

**Universets udvidelse -
et metaprojekt**

**Af Jesper Duelund &
Birthe Friis**

**Vejledt af
Ib Lundgaard Rasmussen**

TEKSTER fra

IMFUFA

ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER
INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES
FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Postboks 260, 4000 Roskilde

Universets udvidelse - et metaprojekt

af: Jesper Duelund og Birthe Friis
Vejleder: Ib Lundgaard Rasmussen

IMFUFA tekst nr. 294/95 80 sider

ISSN 0106-6242

Abstract: Der gives en gennemgang af det historiske forløb omkring opdagelsen af universets udvidelse med henblik på at belyse, hvordan nye erkendelser opstår i fysikken. Denne uddybes i to kapitler om de observationer, der blev gjort og de teorier om universet, der blev fremsat undervejs til erkendelsen af universets udvidelse. Herefter gives en kort introduktion til de videnskabsteorier, der bruges i analysen af forløbet. I analysen forsøges det afdækket, hvilken indflydelse observationerne og teoridannelsen havde på hinanden samtidig med, at det faktiske forløb sammenstilles med det ideelle forløb set fra videnskabsteoriene.

Der ses et klart samspil mellem teorier og observationer i erkendelsesforløbet, hvilket videnskabsteoriene ikke tager højde for og det er derfor klart, at videnskabsteorier alene ikke giver noget dækkende billede af, hvordan nye erkendelser opstår.

Forord

Dette projekt er et 1. moduls fysikprojekt, et såkaldt meta-projekt. Projektet skal derfor omhandle erkendelsesmæssige aspekter af faget fysik, eller som der står i vejledningen til studieordningen: handle 'om' fysik.

Ved at vælge universet som emneområde, har vi kastet os over noget af det, der er så svært at forstå, i og med universet er så ufatteligt kolosalt. Men samtidig er det også noget, der fanger mange menneskers opmærksomhed og vi håber derfor, at mange vil fatte interesse for vores projekt og finde læsningen interessant.

Herfra skal lyde en stor tak til Ib for god og inspirerende vejledning og til Andrea, Christina og Einar for stor tålmodighed og forståelse.

IMFUFA, RUC

januar 1995

Jesper Duelund & Birthe Friis

Indhold

Forord	i
Indledning	vii
1 Tidslinie 1899–1931	1
2 Observationer fra perioden 1900-1930	9
2.1 Observationer	9
2.1.1 Kapteyns univers	10
2.1.2 Dværg og kæmpestjerner	11
2.1.3 Leavitts opdagelse	11
2.1.4 Fath	12
2.1.5 Russell diagrammet	12
2.1.6 Sliphers opdagelser	13
2.1.7 Curtis og Ritchy, ϕ -univers teorien	14
2.1.8 Shapleys univers	15
2.1.9 Paddock	15
2.1.10 Den store debat	16
2.1.11 Öpiks afstandsmålingsmetode	17
2.1.12 Hubble	17

3	Relativistiske kosmologier	19
3.1	Historisk introduktion	19
3.1.1	Feltligninger og linieelementer	20
3.2	Einsteins statiske og endelige univers	21
3.2.1	Antagelser	21
3.2.2	Newtonsk teori	21
3.2.3	Det rumlige endelige univers	22
3.2.4	Beregninger	23
3.3	De Sitters masseløse univers	24
3.3.1	Antagelser	25
3.3.2	Matematik	25
3.3.3	Konsekvenser af det masseløse univers	26
3.3.4	Resultater og observationer	27
3.4	Friedmann og universets fødsel	28
3.4.1	Antagelser	28
3.4.2	Universelle betragtninger	29
3.4.3	Afrunding	32
3.5	Lemaître og det ekspanderende univers	32
3.5.1	Argumentation mod det statiske univers	32
3.5.2	Grundantagelser	33
3.5.3	De statiske løsninger	34
3.5.4	Det ekspanderende univers	35
3.5.5	Konsekvenser af det ekspanderende univers	36
4	Videnskabsteorier	37
4.1	Logisk empirisme	37
4.1.1	Poppers falsifikationsteori	38

5	Analyse af erkendelsesforløbet	41
5.1	Observationerne	41
5.1.1	Opfattelsen af universet	42
5.1.2	Hastighedsmåling	46
5.1.3	Virkeligheden <> logisk empirisme	47
5.2	Teorierne	48
5.2.1	Einsteins tilknytning til Machs princip	48
5.2.2	De Sitter bryder med relativitetsånden og Machs princip	50
5.2.3	Friedmanns matematik	52
5.2.4	Lemaîtres fysik	53
5.2.5	Eddington som udtryk for tidsånden	55
5.2.6	Virkelighed <> Popper	56
5.3	Forsøg på at finde en relation mellem observation og teori	56
5.3.1	Paddock	57
5.3.2	Wirtz	57
5.3.3	Öpik	58
5.3.4	Silberstein	58
5.3.5	Afrunding på forsøg på at finde	59
6	Konklusion	61
6.1	Perspektivering	63
	Litteraturliste	65

Indledning

I 1917 fremsatte Albert Einstein en teori for universets struktur, den var baseret på den generelle relativitetsteori han havde fremsat i 1915. Teorien medfører, at universet må udvide sig, men det troede Einstein ikke på, og han indførte derfor en konstant, der skulle modvirke denne udvidelse. I løbet af de følgende år blev der fremsat andre relativistiske kosmologier, hvoraf nogle konkluderede, at universet udvidede sig. Men det var først, da man i 1929 observerede, at jo længere væk en galakse befandt sig, jo hurtigere bevægede den sig væk fra vores Mælkevej, at det blev almindeligt anerkendt, at universet udvider sig. Også først på dette tidspunkt bekender Einstein sig til tanken om det ekspanderende univers.

Det er dette erkendelsesforløb, der har vakt vores interesse. Hvorfor bliver Einstein ved med at benægte, at universet kan udvide sig, når matematikken siger, at det gør det? Var der nogle observationer, der kunne understøtte, at universet udvider sig?

For ikke at fortabe os i ren historieskrivning har vi valgt at lægge et bredere perspektiv på projektet. Vi vil således forsøge at belyse, hvordan nye erkendelser opstår, vel at mærke nye erkendelser, der vender op og ned på de forestillinger, man hidtil har gjort sig om verden (og universet), men dog med udgangspunkt i en analyse af perioden omkring erkendelsen af universets udvidelse.

Formål

Formålet med projektet er at belyse, hvordan erkendelse af nye begreber opstår i fysikken.

For at uddrage nogle almengyldige retningslinier om, hvordan man opnår nye erkendelser, vil vi stille vores videnskabshistoriske gennemgang op imod nogle videnskabsteorier. Hermed får vi også en sammen-

stilling af en deskriptiv og en normativ måde at fremstille den videnskabelige metode på.

Problemformulering

I forbindelse med den problemstilling vi har valgt at beskæftige os med, er det naturligt både at kigge på de teorier, der er fremsat, og de observationer, der er gjort. Derfor vil vi søge svar på følgende:

“Er det teori eller empiri, der er styrende for, at man kan opnå nye erkendelser? Eller er det et samspil mellem både teori og empiri?”

Disse spørgsmål vil vi søge svar på i perioden omkring erkendelsen af universets udvidelse. Ideen med at stille videnskabshistorien op imod videnskabsteorier er at opnå en diskussion af, hvordan man bedst beskriver erkendelsen af nye begreber.

Metode

For at sluse os ind på emnet har vi ud fra oversigtsbøger/artikler fundet frem til, hvilke teorier og observationer der blev fremsat henholdsvis gjort i vores periode. Vi har valgt at starte med observationer gjort allerede omkring århundredeskiftet, da disse er en del af det grundlag for viden om universet og dets struktur, som astronomer og teoretikere var i besiddelse af i det videre forløb. Vores optegnelser slutter omkring 1930, da det på dette tidspunkt blev almindeligt anerkendt, at universet udvider sig. Alle disse teorier og observationer har vi opført i en tidslinie, da det har hjulpet os til et overblik over perioden.

Herefter har vi så vidt muligt udfra original litteratur i 2 kapitler refereret, de observationer og teorier som vi har vurderet, har haft størst betydning for erkendelsesforløbet. I kapitel 4 gives en kort introduktion til de 2 videnskabsteorier vi har valgt at arbejde med — den logiske empirisme og Poppers falsifikationsteori. Med den viden vi nu har om observationer, teorier og videnskabsteorier, vil vi foretage en analyse, hvor vi i gennemgangen af observationerne vil inddrage den logiske empirisme, for at vurdere om det faktiske forløb er i overensstemmelse med det af videnskabsteorien forudsagte. Ligeledes vil vi i gennemgangen af teorierne inddrage Poppers falsifikationsteori. Analysen munder ud i en konklusion om, hvordan erkendelsen af universets udvidelse er opnået, og om videnskabsteorierne har givet en tilfredsstillende forklaring på den opnåede erkendelse.

Kapitel 1

Tidslinie 1899–1931

I vores forsøg på at finde ud af hvilke teorier og observationer, der er væsentlige i forløbet omkring opdagelsen af universets udvidelse, har vi opstillet en tidslinie, så man kan finde ud af, hvilken rækkefølge tingene er foregået i.

I det følgende refererer **obs** til observationer, **teo** til teorier om universets struktur og **o/t** til forsøg på at sammenkoble observationer og teorier.

