověď, museli tedy nejprve pochopit vztah “nejmenší - střední - největší”, což je vlastně základ principu ordinality.

Metodika

Použitá metodika využívala světelného signálu jako indikátoru správné odpovědi. Před subjekt byla umístěna plocha, na níž byly vedle sebe připevněny tři sklápěcí stojánky. Pod nimi byla ukryta prohlubeň, kam byla schována odměna v podobě kousku potravy. Do stojánek byly v různých kombinacích umisťovány karty zobrazující různě velká černá kolečka v počtu 2–7. Subjekt reagoval na světelný signál; pod tímto aparátem byly umístěny v řadě tři neonové lampy. Pokud se rozsvítila jedna lampa, měl subjekt jako správnou odpověď označit kartu s nejnižším počtem koleček. Dvě lampy znamenaly, že správnou odpovědí je prostřední počet koleček, při všech rozsvícených lampách měl být označen nejvyšší počet koleček.

Přípravná fáze probíhala nejprve tak, že subjekty objevovaly, jak získat odměnu: cílem bylo pochopit, že je ukryta pod stojánkem. Následoval trénink, který byl zároveň i samotnou testovací fází, jelikož byl stanoven určitý limit správných odpovědí v každé etapě, jehož bylo potřeba dosáhnout pro postup do další etapy. Subjektům tedy byly prezentovány karty s černými kolečky zobrazenými v různých počtech, velikostech a konfiguracích. Následovalo navykání na světelný signál. Během celkem třinácti etap byly postupně subjekty formovány tak, aby dokázaly přiřadit intenzitu světelného signálu ke správnému stupni početnosti, v jedné z prvních etap tak například vybíraly mezi 2, 4 a 6 kolečky v odpovědi na světelný signál jedné lampy, přičemž byla posilována správná odpověď 2. V každé etapě proběhlo celkem 45 opakování denně, dokud subjekty nesplňovaly experimentátory stanovenou úroveň úspěšnosti pro postup do další etapy.

Výsledky experimentu

Pouze jeden z testovaných kotulů úspěšně prošel všemi etapami experimentu. U ostatních dvou autoři připisují výsledný neúspěch nedostatečné motivaci. Poté, co tyto subjekty odmítly odpovídat a ztrácely pozornost, bylo u nich testování ukončeno. U prvního z nich k tomuto došlo v jedenácté etapě, tedy v poměrně pokročilé fázi testování, u druhého ale již v páté etapě. Ukončení testování ovšem neznamená, že by tyto dva tamaríni nebyli na dostatečné kognitivní úrovni pro pokračování v experimentu. Z tabulky (obr. 9), která udává potřebný počet sezení (45 opakování) pro dosažení stanoveného kritéria sice vyplývá, že celkově potřebovaly dva „neúspěšné“ subjekty více pokusů pro pochopení principu úlohy, nebylo to však pravidlem u každé z etap.

Table 1
Trials to Criterion on Numerousness
Pretraining and Training Tasks

Tasks	Monkeys		
	S14	78-I-1	78-I-2
P4	270	1305	405
T1	45	45	180
T2	45	90	270
P5	90	626*	352
T3	45	90	237
T4	45		45
T5	90		45
T6	180		225
P6	45		45
T7	90		45
T8	90		90
T9	270		
T10	45		

Obr. 9: Tabulka udávající počet opakování každého ze tří subjektů pro jednotlivé etapy (P4-T10). Pokud subjekt splnil stanovené kritérium v rámci jednoho sezení (45 opakování), přešel na nadcházející etapu. V opačném případě došlo další den k opakování stejné etapy. Číslo označené hvězdičkou značí, že subjekt v dané etapě nedokončil všechna sezení.

Zdroj: Thomas & Chase 1980

Shrnutí

Autoři studie uvádí, že byla prokázána určitá úroveň chápání ordinality u kotulů veverovitých. Design experimentu byl zvolen tak, aby subjekty nemohly spoléhat na nominální hodnotu setu (správnost odpovědi byla definována vztahem k dalším dvěma možnostem), a zároveň také tak, aby nebylo možné vybírat podle celkové plochy obrazců (různé veliká a různě umístěná kolečka). Experimentátoři během etap postupně učili tamaríny označovat požadovaný stupeň. Přestože bylo v některých etapách k dosažení stanoveného kritéria zapotřebí mnoha opakování, subjekty se princip ordinality zvládly naučit. To platí i o dvou, u kterých bylo testování ukončeno z důvodu odmítnutí spolupráce.

3.2.4.2 Příklad experimentu č. 5: ordinalita

Autoři Brannon a Terrace publikovali nejprve článek v roce 1998, kde byly stručně popsány výsledky experimentů se dvěma makaky rhesus. O dva roky později pak vyšla detailnější studie rozšířená o data týkající se dalšího subjektu, která dopodrobna popisuje cíle, průběh a výsledky zkoumání.

Brannon & Terrace (1998, 2000) tedy pracovali celkem se třemi makaky rhesus. Jeden z nich byl nejprve trénován tak, aby dokázal seřadit množství 1–4 ve vzestupném pořadí a pochopil tak základní princip ordinality. Druhý makak byl trénován na sestupné pořadí 4–1. Poslední subjekt měl nejprve řadit stimuly v neuspořádaném pořadí (3 – 1 – 2 – 4). Po několika neúspěšných pokusech se ale přešlo také na vzestupné pořadí. Osvojení této operace bylo základem pro další testování.

Cíle experimentu

Dvě problematiky byly pro autory studie stěžejní. V první řadě se jednalo o to, zda se makaci při výběru opravdu řídí pouze početností, nebo jestli zde hrají roli i další faktory, jako je velikosti, barva, tvar stimulu, případně čas, během kterého je stimul prezentován. Tyto faktory byly vyloučeny tím, že byly pro testování použity různé obrazce. Dále bylo cílem zjistit, jestli dochází k numerické reprezentaci pouze na základě jednotlivých nominálních hodnot nebo jsou také nějakým způsobem vnímány jejich vzájemné vztahy.

Metodika

Pro testování byl použit dotykový monitor, na kterém subjekty postupně vybíraly správné odpovědi. První etapa byla tréninková a spočívala v řazení obrázků ve správném pořadí od nejmenšího počtu geometrických obrazců po největší. Na monitoru se tedy najednou objevily 4 obrázky (obr. 10), které měl subjekt seřadit.



Obr. 10: Stimuly použité v experimentu. Příklad opakování kombinuje následující faktory: odlišná barva, tvar, počet, obsah. Makaci začínali na jednoduchých kombinacích, kde se lišil například jen počet geometrických tvarů, skrze postupný trénink ale došli až k takovýmto složitým kombinacím.