1899

obs I 1899 observerer Julius Scheiner spiraltåger med spektroskopi og opdager, at spektret af disse har spektrallinier som stjernerne. [104].

1900

obs James E. Keeler fotograferer med Crossley reflektoren svage stjerner og tåger. Han finder ca. 120.000 spiraltåger. Han antager at spiraltåger er roterende masser af gas [103].

1901

obs J.C.Kapteyn bestemmer Mælkevejens struktur vha. stjernetælling. Han benytter statistik og stjernernes bevægelser til at beregne den kvantitative afstand til stjernerne. Faconen bliver en flad skive ca. 10 *kpc* i diameter og 2 *kpc* i højden. [8].

1904

obs Charles D. Perine sætter det totale antal af spiraltåger til 500.000 [104].

1905

obs Ejnar Hertzsprung opdager ved spektralanalyse kæmpestjerner [5].

1908

obs Henrietta Swan Leavitt opdager, at jo længere periode en vis klasse af variable stjerner har, jo større luminositet har den [7].

1909

obs Edward A. Fath foretager spektroskopi af Andromedatågen. Han konkluderer af sine resultater, at Andromedatågens centrum er en stjernebob, sammensat af utallige svage stjerner, der ligger så tæt sammen, at de ser ud som om, de er en tåge [105].

1911

obs Hertzsprung publicerer et diagram, stjerners intensitet mod stjerners farve. Diagrammet er over to stjernebob og viser, at der findes to forskellige typer stjerner [7].

1913

obs Russel publicerer et diagram, stjerners absolutte intensitet mod stjerners spektra [7].

obs Vesto M. Slipher opdager Doppler effekt i spektraet af Andromedatågen. Effektens størrelse viser, at tågen er på vej mod solen med en hastighed på 300 km/s [108].

1914

- obs** Heber D. Curtis undersøger spiraltåger. Han mener, at tågerne kan være fjerne galakser af samme slags som Mælkevejen [13].
- obs** Slipher publicerer resultater, der viser Doppler effekt i 14 spiraltåger. Disse er næsten alle på vej væk fra solen med store hastigheder [27].
- obs** Slipher opdager spiraltågers rotation [19].

1915

- obs** Harlow Shapley opdager, at kugleformede stjernehobe er spredt på begge sider af Mælkevejens ækvator, og at de fleste er placeret på den ene side af Mælkevejens lodrette akse. Han målte afstanden til Cepheider i en nærliggende stjerne hob til 10 *kpc* [10].
- obs** Shapley udregner en kugleformet stjernebob til at ligge 30 *kpc* væk [12].
- teo** Einstein fremsætter den generelle relativitetsteori.

1916

- obs** Van Maanen opdagede rotation i spiraltåger, og derudfra konkluderede han, at spiraltågerne lå indenfor Mælkevejens grænser [110].
- o/t** Paddock opdager ved at undersøge andres observationer af spiraltåger, at tågerne fjerner sig fra Solen og hinanden, universet udvider sig [111].

1917

- obs** Ud fra analyse af afstande til kugleformede stjernehobe anslår Shapley, at galaksen er 10 gange større end troet [13].
- obs** George W. Ritchy fotograferer en nova i en spiraltåge. I løbet af kort tid finder andre astronomer ligeledes novaer i spiraltåger [14].

- teo** Einstein laver på baggrund af den generelle relativitetsteoris feltlininger en teori, der beskriver universet. Han benytter Riemann geometri til at beskrive universets struktur og opnår dermed, at universet er endeligt. Han indfører den kosmologiske konstant λ for at opretholde forestillingen om, at universet er statisk [24].
- teo** De Sitter viser, at en anden løsning til Einsteins feltligninger er mulig. Den benytter en hyperbolsk geometri, der medfører at universet er uendeligt. Her er betingelsen for, at universet er statisk, at det ingen masse indeholder. Teorien indbefatter også, at atomvibrationer "sløves" over store afstande, dermed forudsiges rødforskydning [26].

Herefter ingen relativistiske kosmologi artikler i 4 år [58].

1918

- obs** Kapteyn er sikker på, at absorption ikke har den store indflydelse på lyset, derfor fastslår han, at hans model af mælkevejen i det mindste er en grov approximation af galaksens struktur (Kapteyn's univers) [9].
- teo** Einstein kritiserer de Sitters løsning [61].
- teo** Eddington bakker de Sitter op i et brev [62].
- o/t** Wirtz finder ud af, at alle spiraltåger bevæger sig med radial hastighed væk fra solen, indfører en term i sine ligninger for at redegøre for effekten [28].
- obs** Shapley anslår, at Solen ligger i udkanten af den model, han har opstillet af Mælkevejen [13].

1920

- obs** Den store debat ved The National Academy of Sciences årlige møde: Curtis og Shapley udfordrer hinandens syn på universet [15].

1922

- teo** Friedmann udregner løsninger til Einsteins feltligninger, der indbefatter, at universet udvider sig og har en positiv krumning. Artiklen bliver stort set ignoreret, idet den er meget matematisk og helt udelader sammenkoblingen med rødforskydning, hvilket gør den svær at sammenholde med observationer [58]. Udelader brug af den kosmologiske konstant λ [32].
- teo** Einstein mener der er en fejl i Friedmanns artikel [58].
- teo** Lanczos finder en løsning til de Sitter modellen med $k = +1$, dvs. et ekspanderende univers, men undlader tilsyneladende at drage konklusionen [58].
- teo** De Sitter bygger videre på egen teori [61].
- o/t** Wirtz foreslår, at den før indførte term dækker over en systematisk bevægelse (af spiraltåger) væk fra Solen [28].

1923

- obs** E. P. Hubble opdager cepheider i en nærliggende spiraltåge. Han udregner afstanden vha Shapley's kalibrering af periode-luminositets relationen til at være 285 *kpc*. Han offentliggjorde sine resultater jan. 1925 [21].
- obs** Hubble klassificerer spiraltåger i et brev til Slipher [23].
- teo** Einstein trækker sin kritik af Friedmann tilbage, men mener tilsyneladende stadig teorien er uden fysisk betydning (dette er dog udeladt i artiklen) [58].
- teo** Lanczos inddrager betragtninger om rødforskydning i sin løsning til de Sitters model [61].
- teo** Weyl finder en ekspanderende version af de Sitter modellen, men undlader ligesom Lanczos at drage konklusionen [60].

1924

- teo** Friedmann udbygger sin teori til også at indbefatte negativ krumning af universet ($k = -1$), men bliver stadig ignoreret [60].
- teo** Eddington bakker nu op om Einstein [61]. Skriver dog "It is sometimes urged against de Sitter's world that it becomes non-statical as soon as any matter is inserted in it. But this property is perhaps rather in favour of de Sitter's theory than against it" [84] og anerkender dermed teoriens evne til at redegøre for rødforskydning. Opsummerer Sliphers rødforskydningsdata og muliggør dermed konklusionen, at universet udvider sig [58].
- teo** Einstein kritiserer Friedmann igen [61].
- o/t** Wirtz (inspireret af de Sitter) undersøger om spiraltågenes radiale hastighed er en funktion af afstanden til dem, men finder ingen sammenhæng, da afstandsmålingerne er for dårlige (ikke eksisterende) [29].
- o/t** Stromberg forsøger at lave afstands/hastigheds relation, men finder ingen sammenhæng [29].
- o/t** Lundmark som Stromberg, men han finder dog en svag sammenhæng. I begge tilfælde er problemet manglende pålidelige afstandsmålinger [29].
- o/t** Silberstein prøver at påvise den af de Sitter forudsagte rødforskydning, ved at betragte kugleformede stjernehober, for hvilke der eksisterer afstandsmålinger, men som dog ikke har samme systematiske rødforskydning som spiraltåger. De Sitter modellen forudsiger kun positive hastigheder som følge af Doppler effekten hidrørende fra rummets krumning. Da Silberstein finder ud af, at Andromedatågen har negativ hastighed, mener han at have modbevist de Sitters teori. Men andre astronomer finder ud af, at der er fejl i Silbersteins udregninger [30].

1925

- obs** Hubble publicerer opdagelsen af cepheider i Andromedatågen og en anden spiraltåge og afstandene til disse [72].

teo Lemaître går ud fra de Sitters teori, men konkluderer at universet udvider sig med tiden, og mener det kan forklare rødforskydning. Derudover medfører hans teori at rummet er uden krumning ($k = 0$) og geometrien således er euklidisk, dette er han dog stærkt utilfreds med [86].

1926

obs Hubble publicerer klassifikation af spiraltåger og forsøger at påvise Einsteins model herudfra [65].

1927

teo Lemaître skriver den banebrydende artikel, der som den første kobler de ikke-statiske løsninger af Einsteins feltligninger med astronomiske observationer, specielt rødforskydning som følge af universets udvidelse, ikke indbyrdes hastighed. Selvom teorien ikke adskiller sig væsentligt fra Friedmanns, er den enestående idet den kobler de matematiske ligninger og de fysiske målinger [87].

teo Robertson finder den geometriske basis for teorien om universets udvidelse, men tilsyneladende kun som matematisk øvelse [58].

1928

teo Robertson ekspanderende de Sitter univers uden krumning ($k = 0$) [62].

teo Freedericsz & Schechter artikel der tilsyneladende kobler Einstein, de Sitter og Friedmanns teorier [62].

teo Ligesom Robertson og Lemaitre indfører Tolman en arbitrær skaleringsfaktor $S(t)$, men når ikke frem til konklusionen om universets udvidelse [58].

1929

- obs** Hubble populær artikel, hvori han forudser at hans resultater vil falde ud til de Sitters modellens fordel [63].
- obs** Hubble den afgørende artikel, der fastslår afstands/hastigheds relationen ud fra en række observationer. Hubble mener observationerne understøtter de Sitters model, uden dog at konkludere noget [63].
- teo** Robertson udleder "alle" de betydende parametre for teorien om universets udvidelse, uden dog at forstå betydningen af den udvidende faktor [58].
- teo** Tolman formålet er at finde alle de FLRW-universer (Friedmann-Lemâitre-Roberstson-Walker), der er statiske og ender med at blive enten Einsteins eller de Sitters model, samme formål har Robertson ovenfor [58].
- teo** Tolman sammenligner observerede rødforskydninger med de Sitters model og konkluderer at modellen ikke forklarer rødforskydningen tilstrækkeligt [64].
- teo** Zwicky prøver at forklare rødforskydning i et statisk univers [62].

1930

- teo** Eddington foreslår man skal lede efter ikke-statiske løsninger, da der var masse som i Einsteins model og hastigheder som i de Sitters, og løsningen måtte derfor indeholde dele fra begge teorier [64].
- teo** Eddington beviser, at Einstein statiske univers er ustabil [64].

1931

- teo** De Sitter: "a solution of such simplicity to make it appear self-evident ... there cannot be the slightest doubt that Lemâitre's theory is essentially true" [64].

Kapitel 2

Observationer fra perioden 1900-1930

I starten af 1900-tallet var Mælkevejen lig universet. Alt der kunne ses på himlen lå indenfor Mælkevejens grænser. Universet blev betragtet som værende statisk. I 1930 er Mælkevejen en del af et udvidende univers. Universet indeholdt flere galakser end Mælkevejen.

De observationer vi beskriver i dette kapitel er taget fra tidslinien (jvf. kapitel 1), der går fra 1899 til 1931. De observationer er valgt, da de beskæftiger sig med et eller flere af følgende punkter:

- Afstandsmåling.
- Universets sammensætning (Mælkevejen eller mere) og størrelse.
- Spiraltågers bevægelse.

For at komme til erkendelse af universets udvidelse måtte der ske en holdningsændring af opfattelsen af universet. Resultater af observationer, der beskæftigede sig med de tre ovennævnte punkter kunne have eller havde betydning for, at der skete en holdningsændring.

2.1 Observationer

I slutningen af det 19'ende århundrede påbegyndtes en klassificering af stjerner ud fra deres spektre. Lederen af Harvard College Observatoriet i Peru Edward C. Pickering havde fundet en metode, hvor der med objektiv spektroskopi kunne tages spektrogrammer af hundredvis

af stjerner på en gang. Stjernerne blev inddelt i grupper (*A, B, C* osv.) efter intensiteten af deres hydrogenlinier. Stjerner i gruppe *A* havde den kraftigste hydrogenlinie. Resultatet af dette arbejde blev samlet i 'Draper Kataloget' opkaldt efter Henry Draper, hvis fond sponsorerede spektroskopi studier. Annie J. Cannon, en af Harvard forskerne satte spørgsmålstegn ved denne metode til at inddele stjernerne. Sammen med Pickering foretog hun en ny spektralanalyse, hvorved rækkefølgen af grupperne blev *O, B, A, F, G, K, M* og *N*. Denne inddeling af stjernerne blev benyttet i 'Draper Kataloget'. Antonia C. Maury, en anden forsker på Harvard opdagede under sit arbejde med 'Draper Kataloget', at spektrallinierne varierede i brede. Stjerner med meget bredde linier blev kaldt *a* og dem med meget smalle *c*, resten blev kaldt *b*. Disse undergrupper af stjernerne blev ikke inkluderet i 'Draper Kataloget' men blev senere brugt til at bestemme størrelsen af Mælkevejen [4].

2.1.1 Kapteyns univers

En metode til at bestemme afstande var stjernehobes egenbevægelse. Relationen mellem egenbevægelse og afstand er: stor afstand, lille egenbevægelse. Teknikken til at bestemme stjernehobes egenbevægelse blev udviklet i begyndelsen af 1900-tallet og blev brugt af bl. a. Jacobus C. Kapteyn, en hollandsk fysiker. I 1901 benyttede han sig af statistik og stjernehobes egenbevægelse til at bestemme Mælkevejens struktur. 'Kapteyns univers' som modellen blev kaldt var fladt, ca. 10 kpc i diameter og ca. 2 kpc i højden. Solen var placeret omkring 2 kpc til højre for centrum af Mælkevejen til forskel fra tidligere modeller, hvor solen var i centrum af universet. Kapteyns forslag til struktur og størrelse på universet blev hurtigt den gængse opfattelse af universet. Han var dog klar over at der ikke var taget hensyn til eventuel absorption af lys. Da hans model bygger på den betragtning, at jo stærkere lysstyrke en stjerne havde, jo tættere lå den på Solen, ville en eventuel absorption af lys indvirke på den struktur, han var nået frem til. Kapteyn satte sig for at finde et mål for denne eventuelle absorption. Efter 17 år med mange forskellige undersøgelsesmetoder, der viste, at der ingen absorption var eller, at der kun var en lille ubetydelig absorption, var Kapteyn i 1918 sikker på, at hans model mindst var en approksimation af galaksens struktur [9].

2.1.2 Dværg og kæmpestjerner

I 1905 opdagede den danske astronom Ejnar Hertzsprung, at for en given spektralgruppe havde stjerner i undergruppe *c* en højere luminositet end stjerner i undergrupperne *a* og *b*. Da alle stjerner for en given spektralgruppe havde samme overfladetemperatur konkluderede Hertzsprung, at stjerner af type *c* måtte være større, have en lavere densitet, end dem af type *a* og *b*. Han havde opdaget kæmpestjerner og dværg [71] [5].

2.1.3 Leavitts opdagelse

I perioden 1893-1906 foretog astronomer på Harvard observatoriet en systematisk fotografering af de to Magellanske skyer. Henrietta Swan Leavitt, en forsker i Cambridge, USA studerede i 1908 fotografierne, taget af de to Magellanske skyer. Hun opdagede over tusinde variable stjerner i de to skyer. Stjerner, der varierede periodisk i deres lysstyrke. I løbet af 1908 havde hun udregnet perioden for enkelte af de variable stjerner i den lille Magellanske sky. Hun fandt, at jo lysstærkere en stjerne er, des længere en periode har den. I 1912 publicerede Leavitt en artikel [93], hvori hun viste, at der var en relation mellem periode og luminositet. Hun havde på det tidspunkt udregnet perioden for i alt 25 variable stjerner, og ud fra disse viste hun, at der var en lineær relation mellem logaritmen af perioderne og den tilsyneladende lysstyrke [92]. Leavitts interesse lå i variationen af perioderne. Hvis de variable stjerner lå lige langt væk fra jorden, hvad hun antog, måtte perioderne være knyttet til emissionen af lys fra disse. Emission afhænger af masse, densitet og overfladelysstyrke og derfor kunne hendes opdagelse bruges som indikator for den absolutte luminositet af de variable stjerner. Hun fik dog ikke lov til at gå videre med sine undersøgelser, da hendes chef på Harvard Observatoriet Edward C. Pickering mente, at det var deres opgave at indsamle data ikke at fortolke dem [7].

Året efter at Leavitt havde publiceret sine resultater opdagede Ejnar Hertzsprung, at de variable stjerner Leavitt studerede havde samme lyskurve som cepheider. Cepheider er pulserende stjerner med periodiske ændringer i deres lysstyrke. Kalibreret kunne Leavitts periode-luminositets relation bruges til at bestemme afstand. Udregnede man en cepheides periode, kunne man ud fra periode-luminositets relationen finde den gennemsnitlige luminositet. Ved at kende luminositeten kunne den afstand, hvormed cepheiden må ligge fra jorden for at have

den observerede lysstyrke udregnes. Den præcise afstand til enhver cepheide kunne bestemmes ud fra relationen. Og derved afstanden til ethvert objekt, der lå tæt ved en cepheide. Hertzsprung blev den første, der kalibrerede Leavitts periode-luminositets relation. Han brugte relationen til at udregne afstanden til de Magellanske skyer, desværre var hans resultat præget af regnefejl [93]. En anden, der benyttede relationen mellem perioden og luminositeten til afstandsmåling var Harlow Shapley i 1918 (jvf. afsnit 2.1.8). Han gjorde dog nogle fejlagtige antagelser, bl. a. at alle cepheider var ens. Vi ved i dag, at de cepheider Shapley observerede var af anden slags, end dem Leavitt observerede. Derved var hans brug af periode-luminositets relation, som Leavitt havde opdaget, ikke korrekt. Edwin P. Hubble byggede senere sine resultater af afstanden til Andromedatågen på Shapleys kalibrering af periode-luminositets relationen (jvf. afsnit 2.1.12), derved blev Shapleys fejl viderebragt.