Zdroj: Brannon & Terrace 2000

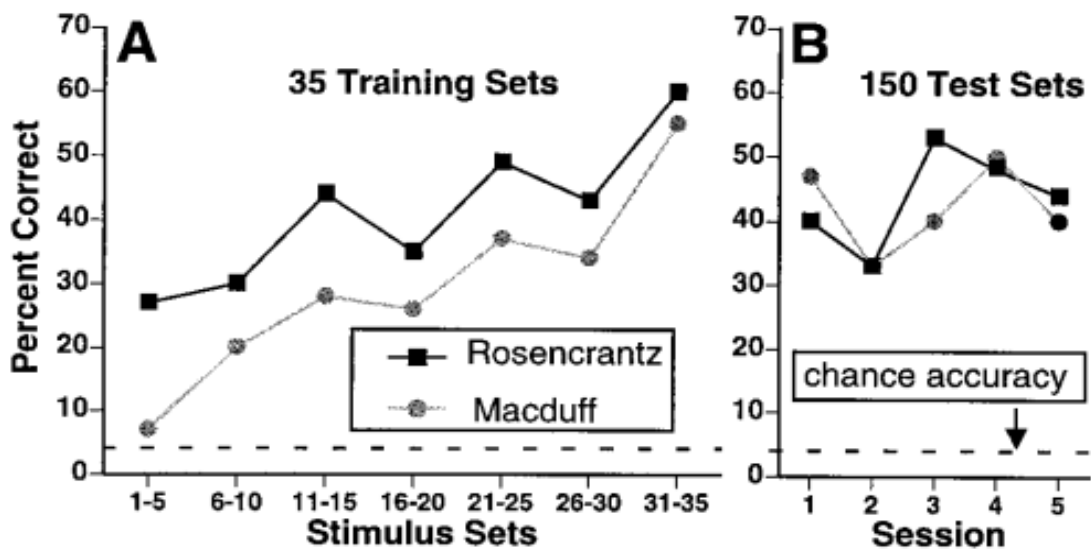
Kombinace obrazců byly vybírány náhodně a subjekty se postupně “proklikaly” ke správné odpovědi. Každá chybná odpověď ukončila opakování a správná odpověď byla následována zvukovým a vizuálním signálem. V případě označení všech 4 obrázků ve správném pořadí dostal subjekt odměnu v podobě kousku potravy.

Aby byla vyloučena memorizace stimulů, bylo pro testovací fázi použito celkem 150 nových schémat a každé bylo zobrazeno jen v jednom opakování. Celkem tedy proběhlo během samotného testu 150 opakování, každé s jinou variantou stimulů.

Po této testovací fázi se experimentátoři rozhodli ověřit prostřednictvím dalšího testování, zda makaci opravdu vychází z principu ordinality. Subjektům byly tentokrát prezentovány pouze 2 stimuly, ovšem zobrazující 1–9 objektů. Možné kombinace sestávaly z nových i z již známých obrázků. Důležité ale je, že subjekty nejprve nedostávaly odměnu za správně seřazené kombinace, v nichž byl alespoň jeden stimul nový (tedy všechny kombinace obsahující stimul s 5–9 obrazci). Nedošlo tedy k pozitivnímu posilování této možnosti, což znamená, že se makaci neučili vnímat nový stimul jako správnou odpověď. Vzhledem k tomuto postupu vylučujícímu memorizaci a k náhodnému výběru stimulů pro každé opakování tedy lze říct, že subjekty označovaly spontánně obrazce pouze na základě naučeného principu ordinality. Až v následující a poslední etapě testování experimentátoři přešli k odměňování všech správných odpovědí (tedy odměna za každou správně seřazenou kombinaci bez ohledu na to, zda se jedná o známý nebo nový stimul).

Výsledky experimentu

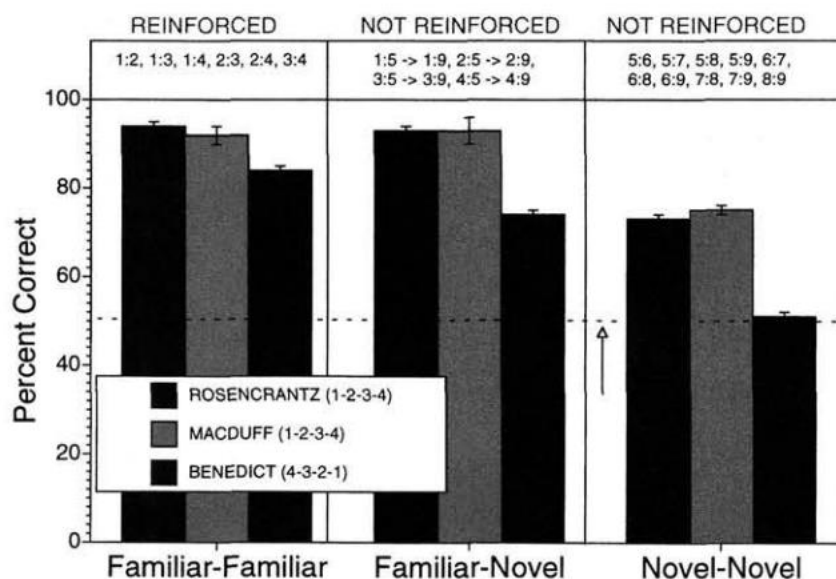
Během tréninkové fáze, kdy subjekty řadily množství od 1 do 4, se všechny tři postupně zlepšovaly. Autoři připouští, že toto zlepšování mohlo být způsobeno tím, že pro každý set stimulů bylo provedeno nejméně 60 opakování, takže subjekty mohly postupovat na základě pochopení principu ordinality, ale také podle jiných faktorů (například konfigurace obrazců). Jak ale zobrazuje graf níže (obr. 11), dva ze tří subjektů si vedly velmi dobře a dosahovaly signifikantní úspěšnosti už při prvním opakování během každé z 35 tréninkových etap, což vypovídá o tom, že musely při svém rozhodování vycházet z faktoru numerosity. V samotné testovací fázi si všichni makaci dále vedli signifikantně nad stanovenou úrovní náhody. Vývoj tréninkové i testovací fáze je zobrazen v následujících grafech (obr. 11).



Obr. 11: Vývoj tréninkové a testovací fáze. Graf A zobrazuje procentuální úspěšnost makaků Rosencrantze a Macduffa v 35 tréninkových etapách. Graf B zobrazuje výsledky testovací fáze, které se pohybují vysoko nad hranicí náhodného výběru (přerušovaná čára označená jako chance accuracy).

Zdroj: Brannon & Terrace 2000

Výsledky procentuální úspěšnosti ověřovacího testování, které obsahovalo kombinace dvou stimulů s 1-9 obrazci bez odměňování výběrů nového stimulu, jsou zobrazeny v následujícím grafu (obr. 12).



Obr. 12: Graf první fáze ověřujícího testování. Sloupce znázorňují výši procentuální úspěšnosti jednotlivých subjektů. Familiar-Familiar označuje stimuly, se kterými se subjekty seznámili během předchozího testování. Familiar-Novel znamená kombinaci jednoho známého a jednoho nového stimulu a Novel-Novel jsou dva nové neznámé stimuly. Číselné kombinace nad sloupci grafu indikují různé kombinace setů.

Zdroj: Brannon & Terrace 2000

Dva ze tří makaků dosáhli vysoké procentuální úspěšnosti ve všech kategoriích. V první etapě byly jejich výsledky nižší v případě kombinace *Novel-Novel*, i tak se ale pohybovaly signifikantně nad úrovní náhodného výběru odpovědi. Autoři uvádí, že celkově správně seřadili asi 75 % nových stimulů zobrazujících množství 5-9. Třetí ze subjektů v této úloze neuspěl, což mohlo být způsobeno odlišným směrem předchozího tréninku, ale také individuální úrovní kognice nebo personalitou zvířete. V druhé etapě ale došlo díky pozitivnímu posilování všech správných odpovědí i u tohoto k makaka ke zlepšení.