2.1.4 Fath

Spiraltåger var blevet observeret i slutningen af 1800-tallet og den astronomiske verden var overbevist om, at de var skyer af gas og støv [104]. I 1906 begyndte Edward A. Fath at studere spiraltåger med spektroskopi. Han designede og lavede selv spektroskopet til dette arbejde, og i 1908 havde han sit første gode spektrum af Andromedatågen. I løbet af 1909 havde han spektre på 6 andre spiraltåger. Ikke alle spektroskopierne var lige gode men de, der var gode viste, at spiraltåger havde spektrallinier, der kun var set for Solen og andre kolde stjerner. Fath konkluderede, at Spiraltågerne også indeholdt stjerner. Disse stjerner var for svage til at blive observeret enkeltvis, men i spiraltågerne var de utallige og lå tæt så de virkede som en tåge. Fath offentliggjorde resultaterne i sin ph. d.-afhandling, som han sluttede med, at hans 'hypotese' måtte be- eller afkræftes ved en bestemmelse af spiraltågers parallakse. På trods af manglende afstandsbestemmelser fortsatte Fath sine studier med spektroskopi, han gentog dog ikke senere, at spiraltåger måtte indeholde stjerner [106].

2.1.5 Russell diagrammet

Den amerikanske astronom Henry Norris Russell benyttede fotografiske optagelser til at bestemme parallakser, og ud fra disse parallakser

var han i stand til at udregne stjerners afstand og dermed den absolute luminositet. Han udarbejdede et diagram, hvor han plottede denne luminositet mod spektraltipe. Diagrammet viste tydeligt, at der var to stjerneklasser, Russell kaldte dem hhv. dværge og kæmpestjerner, da han henviste til, at det var Hertzsprung, der først opdagede disse to klasser. I 1913 publicerede Russell diagrammet, der blev kaldt 'Russell-diagrammet'. Man opdagede senere, at Hertzsprung allerede i 1911 havde lavet et lignende diagram, han publicerede det ifølge [6] "in an obscure photography journal", hvorfor amerikanske astronomer ikke var opmærksom på hans opdagelse. I følge [118] publicerede Hertzsprung diagrammet i Publikationen des astrophysikalischen Observatoriums zum Postdam 22, hvilket absolut ikke er ukendt. Hertzsprungs havde plottet stjernernes absolute luminositet mod deres farve istedet for mod spektraltyper som Russell. Russells diagram blev efter opdagelsen af Hertzsprungs diagram kaldt 'Hertzsprung-Russell diagrammet' [7]. Med dette diagram havde astronomerne en mulighed for at bestemme afstande til stjernerne, hvis de havde spektrallinierne for en given stjerne.

2.1.6 Sliphers opdagelser

Lederen af observatoriet i Flagstaff, Arizona Percival Lowell var interesseret i at undersøge Chamberlain-Moulton hypotesen om, at spiraltåger var forstadier til solsystemer. I 1909 gav han den amerikanske astronom Vesto M. Slipher til opgave at undersøge spiraltåger med spektrograf for at finde beviser på rotation [17].

Da tågerne var så svage var de svære at få et godt spektrum af. I 1912 havde Slipher spektret af Andromedatågen. Spektret var blåforskudt som følge af Doppler effekten. Doppler effekten viste, at tågen var på vej mod Solen med en hastighed på $305 \pm 10 \text{ km/s}$. Den højste hastighed målt i astronomien på det tidspunkt. Da han publicerede resultaterne i 1914, havde han fundet Doppler effekt i ialt 15 spiraltåger. Resultatet viste, at 11 af disse var på vej væk fra Solen [16]. I 1917 publicerede Slipher en artikel [127], hvor han gjorde rede for hastigheden af 25 spiraltåger. 21 af disse tåger viste hastigheder på vej væk fra Solen. Desuden viste hans resultater, at flertallet af disse tåger var samlet i en bestemt region af himlen. I den modsatte region var der spiraltåger på vej mod Solen, dog ikke så mange, men Slipher var dog sikker på, at der fandtes mange flere uopdagede spiraltåger på vej imod Solen i den region.

Det, der var Sliphers oprindelig mål med at observere spiraltåger med spektroskopi, var at finde ud af, om spiraltåger roterer. Dette havde været et af de essentielle spørgsmål, siden spiraltågerne blev observeret første gang. Hvis spiraltågerne roterede, var der en mulighed for at finde egenbevægelse og dermed bestemme afstanden. I 1914 konkluderede Slipher ud fra resultaterne af sine observationer med spektroskopi, at spiraltågerne roterer.

2.1.7 Curtis og Ritchy, ϕ -univers teorien

Parallelt til spektroskopi observationer af spiraltåger tog astronomen Heber D. Curtis fotografier af disse tåger. Han var tilknyttet Mount Hamilton observatoriet, hvor han ved brug af Crossley reflektoren prøvede at forstå spiraltågers natur. Han var overbevist om at de tilhørte samme familie, og at de var sammensat af stjerner, der var for svage til at kunne ses enkeltvis med Crossley reflektoren. De første beviser på, at han havde ret, kom i 1917, hvor George W. Ritchy en astronom ved Mount Wilson observatoriet ved et tilfælde opdagede en nova i en spiral tåge. Han benyttede en større kikkert end Curtis. Han arbejdede med langtids eksponering for at undersøge sine instrumenters muligheder, da han opdagede novaen. Han undersøgte alle sine fotografier og fandt, at opdagelsen af novaen ikke var enestående, da der var andre novaer i bl. a. Andromedatågen. Ritchys fund startede en undersøgelse efter novaer på fotografier fra andre observatorier. Curtis fandt novaer i flere af de spiraltåger, han havde taget fotografier af. Curtis indså, at fundet af novaerne i spiraltåger kunne bevise, at spiraltåger var fjerne galakser lig Mælkevejen, såkaldte ϕ -universer. Han sammenlignede lysstyrken af 27 novaer fra Mælkevejen med lysstyrken af novaerne fundet i spiraltågerne. Resultatet af denne sammenligning viste, at novaerne i spiraltågerne måtte ligge mindst 100 gange længere væk end dem i Mælkevejen, hvis de vel at mærke var samme type stjerner [39]. Det vil sige at spiraltågerne, der rummede en nova måtte ligge i en afstand, der er mindst 100 gange afstanden til en nova i Mælkevejen. Curtis var overbevist om, at Mælkevejen havde den størrelse som Kapteyn havde udregnet (jvf. afsnit 2.1.1) derfor måtte spiraltågerne ligge udenfor Mælkevejen; ϕ -universer.

2.1.8 Shapleys univers

Året efter Leavitts opdagelse (jvf. afsnit 2.1.3) begyndte Harlow Shapley sine studier af variable stjerner. Han var en amerikansk astronom tilknyttet Mount Wilson observatoriet. De variable stjerner, han studerede, fandtes især i kugleformede stjernehobe. Da de variable stjerner han studerede, havde lyskurver, der lignede cepheiders antog han, at de var cepheider af samme slags, som dem Leavitt havde undersøgt [81]. I 1915 bemærkede han, at de kugleformede stjernehobe ikke lå tilfældigt spredt, men lå placeret i den ene side af Mælkevejen. Han havde undersøgt ialt 93 kugleformede stjernehobe, og de fleste var placeret på denne måde. Ud fra en kalibrering af cepheidernes periode-luminositets relation var det ham muligt at bestemme afstanden til de kugleformede stjernehobe. En af de nærmeste stjernehobe lå 10 *kpc* væk. Altså udenfor Mælkevejen i følge gængse teorier om galaksens struktur. I 1916 udregnede han afstanden til en kuglehob til at være 30 *kpc*. Shapley havde ikke observeret cepheider i denne afstand, det var umuligt med datidens teleskoper, istedet havde han sammenlignet fjerne kugleformede stjernehobes diametre og lysstyrke med dem, hvis afstand han havde bestemt vha. cepheider. Han var overbevist om, at de kugleformede stjernehobe var tilknyttet Mælkevejen, derfor måtte denne være betydelig større end først antaget. I 1917 havde han beregnet afstande til 93 kugleformede stjernehobe. Han lavede et 3-dimensionalt diagram over resultaterne, der viste at stjernehobene dannede en kugleformet sfære [81]. Ifølge Shapley var galaksen derfor 10 gange større end den gængse opfattelse, Kapteyns univers [11]. Et problem var deres asymmetriske placering, men det forklarede Shapley med, at Solen var placeret i udkanten af et enormt system, afgrænset af den sfære de kugleformede stjernehobe dannede.

Denne teori mødte stor modstand især fra tilhængere af Kapteyns univers. En anden argumentation imod Shapley var, at hvis de kugleformede stjernehobe skulle være på størrelse med Mælkevejen, måtte de ligge længere væk end 30 *kpc*. Da der ikke var fundet beviser på, at de lå i så stor afstand, konkluderede modstanderne, at Shapleys model af universet ikke var korrekt.

2.1.9 Paddock

Den amerikanske astronom George F. Paddock var tilknyttet Lick observatoriet, da han i 1916 publicerede en artikel om spiraltåger, hvori

han analyserede bevægelsen af stjerner; enhver stjernes bevægelse var summen af dens egen hastighed plus udvidelsen af hele systemet omkring Solen [109]. Han brugte ikke egne observationer men bl. a. de resultater Slipher var kommet frem til om spiraltåger. Paddock opdagede, at spiraltågerne ikke bare måtte bevæge sig væk i forhold til Mælkevejen, men også i forhold til hinanden. Han fandt en gennemsnitlig udvidelse på $+340 \text{ km/s}$. Han var dog sikker på, at hans resultater skyldtes fejl, og at denne udvidelse ville forsvinde ved flere observationer af hastigheder [111].