Z analýzy výsledků pro jednotlivé kombinace počtu obrazců také vychází, že volba odpovědi probíhala skrze *analogue magnitude system*. Čím větší byl číselný rozdíl mezi stimuly, tím vyšší bylo procento správných odpovědí (u kombinací 1 vs. 9 se v průměru blížila 100 %). Zároveň byla úspěšnost závislá na poměru, tedy u kombinací 1 vs. 2 vyšší než u kombinací 8 vs. 9. Se stoupajícím poměrem se na konec i prodlužoval čas odpovědi.

Shrnutí

Autoři se snažili koncipovat experiment tak, aby byl počet obrazců jediným faktorem pro výběr správných odpovědí. V tréninkové fázi naučili tři makaky rhesus pravidlo ordinality pro počet 1-4 ve vzestupném a sestupném pořadí. Jeho osvojení bylo ověřeno na nových stimulech v testovací fázi. Jako důkaz posloužilo také doplňkové testování, v němž makaci řadili dvojice stimulů zobrazujících 1-9 obrazců. Otázkou zde zůstává, proč se autoři rozhodli pouze pro kombinaci dvou stimulů. Pokud makaci opravdu pochopili pravidla vzestupnosti a sestupnosti jednotlivých množství, měli by být schopni je aplikovat i u vyššího počtu stimulů,

stejně jako v první části experimentu. Získaná data v každém případě naznačují, že subjekty pochopily vzájemné vztahy mezi stimuly.

3.2.4.3 Ordinalita u dalších druhů primátů

Malpa hnědá (*Cebus apella*)

Judge et al. (2005) použili úplně stejnou metodiku jako Brannon a Terrace (2000), aby prokázali schopnost chápání ordinality u zástupců novosvětských primátů, konkrétně u tří malp hnědých, které měly předchozí zkušenosti s testováním v oblasti numerosity. Jednotlivé etapy tréninku a testování probíhaly podobně jako u makaků rhesus, pouze s tím rozdílem, že všechny tři subjekty byly učeny na vzestupné pořadí obrazců. Výsledky testování jsou také podobné jako u makaků: obecně lze říci, že malpy v testování uspěly. Při analýze chybovosti ovšem autoři studie přišli na to, že 2 ze 3 opic se u porovnávání dvou stimulů s 5–9 obrazci řídily do určité míry jiným faktorem než početností, a to celkovou plochou. Pokud měl stimul menší počet obrazců, které ale zabíraly celkově větší povrch než druhá možnost, odpovídaly přibližně na úrovni náhodného rozhodování. To znamená, že zde zohledňovaly pravděpodobně jak početnost, tak velikost plochy.

V celkovém shrnutí se dá konstatovat, že úroveň kognice v prezentovaných úlohách byla u makaků rhesus a u malp hnědých stejná.

3.2.5 Symbolické reprezentace početnosti

Všechny výše zmíněné studie vypovídají o určité úrovni numerických kompetencí primátů. Chápání numerických symbolů, tedy čísel jako takových, by mohlo být vnímáno jako “nejvyšší” stupeň. Právě jeho prostřednictvím jsou realizovány některé numerické operace u lidí. Studie týkající se symbolických reprezentací početnosti tedy zkoumají, zda jsou primáti schopni uvědomit si vztah mezi hodnotou a její symbolickou reprezentací, a dále uspět v úlohách relativní početnosti, sumace i ordinality.

Základním předpokladem pro takovéto úlohy je přiřazení konkrétního symbolu k hodnotě. Všechny studie zabývající se tímto tématem, které slouží jako podklady pro tuto práci, mají tedy společné to, že subjekty prochází tréninkovou fází, během které se například metodou matching-to-sample (např. Boysen & Berntson 1989; Biro & Matsuzawa 2001) nebo postupnou enumerací (Beran & Rumbaugh 2001) učí jednotlivé symboly, nejčastěji samotná čísla, a jejich hodnoty.

V experimentech zaměřených na symbolickou reprezentaci početnosti figurují více než jiné druhy primátů šimpanzi (např. Boysen & Berntson 1989; Biro & Matsuzawa 2001; Beran & Rumbaugh 2001). V případě těchto studií se jedná o zvířata, která byla od narození držena v zajetí a trénována v kognitivních úlohách. Je zřejmé, že díky takové přípravě byla schopna mnohem složitějších úloh než méně trénovaní jedinci a pravděpodobně představovala nejvyšší možnou úroveň kognice v této oblasti mezi non-humánními primáty.

Vzhledem k tomu, že numerické úlohy se symbolickou reprezentací jsou zároveň kombinovány s dalšími operacemi, jsou také použité metodiky velmi různorodé a zahrnují jak využití počítačových programů, tak jiných zajímavě sestavených experimentálních pomůcek.

Vzhledem k rozsahu této práce není možné představit všechny takové studie, bude zde ale podrobně popsána jedna z nich, která dle mého názoru nejnázorněji představuje kombinaci symbolické reprezentace (zde konkrétně arabské číslice) a numerické operace (sumace).

3.2.5.1 Příklad experimentu č. 6: Symbolické reprezentace početnosti

Boysen & Berntson (1989) publikovali studii, které se zúčastnil pouze jeden subjekt, a to šimpanzí samička jménem Sheba. Sheba žila od 4 měsíců do věku 2,5 let v lidské domácnosti, poté byla přemístěna do zoologické zahrady. Od té doby byla trénována v nejrůznějších oblastech. Žádná z nich se přímo netýkala numerických kompetencí, nicméně měla zkušenosti s úlohami založenými na principu matching-to-sample.

Cíle experimentu

Autoři studie představují šimpanze jako ideální model pro zkoumání numerických schopností u zvířat z důvodu jeho podobnosti s lidmi, a také díky kognitivním schopnostem prokázaným v dřívějších pracích. Práce má být tedy důkazem o přítomnosti numerických kompetencí u tohoto druhu.

Metodika

Před samotným experimentem se Sheba naučila nejprve číslice od 1 do 3 a jejich hodnoty. Postupně přiřazovala určitý počet kousků potravy ke kulatým plackám, na kterých byl připevněný stejný počet kovových plíšků. Tyto placky byly postupně nahrazovány kartami s číslicemi vyjadřujícími stejné hodnoty. V další etapě byl využit monitor, na kterém se postupně objevovala jednotlivá čísla a Sheba podle nich vybírala správnou placku s odpovídajícím počtem plíšků. V této fázi bylo zařazeno také číslo 4 a 0. Pro ověření, zda Sheba opravdu chápe význam číslic, před ní byly nakonec v několika opakováních položeny 1-3 předměty (např. baterka, nebo cívka) a karty s čísly v řadě vedle sebe. Šimpanzice měla za úkol označit správný počet stimulů, za což byla odměněna.

První testovací fáze experimentu probíhala v místnosti, kde byla vytvořena 3 různá místa pro ukrytí kousku pomeranče přibližně 2 metry od sebe a dále stupínek, na němž byly položeny karty s čísly 1-4. Experimentátor nejprve provedl Shebu po místnosti a všechna místa jí ukázal. Poté šimpanzice sama postupně obcházela tato místa s 1-4 ukrytými kousky pomeranče, a nakonec vybírala správnou kartu s odpovídajícím číslem. Experimentátor seděl během většiny testovacích etap před Shebou, až na tu poslední, kdy seděl za ní, tudíž na něj šimpanzice neviděla a nemohla být nijak ovlivněna jeho reakcí (*blind testing*).