2.1.10 Den store debat

I 1919 var den stærkeste modstander af \emptyset -univers teorien Shapley, der med sine udregninger af kugleformede stjernehobes afstande, ikke kunne forestille sig, at spiraltågerne skulle ligge udenfor Mælkevejen, der ifølge ham var meget større end Kapteyns univers. Shapley underbyggede desuden sin påstand med Adriaan van Maanens resultater af spektroskopi af spiraltåger. Adriaan van Maanen var en Hollandsk astronom, der var flyttet til Amerika, hvor han arbejdede på Mount Wilson fra 1912. Han undersøgte spiraltåger for at finde tågernes egenbevægelse. Dette havde både Slipher og Curtis prøvet uden held, da de mente, at den tilsyneladende egenbevægelse var for lille til, at det kunne lade sig gøre uden for mange fejl [110]. I 1916 havde van Maanen fundet egenbevægelsen for en spiraltåge. Han fandt efterhånden egenbevægelse for mange andre spiraltåger udfra gamle og nye fotografier taget af ham selv og andre astronomer. Van Maanens konklusion på hans undersøgelse af spiraltåger var, at med den egenbevægelse han fandt, så var det umuligt, at tågerne kunne ligge mere end 30 kpc væk, og at tågernes maksimale diameter var ca. $0,1 \text{ kpc}$, altså meget mindre end Mælkevejen. Han var af den overbevisning, at spiraltågerne var roterende gasskyer [110].

Ved det årlige møde ved The National Academy of Sciences, der blev afholdt på Smithsonian Institut i Washington D. C i april 1920 var foredragsholderne Shapley og Curtis. I stedet for en foredrag foreslog Curtis at de skulle udfordre hinandens syn på universet. Der var ingen vinder i denne debat. Begge debattører mente, at deres syn på universet var det rigtige. Astronomer og andre, der overværede debatten blev delt i to lejre: Dem, der anså Kapteyns univers og dermed Curtis syn som værende gældende og dem, der var overbevist om rigtigheden i

Shapleys og van Maanens observationer. Størrelsen, faconen og indholdet af Mælkevejen/universet var lige så uafklaret som det havde været i årevis. I årene efter den store debat prøvede astronomer at finde svar på spørgsmålet om universets størrelse og indhold.

2.1.11 Öpiks afstandsmålingsmetode

I 1922 publicerede den østeropærisk astronom Ernst Öpik sin udregning af afstanden til Andromedatågen [130]. Han fandt afstanden ved at benytte udregninger af rotationshastigheden af Andromedatågen. Det var ikke nødvendigt at vide om Andromedatågen indeholdt stjerner eller ej for at benytte denne afstandsmålingsmetode. Öpiks resultat viste, at tågen lå i en afstand af 480 *kpc*. Andromedatågen lå altså udenfor Mælkevejen uanset om man var Shapley eller Curtis tilhænger. På baggrund af resultatet af sin opdagelse konkluderede Öpik, at Andromedatågen muligvis var et stjernesystem sammenligneligt med Mælkevejen. Desværre fik Öpiks opdagelse ingen betydning for diskussionen om, hvorvidt der var eller ikke var noget udenfor Mælkevejen. Hans udregning blev oversat af samtiden [73].

2.1.12 Hubble

I 1919 efter at have deltaget i første verdenskrig startede den amerikanske astronom Edwin P. Hubble på Mount Wilson observatoriet. I 1923 tog han et fotografi af Andromedatågen [21]. Efter grundige studier af dette billede opdagede han, hvad han først troede var en nova, en cepheide. Dette fund af en anden type stjerner end novaer i en spiral tåge var det første bevis på, at spiraltåger var fjerne stjernesystemer. Måneders undersøgelser af tilsvarende fotografier af Andromedatågen afslørede flere cepheider. Han benyttede Shapleys kalibrering af periode-luminositets relationen til at udregne afstanden til cepheiderne til at være 285 *kpc*. Denne afstand til Andromedatågen viste, at den lå langt udenfor Mælkevejens afgrænsning. Andromeda måtte være et enormt stjernesystem, en galakse. Hubble publicerer først resultaterne i januar 1925 [73]. Han nævnte dog i 1924 observationen af de første to cepheider i et brev til Shapley, der ikke tillagde opdagelsen større betydningen [21]. Russell derimod tillagde Hubbles opdagelse stor betydning. Han havde selv været overbevist om rigtigheden af van Maanens teori om, at spiraltåger var små og nære objekter. Han ændrede mening, da han hørte om Hubbles opdagelse, og han var ikke

den eneste, der ændrede holdning. Russell opfordrede i slutningen af 1924 Hubble til, at fortælle om sine resultater ved the American Association for the Advancement of Sciences møde, der skulle afholdes i Washington i starten af 1925. Hubble sendte et papir til Russell, der indeholdt hans resultater, og Russell læste det op ved mødet. Hubbles resultat satte en stopper for Shapley-Curtis debatten. Universet var meget større og rummede større objekter, end nogen havde turde tro [22]. I 1926 publicerer Hubble en artikel [75], hvori han klassificerer ekstra-galaktiske tåger i tre brede klasser; de ellipseformede, de spiralformede —herunder 'normal' spiraler og 'barred' spiraler— og de irregulære. Han fandt, at de Magellanske skyer måtte være de ekstra-galaktiske tåger, der lå tættest på jorden.

I samarbejde med astronomen Milton Humason på Mount Wilson målte Hubble rødforskydninger på flere ekstragalaktiske objekter. De målte hastigheder på helt op til 16.700 km/s . I 1929 havde Hubble udregnet afstande nok til at publicere et diagram, der tydeligt viste lineær sammenhæng mellem afstanden og den radiale hastighed for ekstragalaktiske tåger [76]. Han formulerede ikke sin senere så kendte lov i denne artikel. Dette var nemlig ikke hans primære mål med undersøgelserne. Universet blev på det tidspunkt betragtet som statisk og Hubble, der også betragtede universet som statisk, anså sit resultat som den første approksimation til de Sitters statiske kosmologiske model af universet (hvilken vi vil komme ind på senere i kapitel 3). Hubble formulerede først sin lov, da han hørte om det ikke statiske univers. Hubbles lov;

$$\log(v) = 0,2m + B, \quad (2.1)$$

hvor m er den forventede lysstyrke og B er en konstant, der afhænger af Hubble konstanten, H_0 , og den absolute lysstyrke af objektet [77], værdien af Hubble konstanten er endnu ikke endelig fastlagt. Eller som loven også skrives;

$$v = H_0 d, \quad (2.2)$$

hvor d er afstanden til objektet [29]. Hubbles opdagelse og resultater var af stor betydning, det var ikke længere Mælkevejen, der var hele universet. Mælkevejens størrelse var ikke længere universets grænse. Hans opdagelse af relationen mellem afstanden og den radiale hastighed af ekstra-galaktiske objekter gjorde det muligt at eftervise, at universet ikke er statisk men, at det udvider sig.

Kapitel 3

Relativistiske kosmologier

I dette kapitel vil vi referere de relativistiske kosmologier, vi mener har været de mest betydningsfulde i udviklingen af teorien om universets udvidelse. Udvælgelsen er foretaget udfra tidslinien i kapitel 1 og på baggrund af den betydning, vi har kunne tillægge teorierne ved læsning af oversigtslitteratur [2], [56], og [116]. Kriteriet for udvælgelsen har været, om de fremsatte teorier har bidraget med nogle nye konsekvenser for universets struktur.

Vi vil forsøge at beskrive teorierne så ensartet, at en sammenligning af deres antagelser og konsekvenser lettes. I dette kapitel vil vi dog kun referere teorierne, og sammenligningen af dem samt deres samspil med observationerne vil komme i kapitel 5. Matematiske formler er kun medtaget i det omfang, de har betydning for forståelsen af teorierne, og udledningen af dem er derfor meget mangelfuld.

3.1 Historisk introduktion

Da den tyske fysiker Albert Einstein i 1917 fremsatte en teori for universets struktur, var det den først fremsatte relativistiske kosmologi, og heri indføres den kosmologiske konstant λ for at opretholde det statiske univers. Allerede samme år kom den anden relativistiske kosmologi, fremsat af den hollandske astronom Willem de Sitter. I sin artikel kommer de Sitter med en anden løsning på relativitetsteoriens feltligninger, som medfører at universet er masseløst. I de følgende år kom der ingen nye bud på universets struktur, og op gennem tyverne gik diskussionen på, om Einsteins eller de Sitters løsning var den rigtige. I 1922 kom den første teori, der konkluderede, at universet udvider sig, den skyltes den

russiske meteorolog og matematiker Aleksandr Friedmann. Artiklen var meget matematisk og gjorde intet forsøg på at koble matematikken til den fysiske virkelighed. Bortset fra en kritisk kommentar fra Einstein angående en regnefejl [54], som han senere måtte trække tilbage, da han fandt ud af, at det var hans fejl [55], blev artiklen stort set ignoreret. Herefter er der en del forsøg på, at finde ud af matematikken i feltligningerne, men ingen andre når tilsyneladende frem til konklusionen om universets udvidelse før 1927, hvor den belgiske præst og astrofysiker Georges Lemaître skriver en artikel. Artiklen når frem til samme resultat som Friedmann, uden Lemaître angiveligt har læst dennes artikel [88], men derudover prøver Lemaître at opstille en sammenhæng med den fysiske verden, ved at lave en forudsigelse af den rødforskydning man vil måle fra objekter, der bevæger sig i forhold til Solen.