Druhá testovací fáze už se obešla bez potravních stimulů, ty byly nahrazeny kartami s čísly 0-3. Na dvou ze tří možných míst se tedy nacházely číslice, které si Sheba musela zapamatovat, následně je sečíst a na stupínku vybrat kartu s celkovou sumou obou čísel.

Výsledky experimentu

Jelikož úspěšnost v tréninkové fázi byla podmínkou pro realizaci tohoto experimentu, budou zde uvedeny pouze výsledky dvou etap samotného testování. V první z nich (experiment 1 v tabulce 1) Sheba uspěla nad očekávání, jelikož už od prvních opakování chápala, co se od ní očekává a dokázala zkombinovat všechny požadované úkony (pohyb po místnosti, zapamatování si stimulů, výběr odpovědi).

V sumaci číselných symbolů (experiment 2 v tabulce 1) Sheba také uspěla, i když autoři uvádí několik alternativních strategií, které mohla využít pro výběr správné odpovědi (například pokud byla schována čísla 1 a 2, jednoduše se mohla rozhodnout pro výběr jednoho ze zbývajících, tedy 3 nebo 4). Tyto hypotézy ovšem nemění nic na skutečnosti, že Sheba v signifikantním počtu případů volila správný součet čísel.

Experiment 1	Opakování	Správné odpovědi	Správné odpovědi (%)	Hranice náhody (%)
1 – 3 stimuly	82	60	73	33
1 – 4 stimuly	89	75	84	25
<i>Blind testing</i>	38	28	74	25
Experiment 2				
1 – 4 stimuly	21	16	76	25
<i>Blind testing</i>	20	17	85	25

Tab. 1: Výsledky experimentů se šimpanzicí Shebou
Zdroj dat: Boysen & Berntson (1989)

Shrnutí

Sheba v právě popsaném experimentu prokázala schopnost počítat nejen samotné stimuly, ale i číselné symboly vyjadřující jejich hodnotu do celkového součtu 4. Vzhledem k tomu, že se jednalo o takto malé hodnoty, není možné s jistotou říci, že přitom postupovala pouze na základě principu sumace a nevyužívala i jiné strategie. Autoři se ale přiklání k tomu, že její výkon splňuje kritéria pro *counting* definovaná Gelmanem & Gallistelem (1978): princip kardinality a ordinality a užití numerických symbolů. Chápání ordinality přitom Sheba prokázala již dříve v jiných experimentech (Boysen et al. 1988).

3.2.5.2 Další úlohy symbolické reprezentace početnosti zkoumané u šimpanzů

Výše popsaný experiment byl důkazem toho, že šimpanzi dokáží zvládat jednoduchou sumaci kvantit vyjádřených pomocí symbolů. To samozřejmě znamená, že se mohou naučit, jakému množství jednotlivé symboly odpovídají. Samotné přiřazování množství k číselným symbolům bylo vyzkoušeno v jiném experimentu na dvou šimpanzích, Laně a Mercurym, kdy první z nich „dopočítal“ až do čísla 6, a druhý do čísla 7 (Beran & Rumbaugh 2001). Pokus probíhal tak, že se na monitoru objevilo číslo a subjekt měl za úkol označit odpovídající počet

puntíků. V této konstruktivní enumeraci byla zaznamenána klesající úspěšnost se zvyšujícím se číslem, to znamená, že pro šimpanze bylo obtížnější určit hodnotu vyšších čísel.

Jiný experiment byl zaměřen mimo samotné chápání číselných symbolů také na koncept nuly (Biro & Matsuzawa 2001). Subjektem byla velmi zkušená šimpanzice Ai, která byla trénována na užívání arabských číslic už od svých 5 let. Zнала tedy čísla od 1 do 9 a uměla je seřadit ve vzestupném pořadí. Ve třech etapách testování přiřazovala Ai na monitoru nejprve jedno ze dvou zobrazených čísel k určitému počtu puntíků a dále jeden ze dvou setů puntíků k zobrazenému číslu. Nakonec vybírala správné vzestupné pořadí dvou a následně tří čísel. Během celého testování byla použita čísla od 0 do 9. Ai zvládla všechny tři typy úloh, což vypovídá o chápání nominálních hodnot jednotlivých čísel, ale také ordinálních vztahů. Symboliku číslic 1–9 znala již předtím, číslice 0 ale pro byla nová. Stejně ale rychle pochopila její význam díky znalosti ostatních symbolů a dokázala ji k nim správně zařadit.

Díky intenzivnímu tréninku, kterým všichni doposud zmínění šimpanzi procházeli, bylo možné zkoumat jejich schopnosti užívání číselného systému za účelem komparace kognitivní úrovně non-humánních primátů a lidí. Jedná se tedy pravděpodobně o nejvyšší stupeň, jakému mohou být tato zvířata v rámci problematiky numerických kompetencí vystavena. Ne všechny studie symbolické reprezentace početnosti ale využívají přímo čísel. Například Evans et al. (2010) využili jako symbol určité hodnoty různý design nádobky, která obsahovala daný počet potravních stimulů. Tento experiment je o to zajímavější, že v něm byly zkoumány a porovnávány dva druhy primátů, a to 4 malpy hnědé a 4 šimpanzi. Během tréninku se subjekty seznámily s nádobkami, které obsahovaly určitý počet banánových peletek. Nádobky přitom byly utavřené, takže jediným vodítkem k určení množství byl jejich specifický design. Ve třech různých fázích testování pak vybíraly mezi kombinacemi nádobek, které obsahovaly banánové peletky v počtu 1–3 (například 1 nádobka se 3 peletkami vs. 2 nádobky s jednou peletkou). Za správnou odpověď bylo považováno označení vyššího celkového počtu banánových peletek. Primáti celkově uspěli pouze v první fázi, kdy porovnávali 1 nádobku s 1 peletkou a 1 nádobku se třemi peletkami. Výsledky druhé fáze (1 nádobka se 3 peletkami vs. několik nádobek s 1 peletkou) byly velmi individuální. 2 ze 4 šimpanzů si vedli signifikantně nad úrovní náhody i v takových kombinacích, které obsahovaly až 5 nádobek s jednou peletkou. V poslední fázi (1 nebo 2 nádobky se třemi peletkami vs. několik nádobek s jednou peletkou) neuspěl ani jeden ze subjektů v těch kombinacích, které obsahovaly 2 nádobky se 3 peletkami. V celkovém souhrnu tedy tito primáti uspěli v základní úloze symbolické reprezentace relativní početnosti, ovšem nikoli v sumaci, kde byl zaznamenán celkový neúspěch, i přes dílčí úspěchy dvou šimpanzů. Jako možný důvod takového výsledku autoři uvádí nedostatek motivace.