3.1.1 Feltligninger og linielementer

Grundlaget for alle teorierne er feltligningerne for den generelle relativitetsteori. Feltligningerne beskriver stoffets opførsel i gravitationsfelter og vil i dette kapitel blive beskrevet i den form, de har i Einsteins artikel [52]:

$$G_{\mu\nu} = -\kappa(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T), \quad (3.1)$$

De størrelser der indgår i ligningerne er Einsteins gravitationskonstant κ , tyngdepotentialerne $g_{\mu\nu}$, stof-tensoren $T_{\mu\nu}$ og Riemann-Christoffel tensoren $G_{\mu\nu}$. Når de forskellige teorier skal sammenlignes, er en måde at gøre det på, at sammenligne linielementerne. Linielementet er ligningen for afstanden mellem to begivenheder, altså afstand i både tid og rum. Ligningen for et linielement ser i Einsteins form således ud [49]:

$$ds^2 = -A(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2) + Bdx_4^2, \quad (3.2)$$

hvor A og B er konstanter, rumkoordinaterne hedder x_1 , x_2 , x_3 og tidskoordinaten x_4 , koordinatsystemet er valgt så tyngdefeltet er rumligt isotropt, hvilket er en af forudsætningerne for Einsteins teori [50].

3.2 Einsteins statiske og endelige univers

Einsteins artikel "*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*" [46] var som sagt den første relativistiske kosmologi, hans sammenligningsgrundlag er derfor naturligt begrænset. Han bygger sin teori op omkring nogle antagelser om universet, den generelle relativitetsteori samt nogle sammenligninger med universet set udfra Newtonsk mekanik.

3.2.1 Antagelser

Einstein starter med at definere betingelserne for at opstille en teori for universet på basis af den generelle relativitetsteori. Einstein siger at feltligningerne skal suppleres med grænsebetingelser for tyngdepotentialet i uendelig, hvis rummet skal kunne betragtes som rumligt uendeligt. Han fremsætter derfor følgende postulat: "it is possible to select a system of reference so that at spatial infinity all the gravitational potentials $g_{\mu\nu}$ become constant" [47]. Han finder på baggrund af en matematisk analyse ud af, at det er umuligt, at opfylde disse grænsebetingelser, og bliver derfor nød til at antage, at universet er rumligt endeligt, da der så ikke er brug for grænsebetingelser for potentialefunktionerne.

Med hensyn til masse i universet antager Einstein, at man ved at betragte universet på en stor skala, kan regne med at stoffet er jævnt fordelt. Idet stjernernes hastighed er meget lille i forhold til lysets, kan man antage, at der findes et referencesystem, i hvilket stof er i hvile.

3.2.2 Newtonsk teori

Einstein gør sig nogle betragtninger over de konsekvenser det har, hvis man opstiller en teori for universet udfra Newtonsk mekanik. Poissons ligning:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi K \rho \quad (3.3)$$

kan, i samspil med bevægelsesligningerne for en partikel, bruges i Newtons teori om 'action at a distance', men der er problemer ved uendeligt. For at få et konstant potentiale (ϕ) ved rumlig uendelighed, må man sige, at massetætheden (ρ) bliver 0 i uendelig. I Newtonsk teori forestiller man sig, at der findes et sted, omkring hvilket stoffets tyngdefelt

besidder kuglesymmetri set på en stor skala. ρ beregnes for en region, der er stor i forhold til afstanden mellem nabostjerner, men lille i forhold til stjernesystemet. For at opnå at ϕ har en grænseværdi i uendelig, må ρ ifølge lign. 3.3 gå hurtigere mod 0 end $\frac{1}{r^2}$, hvor r er universets radius. Dette leder til, at Newtons univers er endeligt selvom det kan indeholde uendelig meget masse. Konsekvenserne af dette er først og fremmest, at den stråling himmellegemerne udsender, vil fortsætte radially udaf og forlade det Newtonske univers og fortabe sig i det uendelige. Men hvad med himmellegemerne selv? I og med at potentialet har en grænseværdi ved uendeligt, vil himmellegemer med en endelig kinetisk energi være i stand til at overvinde de Newtonske tiltrækningskræfter, hvilket vil ske en gang imellem (ifølge statistisk mekanik). Dette problem kan ikke løses ved at indføre et uendeligt potentiale ved uendeligt, da potentialet er betinget af himmellegemerne. Ved at bruge Boltzmanns distributionslov på stjernesystemet, finder man ud af, at Newtons stjernesystem overhovedet ikke kan eksistere, da potentialets forsvinden ved uendeligt indebærer, at potentialet også forsvinder i centrum.

Derefter indfører Einstein en ændring af Poissons ligning (lign. 3.3) som parallel til den ændring af den generelle relativitetsteori, som senere følger for at få ligningerne til at passe med et statisk univers. Der skal dog ikke lægges nogen større vægt på denne ændring, den er først og fremmest ment som en ledetråd til den forestående ændring af feltligningerne. Her indføres den kosmologiske konstant λ for første gang:

$$\nabla^2\phi - \lambda\phi = 4\pi\kappa\rho. \quad (3.4)$$

“A universe so constituted would have, with respect to its gravitational field no centre. A decrease of density in spatial infinity would not have to be assumed, but both the mean potential and mean density which we found in the case of Newtonian theory is not repeated. With a definite but extremely small density, matter is in equilibrium, without any internal material forces (pressures) being required to maintain equilibrium” [48].

3.2.3 Det rumlige endelige univers

Ifølge den generelle relativitetsteori er krumningen af den 4-dimensionelle rum-tid i et punkt afhængig af det stof og tilstanden af det stof, der er tilstede på det punkt. Derfor må massetætheden betragtes på en stor skala, hvor det kan siges at være ensartet fordelt over enorme

rum, hvor massetætheden er en ekstremt langsomt varierende funktion, ellers vil de lokale forskelle komplicere den metriske struktur af stoffet. Hvis rummet antages at være rumligt endeligt, må massetætheden nødvendigvis være uafhængig af sted. Eftersom massetætheden er konstant, må også rummets krumning være konstant, og dette rum vil være sfærisk.

Omkring den kosmologiske konstant

Einstein skriver videre, at hvis de feltligninger der hidtil er blevet brugt er de eneste, der tilfredsstill det generelle relativitetspostulat, vil konklusionen være, at relativitetsteorien ikke tillader et rumligt endeligt univers. Men dette klares ved at indføre den kosmologiske konstant λ i feltligningerne (3.1) analogt med udvidelsen af Poissons ligning (lign. 3.4):

$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T). \quad (3.5)$$

Denne udvidelse er ifølge Einstein i overensstemmelse med eksperimentelle fakta fra solsystemet, og den tilfredsstill også bevarelseslovene for impuls og energi.

Det er altså her Einstein indfører den kosmologiske konstant λ , han skriver ikke eksplicit, at det er for at opretholde det statiske univers, men alle senere tolkninger vi er støt ind i, skriver det f. eks. "...to maintain a static universe, the term λ had to be included" [25].

3.2.4 Beregninger

Vet at sætte energi-tensoren $T_{\mu\nu} = 0$ for alle andre end T_{44} som sættes lig ρ , og idet alle punkter i kontinuumet er ens, mener Einstein, at det kun er nødvendigt at gennemføre beregninger af feltligningerne for et punkt ($x_\alpha = 0$, $\alpha = 1, 2, 3, 4$), hvor gravitationspotentialerne har følgende værdier:

$$\begin{aligned} g_{11} &= g_{22} = g_{33} = -1, \\ g_{44} &= 1, \end{aligned} \quad (3.6)$$

og alle andre $g_{\mu\nu}$ er lig 0, dette leder ifølge Einstein til, at universet må være sfærisk; "From our assumption as to the uniformity of distribution of the masses generating the field, it follows that the curvature of

the required space must be constant. With this distribution of mass, therefore, the required finite continuum of the x_1, x_2, x_3 , with constant x_4 , will be a spherical space" [51]. Disse gravitationspotentialer fører til følgende værdi for λ som opfylder lign. (3.5):

$$\lambda = \frac{\kappa\rho}{2} = \frac{1}{R^2}. \quad (3.7)$$

λ definerer således både den gennemsnitlige massetæthed ρ , der kan forblive i ligevægt, rummets radius R og dermed volumenet af det kugleformede rum $2\pi^2 R^3$ (der er ikke tale om volumenet af en kugle: $\frac{4}{3}\pi r^3$). Massen af universet er også endelig og kan beregnes ved:

$$M = \rho 2\pi^2 R^3 = 4\pi^2 \frac{R}{\kappa}. \quad (3.8)$$

Einstein skriver, at han ikke diskuterer, hvorvidt den fremsatte teori passer med aktuelle astronomiske observationer. Udvidelsen af feltligningerne er ikke verificeret af den aktuelle viden om tyngdekraft, men det understreges, at rummets positive krumning kommer ud af resultaterne uanset om λ introduceres eller ej. λ er kun med for at fordele stoffet jævnt i universet.