3.2.5.3 Symbolické reprezentace početnosti u dalších druhů primátů

Malpa hnědá (*Cebus apella*)

Tento druh byl použit v rámci právě zmíněné studie Evanse et al. (2010). Již popsany experiment byl ale ve skutečnosti až její druhou částí. Ta první byla věnována právě malpám a odkazovala ještě na jinou studii, ve které se zkoumalo, zda budou tito primáti preferovat 1 předmět symbolizující 3 potravní odměny před více (1–5) předměty, z nichž každý představuje 1 potravní odměnu (Adessi et al. 2007). Této studii se účastnilo 10 malp hnědých,

z toho 4 signifikantně vybíraly reprezentaci celkově vyššího počtu odměn. Další 4 systematicky vybíraly stimul symbolizující 3 odměny, i když druhá možnost představovala vyšší počet. Zbylé dvě vybíraly stimul odpovídající 3 odměnám pouze v případě, že druhou možností byl pouze 1 stimul se symbolikou 1 odměny.

Evans et al. (2010) pracoval pouze se 4 malpami, které se naučily symboliku 5 různě vypadajících nádobek obsahujících 1–5 potravních odměn (banánových peletek). Poté měly za úkol nejprve porovnávat 1 vs. 1 nádobku, 1 nebo 2 vs. 2 nádobky a 1 nebo 2 nádobky vs. určitý počet viditelných potravních stimulů (1-12). Subjekty se zvládly rychle naučit symboliku jednotlivých nádobek, co se ale týče samotné sumace, ukázalo se, že se nechávaly ovlivnit počtem nádobek, nikoliv množstvím potravních odměn, které reprezentovaly. Měly tak tendenci označovat jako správnou odpověď více nádobek, i když obsahovaly méně potravy.

Z těchto experimentů tedy vychází, že schopnost sumace pomocí symbolických reprezentací je u malp limitovaná, přestože se zvládají naučit význam symbolů. Zároveň je metodika experimentu poměrně komplikovaná, kombinování různých počtů peletek s různými počty nádobek považují za příliš komplikovaný způsob, jak prokázat schopnost sumace prostřednictvím symbolických reprezentací.

Kotul veverovitý (*Saimiri sciureus*)

Ve studii z roku 1997 naučili Olthof, Iden a Roberts dva kotuly veverovité nominální hodnotu čísel 0, 1, 3, 5, 7 a 9, která byla namalovaná na dřevěných kostkách. Každé číslo symbolizovalo odpovídající počet nesolených arašídů jako odměnu. Subjekty si nejdříve volily mezi dvěma možnostmi, pak začaly postupně vybírat větší ze dvou čísel a naučily se vztahy mezi všemi možnými kombinacemi. V dalších fázích došlo na sčítání: kombinace jedno číslo vs. součet dvou čísel, dva součty 2 čísel, a nakonec i dva součty 3 čísel. Až na výkyvy u některých konkrétních kombinací (například 3 vs. 1 + 1 nebo 9 vs. 0 + 7) oba kotulové uspěli na velmi vysoké úrovni a signifikantně častěji volili reprezentaci vyššího celkového počtu. Jejich výkon se začal horšit až u kombinací součtů tří čísel, které se rovnaly a převyšovaly číslo 9. Závěrem studie ale je, že tamarini pochopili nominální hodnoty každého symbolu, a také ordinální vztahy uvedených hodnot a jejich číselných reprezentací. Analýza výsledků opět potvrdila vyšší úspěšnost odpovědí u kombinací s větším rozdílem mezi dvěma součty (tedy kritérium poměru mentální reprezentace početnosti). Zajímavé bylo také zjištění, že například u dvojic 1 vs. 0 vybíraly subjekty v 50 % opakování 0, což neodpovídá jednoduchosti úlohy. Špatně odpovídaly také u kombinace 5 vs. 7. Nakonec bylo zjištěno, že kotulové pravděpodobně připodobňují symboly 0 a 5 číslici 9. Po drobných úpravách zobrazení těchto čísel se úspěšnost odpovědí skokově zvýšila

Makak rhesus (*Macaca mulatta*),

Washburn & Rumbaugh (1991) prokázali u makaků rhesus schopnost naučit se rozeznávání arabských číslic 0–9. Subjekty na monitoru kurzorem označovaly číslice 0–9 a podle toho dostávaly odpovídající počet granulí jako odměnu. Tyto granule přitom vypadávaly z automatického dávkovače. Autoři připouštěli, že by se makaci mohli řídit nikoli podle množství, ale podle časového úseku, během kterého granule vypadávaly ven. Proto se v jedné z fází experimentu zaměřili na to, aby se doba potřebná pro vypadnutí 2 a více granulí

pohybovala v rozmezí 0.25 až 2.25 sekund (náhodně a nezávisle na počtu granulí). Tento možný ovlivňující faktor tak byl eliminován, aniž by se statisticky zhoršila úspěšnost. V poslední fázi experimentu se autoři zaměřili na princip ordinality. Na monitoru ukázali makakům 5 různých číslic v různých kombinacích a konfiguracích. Primáti v signifikantní většině opakování začali postupně označovat číslice v pořadí od největšího po nejmenší, takže je dokázali správně seřadit.

Metodicky odlišný, ale zajímavý experiment byl publikován v roce 2007. Harris et al. (2007) se rozhodli využít arabských číslic nikoli jako symbolických reprezentací pro počet předmětů, ale úkonů. Princip tedy spočíval v tom, že makaci měli za úkol nejprve vyřešit určitý počet jednoduchých prostorových bludišť zobrazených na monitoru (1, 2, 3, 5 nebo 9). Poté se na téže monitoru objevily dva čtverce, jeden s odpovídající arabskou číslicí, anebo s malými obrázky ve stejném počtu, a druhý s písmenem D jako označením pro *different*, tedy odlišný počet. Pokud se číslice případně počet obrázků shodovala s počtem vyřešených bludišť, měl ji subjekt označit jako správnou odpověď. Pokud se množství neshodovalo, bylo správnou volbou písmeno D. Testováni byli 4 makaci. Všichni dokázali správně odpovídat v první etapě, během které řešili v rámci jednoho opakování pouze 1 nebo 9 bludišť. Tři makaci odpovídali správně, když bylo na výběr mezi 1, 5 a 9 bludišti, ale pouze jeden zvládl úlohu při řešení 1, 3, 5 a 9 bludišť. Při náhodném střídání 1, 2, 3, 5 a 9 bludišť neuspěl ani jeden z makaků. Výsledky této poměrně složité kognitivní úlohy, ve které šlo mimo samotné chápání numerických symbolů také o epizodickou paměť, tedy byly výsledky individuální. Nejvyšší úspěšnost v nejjednodušší fázi vypovídá o tom, že makaci spíše než konkrétní absolutní hodnoty využili jako východiska porovnání relativního množství, tedy 1 bludiště = málo vs 9 bludišť = hodně.

3.2.6 Shrnutí

Vzhledem k tomu, že uvedené experimenty zabývající se numerickými kompetencemi měly stanoveny různorodé cíle, byly provedeny s různými druhy primátů, využívaly odlišných metodik, a především dosáhly odlišných výsledků, nelze všechny shrnout konkrétním závěrem. Přesto se ale pokusím uvést společné body a poznatky, ke kterým autoři dospěli, týkající se zejména teoretických aspektů této problematiky uvedených na začátku práce.

Z obecného hlediska všechny druhy primátů, které byly využity v popsáných studiích, dosahují určité úrovně v oblastech relativní početnosti, sumace, ordinality a symbolické reprezentace početnosti (tab. 2). V prvních dvou zmíněných kategoriích přitom jde do určité míry o projevy přirozeného chování, nikoli výsledek procesu učení. To dokazují výsledky experimentů s makaky rhesus z ostrova Cayo Santiago. Při nich bylo zjištěno, že tito primáti spontánně vybírají větší počet potravních stimulů, a to i po provedení jednoduchých operací sčítání a odčítání (tedy přidání nebo odebrání stimulů), pokud je maximální množství stimulů v obou, případně alespoň v jednom z výběrových setů, <4 (Hauser 2000, Sulkowski & Hauser 2001). Rozeznávání správných výsledků sumace bylo potvrzeno u těchto volně žijících zvířat i v případě vyššího počtu stimulů (až 8), ovšem pouze prostřednictvím metodiky *violation of expectancy*, při které subjekty nevolí aktivně jednu z možností (Flombaum et al 2005). Analýza je zpracovávána na základě monitoringu a porovnání jejich reakce na správný a nesprávný výsledek operace.

V laboratorních podmínkách uspěly jiné druhy i v úlohách s vyšším počtem stimulů (maximálně 10 u lidoopů). Důležitým faktorem je přitom způsob práce se subjekty, které jsou ve většině případů zvyklé na kognitivní trénink. Zároveň je často součástí experimentu přípravná fáze, která rozvíjí jejich schopnosti v dané oblasti. Dosažení určité úrovně je podmínkou pro zahájení samotného testovacího procesu. Zásadní je také motivace subjektů, jejíž nedostatek někteří autoři uvádí jako možný důvod neúspěchu experimentu (Thomas & Chase 1980, Beran et al. 2008, Evans 2010).

Přípravná fáze je nezbytnou součástí takových experimentů, které mají složitou metodiku a vyžadují využití složitějšího aparátu. To je případ popsaných studií zaměřených na zkoumání ordinality. Například experiment Brannon & Terrace (1998, 2000) byl složen z několika tréninkových etap, samotného testování, a nakonec ještě doplňkového ověřovacího testování. Skutečnost, že kompletní design a průběh tohoto experimentu byl později převzat jinými autory pro testování malp hnědých považují za důkaz jeho kvality a relevance.

Opakujícím se tématem při výzkumu relativní početnosti, sumace i ordinality je mentální reprezentace početnosti. Analýzy výsledků velké skupiny experimentů potvrzují hypotézu využívání principu *analogue magnitude system*, a to z důvodu přítomnosti následujících společných rysů, které jej charakterizují. Výkon subjektů je závislý na množství porovnávaných stimulů: čím větší je rozdíl mezi dvěma kvantitami, tím lepších výsledků subjekty dosahují, a dále na jejich vzájemném poměru. Ten se zdá být rozhodující, jelikož byly v několika experimentech prokázány obtížnosti v rozlišování nízkých hodnot, které mají ovšem mezi sebou vysoký poměr. Jedinou výjimkou stavící se proti využívání principu *analogue magnitude system* je Hauser (2000), který se domnívá, že tento systém není uplatňován při spontánním rozlišování množství u volně žijících makaků rhesus. Schopnost správného rozlišování pouze v případě množství maximálně 4 stimulů by teoreticky odpovídala druhému systému (*object tracking system*). Zajímavé ale je, že k tomu se explicitně nepřiklání žádná ze studií.

Z popisu studií zaměřených relativní početnost, sumaci a ordinalitu vychází ještě další poznatky, které sice nelze generalizovat, ale stejně je dle mého názoru důležité je zde zmínit. Jedná se o faktory, které mohou ovlivnit volbu primátů v některých úlohách. Takovým faktorem může být například plocha, jakou zabírají stimuly (Judge et al. 2005) nebo čas, během kterého jsou subjektům prezentovány (Beran 2007). Dalším faktorem, který byl naopak v několika studiích vyloučen, je objem stimulů (Beran 2007; Hauser 2000, Uller et al. 2001). Ukázalo se, že primáti preferují více menších kusů než méně větších, respektive jsou vnímavější vůči počtu než vůči objemu.

Poslední oblastí numerických kompetencí vymezenou v této práci je symbolická reprezentace početnosti. Jedná se o realizaci úloh předchozích tří kategorií, ovšem prostřednictvím symbolů zastupujících jednotlivá množství. Zde byla předchozí příprava subjektů nezbytná, jelikož se v každém z experimentů nejprve musely naučit, jaký symbol (nejčastěji číslo) odpovídá jaké hodnotě. Mezi zkoumanými druhy jako jsou kotulové veverovítí, malpy hnědé nebo makaci rhesus, dosahují nejvyšší úrovně v této oblasti šimpanzi, což je pravděpodobně výsledek vyšší úrovně jejich kognice, ale také délky a intenzity tréninku. Právě jejich výkony se nejvíce přibližují *counting*, jelikož dokazují chápání principů kardinality, ordinality i osvojení numerického systému. I tak jsou ale limitovány množstvím

symbolů, které se subjekt zvládne naučit. Mezi zkoumanými experimenty byl nejvyšší počet naučených číselných symbolů, se kterými následně subjekt operoval, 9 (Biro & Matsuzawa 2001). Vyšší čísla se v žádné z dohledaných prací neobjevují.

Pro přehlednější shrnutí je v následující tabulce (tab. 2) uvedeno, jakých nejvyšších výsledků dosáhly uvedené druhy primátů v rámci čtyř stanovených oblastí numerických kompetencí. Jedná se o výstupy z výše popsaných experimentů a u každého taxonu jsou uvedeny nejlepší výkony jeho zástupců.

	Relativní početnost (maximální množství v porovnávaných setech)	Sumace (maximální výsledek operace)	Ordinalita (Maximální hodnota stimulů)	Symbolické operace
Kotul veverovitý	Viz symbolické operace	Viz symbolické operace	7 (řazení 3 stimulů)	Chápání symbolů: čísla 0,3,5,7,9
				Sumace: 13 (součet dvou symbolů)
Tamarín pinčí	-	3 stimulů	-	-
Malpa hnědá	9 stimulů	6 stimulů (závislost na poměru)	4 (řazení 4 stimulů)	Chápání symbolů: 5 symbolů
			9 (řazení 2 stimulů)	Sumace: 8 (součet 6 symbolů)
Makak rhesus (volně žijící)	4 stimulů	8 stimulů (závislost na poměru)	-	-
		3 stimulů (odčítání)		
Makak rhesus (v lidské péči)	10 stimulů (závislost na poměru)	-	4 (řazení 4 stimulů)	Chápání symbolů: čísla 0-9
			9 (řazení 2 stimulů)	Ordinalita: 9 (řazení 5 čísel)
Pavián anubi	8 stimulů (závislost na poměru)	-	-	-
Orangutan bornejský	10 stimulů (závislost na poměru)	6 stimulů (sčítání i odčítání)	-	-
Gorila nížinná	10 stimulů (závislost na poměru)	8 stimulů	-	-

Šimpanz	10 stimulů (závislost na poměru)	9 stimulů (sčítání i odčítání, až 3 členy)	-	Chápání symbolů: čísla 0-9
				Sumace: 8 (součet 6 symbolů)
				Ordinalita: řazení čísel 0-9
Bonobo	10 stimulů (závislost na poměru)	-	-	-

Tab. 2: Přehled nejvyšších dosažených výsledků v numerických úlohách u vybraných druhů primátů.