3.3 De Sitters masseløse univers

Allerede i november 1917 kom de Sitter med et alternativt bud på en løsning, der tilfredstillede feltligningerne for den generelle relativitetsteori i artiklen "*On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences. Third Paper*" [119]. I sin artikel gør de Sitter rede for, at feltligningerne også kan opfyldes, hvis man forudsætter, at universet er masseløst. De Sitter bygger sin artikel op omkring en sammenligning med Einsteins artikel, hvilket gør det mere overskueligt at sammenligne netop disse to. Til gengæld er artiklen meget matematisk i sin tilgang til universet struktur, hvorfor nogle pointer måske er gået tabt for os. Endelig gør de Sitter en del ud af at opnå resultater ved at sammenholde teorierne, både Einsteins og sin egen, med observationsdata.

3.3.1 Antagelser

De Sitter siger, at ifølge den generelle relativitetsteori er der ingen forskel på inerti og gravitation; de er begge udtryk i potentialefunktionerne $g_{\mu\nu}$. Men det er praktisk at skelne mellem dem, da den del der kan spores direkte tilbage til kendte objekter, kaldes gravitation og resten kaldes inerti. Herefter opstiller de Sitter to postulater for inertis opførsel:

- *Det matematiske postulat for inertis relativitet*

Ifølge feltligningerne (lign. 3.1) er gravitationspotentialerne $g_{\mu\nu}$ fastlagt på nær en konstant, når man har valgt referencesystem. Hvis $g_{\mu\nu}$ 'erne er 0 i uendeligt, så skyldes alle afvigelser fra de aktuelle værdier stofflig tilstedeværelse, som altså skaber al inerti og gravitation.

- *Det materielle postulat for inertis relativitet*

Hvis man forestiller sig, at der eksisterer noget stof, som ikke er, det stof vi kender; stjerner etc. og kalder dette stof for — verdens-stof, så vil der eksistere inerti i forhold til dette stof, hvis alt andet stof ikke eksisterede. Dette medfører, at universet ikke kan eksistere uden stof.

Det materielle postulat skyldes Mach's princip og er *ikke* opfyldt i de Sitters løsning, idet han siger: "This matter, however, fulfills no other purpose than to enable us to suppose it not to exist, and to assert that in that case there would be no inertia" [120].

3.3.2 Matematik

De Sitter kalder densiteten af verdens-stoffet ρ_0 og densiteten af 'almindeligt' stof ρ_1 den samlede densitet af stof i universet bliver derfor:

$$\rho = \rho_0 + \rho_1. \tag{3.9}$$

Når stoffet er i hvile og uden internt tryk, kan stof-tensoren $T_{\mu\nu}$ skrives som $T_{44} = g_{44}\rho$ og alle andre $T_{\mu\nu} = 0$. Når man herefter kigger på

Einsteins udvidede feltligninger (lign. 3.5) og kun regner med inerti og ikke gravitation, og derfor negligerer ρ_1 fås:

$$\begin{aligned} G_{ij} - \left(\lambda + \frac{1}{2}\kappa\rho_0\right)g_{ij} &= 0, \\ G_{44} - \left(\lambda + \frac{1}{2}\kappa\rho_0\right)g_{44} &= -\kappa\rho_0g_{44}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

hvor indeks ij går fra 1-3. Disse ligninger kan tilfredsstilles, hvis:

$$\kappa\rho_0 = 2\lambda, \quad \lambda = \frac{1}{R^2}, \quad (3.11)$$

så fås følgende linieelement:

$$ds^2 = -dx_1^2 - R^2 \sin^2 \frac{x_1}{R} [dx_2^2 + \sin^2 x_2 dx_3^2] + c^2 dx_4^2, \quad (3.12)$$

hvilket svarer til Einsteins løsning (lign. 3.2) på sfæriske koordinater. Men der eksisterer også en anden løsning, nemlig hvis:

$$\rho_0 = 0, \quad \lambda = \frac{3}{R^2}, \quad (3.13)$$

så kan linieelementet skrives som:

$$ds^2 = -dx_1^2 - R^2 \sin^2 \frac{x_1}{R} [dx_2^2 + \sin^2 x_2 dx_3^2] + \cos^2 \frac{x_1}{R} c^2 dx_4^2, \quad (3.14)$$

hvilket er de Sitters løsning, og som det ses af lign. 3.13 er forudsætningen, at der ikke eksisterer noget verdens-stof. Senere når de Sitter frem til, at også $\rho_1 = 0$ og dermed er universet masseløst, undtagen i solen som han definerer til være universets centrum.

3.3.3 Konsekvenser af det masseløse univers

Både Einsteins og de Sitters løsninger er tre-dimensionale rum med konstant positiv krumning. De Sitter gør opmærksom på, at der eksisterer to forskellige former for rum med konstant positiv krumning, nemlig det sfæriske Riemann-rum, som Einstein bruger i sin teori (jvf. afsnit 3.2.4) og det elliptiske rum, som de Sitter mener er enklere, hvilket han også har konfirmeret med Einstein [121]. Begge rum er endelige og volumenet af det sfæriske rum er $2\pi^2 R^3$ og af det elliptiske $\pi^2 R^3$.

Ifølge de Sitter er tiden i Einsteins løsning quasi-absolut, og den tilfredsstillende derfor kun det 'matematiske postulat' for de tre rumlige

koordinater, hvilket medfører: "all motions of material bodies are relative to the space (x_1, x_2, x_3) with the world-matter, not to the absolute space. The world-matter . . . is nothing else but this inertial system materialised" [122]. Herimod står de Sitters løsning, der er relativistisk for alle koordinater: "there is no essential difference between the "time" and the other three co-ordinates" [123].

En anden konsekvens af de Sitters teori er, at lysstråler ikke beskriver geodætiske linier, hvilket materielle partikler heller ikke gør. Ved at placere solen i origo kan man opnå, at partiklen følger en ret linie, men hastigheden vil ikke være konstant. Ydermere sker der det, at når en partikel eller en lysstråle er på polarlinien, kan den ikke have nogen hastighed, hvilket skyldes: "that on the polar line the four-dimensional time-space is reduced to the three-dimensional space: *there is no time, and consequently no motion*" [124].

3.3.4 Resultater og observationer

De Sitter mener det er ganske sandsynligt "that at least some of the spiral nebulae or globular clusters are galactic systems comparable with our own in size" [125]. På den baggrund giver han et estimat over krumningsradius i Einsteins univers, ved at beregne den tilsyneladende angulære diameter δ af et objekt med lineær diameter d og afstand $r = R\chi$ fra jorden udfra:

$$\delta = \frac{d}{R \sin \chi}. \quad (3.15)$$

Ved at sætte $\delta = 5'$ og $d = 10^9$ fås omtrentligt $R \geq 10^{12}$. Udfra det elliptiske rums volumen $\pi^2 R^3$ og lign. 3.11 fås formlen for den totale masse i universet:

$$M_0 = \frac{2\pi^2 R}{\kappa} = 8 \times 10^7 R, \quad (3.16)$$

$$\rho_0 = \frac{8 \times 10^6}{R^2}. \quad (3.17)$$

M_0 afviger fra Einsteins udtryk (lign. 3.8) med en faktor $\frac{1}{2}$, da der her regnes med det elliptiske volumen. Ved at sætte $\rho_0 = 10^{-17}$, hvilket er et estimat udfra stjernedensiteten i galaksens (Mælkevejens) centrum svarende til 80 stjerner, fås krumningsradius:

$$R = 9 \times 10^{11}, \quad (3.18)$$

og herefter ved indsættelse $M_0 = 7 \times 10^{19}$. Alle udregninger er foretaget med astronomiske enheder: dage, solmasser og middelfstanden til solen (au).

En følge af de Sitters teori er rødforskydning af lyset fra fjerntliggende objekter: "the frequency of light-vibrations diminishes with increasing distance from the origin of co-ordinates. The lines in the spectra of very distant stars or nebulae must therefore be systematically displaced towards the red, giving rise to a spurious positive radial velocity" [126]. Udfra den Magellanske skys radiale hastighed $+150 \text{ km/s}$ og afstand $r > 6 \times 10^9$ når de Sitter frem til en krumningsradius $R > 2 \times 10^{11}$, når han regner på sin egen model. Udfra de observerede radiale hastigheder for tre spiraltåger beregner de Sitter gennemsnittet og når frem til $+600 \text{ km/s}$. Denne værdi bruger de Sitter, sammen med en esitmeret gennemsnitsafstand på 10^5 pc , til at udregne endnu en værdi for krumningsradius:

$$R = 3 \times 10^{11}. \quad (3.19)$$

de Sitter ved godt, det ikke giver nogen mening at konkludere udfra kun tre observationer men påpeger, at fremtidige observationer skal indikere, hvilken teori, hans eller Einsteins, der er den bedste beskrivelse af universet.

3.4 Friedmann og universets fødsel

Alexandr Friedmann kommer i sin artikel "*Über die Krümmung des Raumes*" [66] med nogle matematiske argumenter for andre løsninger til feltligningerne (3.1), end dem Einstein og de Sitter argumenterer for. Disse løsninger er dog indeholdt i Friedmanns generelle løsninger som specialtilfælde.

3.4.1 Antagelser

Friedmann opstiller nogle antagelser for sine beregninger. Antagelserne deler han op i 2 klasser, den første klasse drejer sig om de ligninger der beskriver tyngdepotentialet og stofs bevægelse og tilstand, den anden klasse drejer sig om universets geometri.