V tabulce jsou uvedeny výsledky ve čtyřech stanovených oblastech numerických kompetencí. U relativní početnosti je uveden maximální počet stimulů v rámci porovnávaných setů. Závislost na poměru u některých výsledků je uvedena z toho důvodu, že uvedená hodnota neznamená, že jsou subjekty stejně úspěšné u všech možných kombinací. Celková úspěšnost zahrnuje i nesprávné odpovědi zejména u kombinací, kde je vysoký poměr mezi dvěma množstvím.

Pro sumaci je uvedena maximální hodnota výsledku operace, přičemž nejčastěji se jedná o sčítání dvou setů, tedy přidávání stimulů. Výjimkou jsou volně žijící makaci, orangutani a šimpanzi, kteří řešili i úlohy odčítání. U šimpanzů je zaznamenán také úspěch při sčítání 3 množství.

U ordinality je uvedena hodnota stimulů, jelikož v experimentech subjekty často pracovaly se stimuly, na kterých byl zobrazen různý počet geometrických tvarů. Také je popsáno, kolik takových stimulů seřazovaly.

Pro symbolické operace jsou výsledky pro každý typ úloh uvedeny zvlášť. Chápání symbolů – kolik a jaké symboly/čísla se primáti byli schopni naučit, Sumace – maximální výsledek úloh a počet symbolů, který byl v úlohách použit, ordinalita – kolik čísel dokázali seřadit.

Pokud u některého druhu není uvedena žádná hodnota, znamená to, že v této práci nebyla jako zdroj použita studie, která by se jím v dané oblasti zabývala.

4 Závěr

Tématem této bakalářské práce byly numerické kompetence a symbolické operace u primátů a metodické přístupy jejich zkoumání. V první části, byly uvedeny základní definice a pojmy týkající se této problematiky za pomoci odborných publikací, které se jí věnují. Zejména byly vysvětleny termíny pro kognitivní operace jako jsou protonumerické kompetence, subitizace, estimace a *counting* neboli počítání.

Následně jsem se věnovala tématu, které zmiňuje velký počet autorů, a tím je způsob vnímání početnosti u primátů, tedy mentální reprezentace, která se utváří v jejich mysli při smyslovém, nejčastěji vizuálním zachycení určitého počtu stimulů. Nejčastěji jsou zmiňovány dva systémy, *analogue magnitude system* a *object tracking system*.

V první části jsem se dále zabývala různými přístupy uplatňovanými při výzkumech numerických kompetencí u primátů. Z mého pohledu zásadním bodem je přitom rozdíl mezi zkoumáním schopností subjektů žijících v laboratoři, které mají zpravidla předchozí zkušenosti s kognitivním tréninkem, a subjektů volně žijících. V této souvislosti jsem se také v poslední části této práce věnované přehledu teorie věnovala konkrétním projevům přirozeného chování primátů, při nichž jsou numerické kompetence uplatňovány. Jedná se například o vyhledávání potravy, chování ve skupině nebo obraně teritoria.

Druhá část práce byla zaměřena na experimenty zkoumající 4 základní oblasti numerických úloh: relativní početnost, sumaci, ordinalitu a symbolickou reprezentaci početnosti. Pro každou z těchto kategorií jsem prezentovala konkrétní studie s důrazem na jejich cíle, metodiku a výsledky.

Na závěr jsem se pokusila sepsat shrnutí společných poznatků, ke kterým autoři studií dospěli, což bylo vedle představení teoretického základu tohoto tématu hlavním cílem práce. V první řadě z analýz výsledků několika experimentů vyplynulo, že mentální reprezentace početnosti u primátů probíhá prostřednictvím *analogue magnitude system*. Dále lze obecně konstatovat, že primáti zvládají s vysokou úspěšností základní numerické operace, pokud počet stimulů ve dvou výběrových setech nepřekračuje množství 4. To platí jak pro zvířata chovaná v zajetí, tak pro ta volně žijící, i když primáti v lidské péči nemusí být vždy pro testování dostatečně motivováni. Úspěšnost pro vyšší počet stimulů je ve většině případů podmíněna předchozím tréninkem. Jedinci se postupně během testování zlepšují a zvládají složitější úlohy. Díky tréninku jsou nakonec primáti schopni se do určité míry naučit symbolické reprezentace jednotlivých množství (≤ 9) a provádět s nimi jednoduché matematické operace. Vrcholem jsou experimenty se šimpanzi jako Sheba nebo Ai, kteří na základě mnohaletých zkušeností zvládají úlohy, jež se dají považovat za základ opravdového počítání.

Zpracované téma je zajímavou problematikou, která nutí k zamyšlení se nad složitostí mentálních procesů vedoucích ke zdánlivě jednoduchým úkonům jako je porovnávání množství nebo například sčítání. Mezi všemi dohledanými experimenty jsem narazila na nejrůznější sofistikované a důkladně promyšlené metodiky. Přesto ale hodnotím jako nejpřínosnější metodicky jednoduché pokusy s volně žijícími zvířaty. Lidská zvědavost sice vybízí ke zkoumání a porovnávání maximální dosažitelné úrovně těchto numerických schopností, výzkum přirozeného chování, který je v této problematice minoritní, je ale dle mého

názoru i z morálního hlediska lepším způsobem, jak se seznámit s přirozenou úrovní kognice primátů.

5 Literatura

- Agrillo C, Bisazza A. Understanding the origin of number sense: a review of fish studies. 2018. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. **373**:20160511.
- Anderson US, Stoinski TS, Bloomsmith MA, Marr MJ, Smith AD, Maple TL. 2005. Relative Numerosity Judgment and Summation in Young and Old Western Lowland Gorillas. *Journal of Comparative Psychology*. **119**:285-295.
- Barnard AM, Hughes KD, Gerhardt RR, Divincenti L, Bovee JM, Cantlon JF. 2013. Inherently Analog Quantity Representations in Olive Baboons (*Papio anubis*). *Frontiers in Psychology*. **4**:253.
- Beran MJ. 2001. Summation and numerosness judgments of sequentially presented sets of items by chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*. **115**:181–191.
- Beran MJ. 2007. Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) enumerate large and small sequentially presented sets of items using analog numerical representations. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*. **33**:42-54.
- Beran MJ, Evans TA, Leighty KA, Harris EH, Rice D. 2008. Summation and quantity judgments of sequentially presented sets by capuchin monkeys (*Cebus apella*). *American Journal of Primatology*. **70**:191–194.
- Beran MJ, Rumbaugh DM. 2001. "Constructive" enumeration by chimpanzees (*Pan troglodytes*) on a computerized task. *Animal Cognition*. **4**:81-89.
- Biro D, Matsuzawa T. 2001. Use of numerical symbols by the chimpanzee (*Pan troglodytes*): Cardinals, ordinals, and the introduction of zero. *Animal Cognition*, **4**:193–199.
- Boesch, C. Cooperative hunting roles among taï chimpanzees. 2002. *Human Nature*. **13**:27–46.
- Boesch Ch. 1994. Cooperative hunting in wild chimpanzees. *Animal Behaviour*. **48**:653- 667.
- Boysen ST, Berntson GG. 1989. Numerical competence in a chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*. **103**:23–31.
- Boysen ST, Berntson GG, Hannan MB, Cacioppo JT. 1996. Quantity-based interference and symbolic representations in chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*. **22**:76-86.
- Brannon EM, Terrace HS. 2000. Representation of the numerosities 1-9 by rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*. **26**:31-49.
- Call J. 2000. Estimating and operating on discrete quantities in orangutans (*Pongo pygmaeus*). *Journal of Comparative Psychology*. **114**:136-47.
- Cantlon JF, Safford KE, Brannon EM. 2010. Spontaneous analog number representations in 3-year-old children. *Developmental Science*. **13**:289-97.

- Davis H, Pérusse R. 1988. Numerical competence in animals: Definitional issues, current evidence, and a new research agenda. *Behavioral and Brain Sciences*. **11**:561-579.
- Dolotovskaya S, Flores Amasifuen C, Haas CE, Nummert F, Heymann EW. 2019. Active anti-predator behaviour of red titi monkeys (*Plecturocebus cupreus*). *Primate Biology*. **6**:59-64.
- Dutour M, Kalb N, Salis A, Randler Ch. 2021. Number of callers may affect the response to conspecific mobbing calls in great tits (*Parus major*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*. **75**: 1-8.
- Fischer J, Zinner D. 2011. Communication and Cognition in Primate Group Movement. *International Journal of Primatology*. **32**:1279-1295.
- Flombaum JI., Junge JA, Hauser MD. 2005. Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) spontaneously compute addition operations over large numbers. *Cognition*. **97**:315-325.
- Frank MC, Fedorenko E, Lai P, Saxe R, Gibson E. 2012. Verbal interference suppresses exact numerical representation. *Cognitive Psychology*. **64**:74-92.
- Gallistel CR, Gelman R. 1992. Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*. **44**: 43- 74.
- Hanus D, Call J. 2007. Discrete quantity judgments in the great apes (*Pan paniscus*, *Pan troglodytes*, *Gorilla gorilla*, *Pongo pygmaeus*): The effect of presenting whole sets versus item-by-item. *Journal of Comparative Psychology*. **121**:241-249.
- Harris EH, Washburn DA, Beran MJ, Sevcik RA. 2007. Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) select Arabic numerals or visual quantities corresponding to a number of sequentially completed maze trials. *Animal Learning & Behavior*. **35**:53–59.
- Hauser MD, Carey S, Hauser LB. 2000. Spontaneous number representation in semi-free-ranging rhesus monkeys. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. **267**:829-833.
- Honda R, Azuma N. 2021. Asymmetric Antipredator Behaviour in a Mixed-Species Colony of Two Non-Mobbing Bird Species. *Ardea*. **109**:167-173.
- Iwamoto T, Mori A, Kawai M, Bekele A. 1996. Anti-predator behavior of gelada baboons. *Primates*. **37**:389–397.
- Judge PG, Evans TA, Vyas DK. 2005. Ordinal Representation of Numeric Quantities by Brown Capuchin Monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*. **31**:79-94.
- Kaufman EL, Lord MW, Reese TW, Volkman J. 1949. The Discrimination of Visual Number. *The American Journal of Psychology*. **62** 498–525.
- Kersey AJ, Cantlon JF. 2017. Primitive Concepts of Number and the Developing Human Brain. *Language Learning and Development*. **13**:191-214.
- Klahr D, Wallace JG. 1973. The role of quantification operators in the development of conservation of quantity. *Cognitive Psychology*. **4**:301-327

- Lyons IM, Beilock SL. 2013. Ordinality and the Nature of Symbolic Numbers. *The Journal of Neuroscience*. **33**:17052-17061.
- Mandler G, Shebo BJ. 1982. Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*. **111**:1-22.
- Nieder A. 2005. Counting on neurons: the neurobiology of numerical competence. *Nature Reviews Neuroscience*. **6**:177-190.
- Nieder A. 2020. The Adaptive Value of Numerical Competence. *Trends in Ecology & Evolution*. **35**:605-617.
- Nieder A, Dehaene S. 2009. Representation of Number in the Brain. *Annual Review of Neuroscience*. **32**:185-208.
- Olthof A, Iden CM, Roberts WA. 1997. Judgments of ordinality and summation of number symbols by squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*. **23**:325–339.
- Piazza M. 2010. Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences*. **14**:542-551.
- Roth AM, Cords M. 2016. Effects of group size and contest location on the outcome and intensity of intergroup contests in wild blue monkeys. *Animal Behaviour*. **113**:49-58.
- Roth G, Dicke U. 2012. Evolution of the brain and intelligence in primates. *Progress in Brain Research*. **195**:413-430.
- Samuni L, Preis A, Mielke A, Deschner T, Wittig RM, Crockford C. 2018. Social bonds facilitate cooperative resource sharing in wild chimpanzees. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. **285**:20181643.
- Scarf D, Hayne H, Colombo M. 2011. Pigeons on Par with Primates in Numerical Competence. *Science*. **334**:1664-1664.
- Scarry CJ. 2013. Between-group contest competition among tufted capuchin monkeys, *Sapajus nigritus*, and the role of male resource defence. *Animal Behaviour*. **85**:931-939.
- Sulkowski GM, Hauser MD. 2001. Can rhesus monkeys spontaneously subtract? *Cognition*. **79**:239-62.
- Suzuki K, Kobayashi T. 2000. Numerical competence in rats (*Rattus norvegicus*): Davis and Bradford (1986) extended. *Journal of Comparative Psychology*. **114**:73–85.
- Thomas RK, Chase L. 1980. Relative numerosness judgments by squirrel monkeys. *Bulletin of the Psychonomic Society*. **16**:79–82.
- Uller C, Hauser M, Carey S. 2001. Spontaneous representation of number in cotton-top tamarins (*Saguinus oedipus*). *Journal of Comparative Psychology*. **115**:248–257.
- Vanmarle K. 2015. Foundations of the Formal Number Concept. Pages 175 – 199 in Geary DC, Berch DB, Koepke, KM, editors. *Evolutionary Origins and Early Development of Number Processing*. Academic Press. Amsterdam.

- Volk JE, Parhami B. 2020. Number Representation and Arithmetic in the Human Brain. 2020 11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON):712-717.
- Von Glasersfeld E. 1982. Subitizing: The role of figural patterns in the development of numerical concepts. *Archives de Psychologie*. **50**:191–218.
- Washburn DA, Rumbaugh DM. 1991. Ordinal Judgments of Numerical Symbols by Macaques (*Macaca Mulatta*). *Psychological Science*. **2**:190–193.
- Wilson ML, Britton NF, Franks NR. 2002. Chimpanzees and the mathematics of battle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. **269**:1107–1112.
- Wilson ML, Hauser MD, Wrangham RW. 2001. Does participation in intergroup conflict depend on numerical assessment, range location, or rank for wild chimpanzees?. *Animal Behaviour*. **61**:1203-1216.
- Wunderle JM, Mercado JE, Parresol B, Terranova E. 2004. Spatial Ecology of Puerto Rican Boas (*Epicrates inornatus*) in a Hurricane Impacted Forest. *Biotropica*. **36**:555–571.