I første klasse af antagelser siger Friedmann, at tyngdepotentialet tilfredsstiller Einsteins modificerede feltligninger (3.5). Han mener dog at den kosmologiske konstant λ kan sættes lig 0, og dermed er overflødig.

Vedrørende stof siger Friedmann, at "matter is incoherent and relatively at rest. Stated less strongly, the relative velocities of matter are vanishingly small in comparison with the velocity of light" [67]. Derfor er energi-tensoren givet ved $T_{44} = c^2 \rho g_{44}$ og alle andre $T_{\mu\nu} = 0$.

I den anden klasse opstiller Friedmann en generel ligning til bestemmelse af ds , hvor han gør den antagelse, at tiden står vinkelret på rummet, men siger dog det ikke har nogen filosofisk eller fysisk begrundelse. Han når derefter frem til følgende ligning for linieelementet ds :

$$ds^2 = R^2(dx_1^2 + \sin^2 x_1 dx_2^2 + \sin^2 x_1 \sin^2 x_2 dx_3^2) + M^2 dx_4^2, \quad (3.20)$$

hvor R er en funktion af x_4 og M (massen) afhænger af alle 4 x 'er. Einsteins løsning (3.2) på sfæriske koordinater opnås herefter ved at sætte R^2 lig med $-\frac{R^2}{c^2}$ og $M = 1$, hvorefter R er den konstante radius af rummets krumning. De Sitters løsning (3.14) opnås ved at sætte $R^2 = -\frac{R^2}{c^2}$ og $M = \cos x_1$.

Endelig gøres nogle antagelser om koordinaternes udstrækning, som ikke er videre begrundede: $0 \leq x_1 \leq \pi$, $0 \leq x_2 \leq \pi$ og $0 \leq x_3 \leq 2\pi$, tidskoordinaten x_4 pålægges indtil videre ingen restriktioner.

3.4.2 Universelle betragtninger

Ved at sætte $\mu = 1, 2, 3$ og $\nu = 4$ i ligning (3.5) opnår Friedmann udfra antagelserne om stof-tensoren og linieelementet (lign. 3.20), at:

$$R'(x_4) \frac{\partial M}{\partial x_1} = R'(x_4) \frac{\partial M}{\partial x_2} = R'(x_4) \frac{\partial M}{\partial x_3} = 0, \quad (3.21)$$

hvor ' betyder differentieret med hensyn til x_4 . Det medfører, at enten må $R'(x_4) = 0$ og således er R uafhængig af tiden, eller også må $R'(x_4) \neq 0$ og M afhænger således kun af tiden.

Friedmann analyserer herefter resultaterne og når frem til, at det statiske tilfælde (R uafhængig af tid) medfører at enten er $M = M_0 = \text{konst.}$, hvilket er Einsteins univers, eller også er $M = (A_0 x_4 + B_0) \cos x_1$, hvor A_0 og B_0 er konstanter, hvilket er de Sitters univers. Det er i øvrigt værd at bemærke, at Friedmann kalder Einsteins univers for cylindrisk

og de Sitters for sfærisk [67] imodsætning til, hvad Einstein og de Sitter selv gør.

For at komme videre med de ikke statiske løsninger, opstiller Friedmann følgende ligninger ud fra Einsteins modificerede feltligninger (lign. 3.5) med $\mu = \nu = 1, 2, 3$:

$$\frac{R'^2}{R^2} + \frac{2RR''}{R^2} + \frac{c^2}{R^2} - \lambda = 0, \quad (3.22)$$

og med $\mu = \nu = 4$:

$$\frac{3R'^2}{R^2} + \frac{3c^2}{R^2} - \lambda = \kappa c^2 \rho. \quad (3.23)$$

Herefter når Friedmann frem til følgende integral, der giver et udtryk for tiden, t , der indføres i stedet for x_4 :

$$t = \frac{1}{c} \int_a^R \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2} x^3}} dx + B, \quad (3.24)$$

hvor a , A og B er konstanter. Massetætheden i universet bestemmes ud fra ligning (3.23), og bliver:

$$\rho = \frac{3A}{\kappa R^3}, \quad (3.25)$$

hvor A kan bestemmes ud fra universets totale masse \bar{M} ; $A = \frac{\kappa \bar{M}}{6\pi^2}$.

Der vil opstå forskellige løsningstyper til integralet (3.24), alt efter hvordan fortegnet på kvadratroden varierer. Friedmann begrænser løsningerne til at omfatte positive krumningsradii, dvs. $0 \leq x \leq \infty$. Derudover kigger han kun på de tilfælde, hvor kvadratroden giver 0 eller ∞ , hvilket er de tilfælde hvor løsningerne ændrer natur. Endelig gøres den antagelse, at rummets krumningsradius er R_0 for $t = t_0$, og at fortegnet af kvadratroden kan arrangeres således (ved at ændre t 's fortegn), at R stiger når tiden 'stiger'. Herefter er der givet 3 forskellige løsningstyper, der hver især har forskellig betydning for universets struktur.

Monotont univers af første slags

Den første type kalder Friedmann for et "monotont univers af første slags". I dette tilfælde integreres fra R_0 til R , og resultatet der opnås er $t - t_0$. Der er ingen restriktioner på R_0 udover, at krumningsradius skal være positiv, dvs. at $R = 0$ for $t = 0$ og tiden fra $R = 0$ til $R = R_0$ kaldes derfor for "tiden siden universets skabelse", det er ifølge [82] første gang begreberne om universet skabelse og alder introduceres i kosmologien.

Monotont univers af anden slags

Den anden type kaldes for "monotont univers af anden slags", og ligner det af første slags, men udvidelsen starter bare fra $R = x_0$.

Det periodiske univers

Den tredje type er det tilfælde, hvor R bliver en periodisk funktion af t med perioden t_π . Det betyder at rummets krumningsradius varierer mellem 0 og x_0 , perioden afhænger af λ og går mod ∞ for store λ , men kan tilnærmes med følgende for små λ :

$$t_\pi = \frac{\pi A}{c}. \quad (3.26)$$

Der er to måder at betragte to sammenfaldende begivenheder på:

- deres rum-koordinater er sammenfaldende og deres tidskoordinater varierer med et heltal gange perioden, det medfører at rummets krumningsradius vokser fra 0 til x_0 og falder derefter til 0 igen, universets levetid er endelig.
- både deres rum- og tids-koordinater skal være sammenfaldende, dvs at tiden varierer mellem $-\infty$ og ∞ .

Det er således den eneste type univers, hvor λ ifølge Friedmann spiller en rolle. Men alle tre universtyper er ikke statiske.

3.4.3 Afrunding

Friedmann slutter af med at fremføre, at "Our information is completely insufficient to carry out numerical calculations and to distinguish which world our universe is. It is possible that the causality problem and the problem of centrifugal force will illuminate these questions" [68]. Yderligere påpeger han, at λ ikke er fastlagt indenfor hans udregninger, men angiver, at hvis $\lambda = 0$ og $M = 5 \times 10^{21}$ solmasser, bliver universets periode af størrelsesordenen 10 milliarder år.

3.5 Lemaître og det ekspanderende univers

Georges Lemaîtres artikel "*Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant*" [96] leder ligesom Friedmanns arbejder (jvf. afsnit 3.4) til et ikke-statisk univers. Lemaître havde angiveligt ikke set Friedmanns arbejder [89] [97]. Alligevel ligner Lemaîtres udledninger Friedmanns, men Lemaître går skridtet videre og prøver, at sammenkæde teorierne med observationer.

3.5.1 Argumentation mod det statiske univers

Lemaître starter med at opridse argumenterne for og imod Einsteins og de Sitters teorier, han mener at begge teorier forklarer nogle af de observationer, der er gjort. Einsteins teori giver en fornuftig sammenhæng mellem massen i og radius af universet, mens de Sitter teori giver en forklaring på de hastigheder væk fra Mælkevejen, man har fundet for spiraltåger. Han konkluderer derfor, at løsningen på problemet skal findes midt mellem de to foreslåede teorier. Herefter skriver Lemaître "At first sight, such an intermediate solution does not appear to exist. A static gravitational field for a uniform distribution of matter without internal stress has only two solutions, that of Einstein and that of de Sitter. De Sitter's universe is empty, that of Einstein has been described as "containing as much matter as it can contain." It is remarkable that the theory can provide no mean between these two extremes." [98]. Samtidig argumenterer han imod de Sitters antagelser om at dele rum-tiden op i rum og tid, da det fører til, at testpartikler vil opføre sig forskelligt alt efter, hvor de befinder sig, da der samtidigt indføres et centrum i universet. Lemaître mener derfor, at universet vil have

samme fysiske egenskaber som Einsteins, men det kan ikke være et statisk univers, da de eneste løsninger til Einsteins feltligninger, der giver et statisk univers, som sagt er Einsteins og de Sitters. Universets radius må altså kunne ændre sig.

3.5.2 Grundantagelser

Lemaître opstiller nogle antagelser for universets opbygning, der svarer til Einsteins. Han betragter universet som homogent på en stor skala, dvs. at universet ser ens ud uanset, hvor man befinder sig. Derudover vil densiteten variere med tiden, når universets radius varierer. Yderligere argumenterer han for, at den interne 'stress' i universet, der af homogenitetsårsager må svare til tryk, er ubetydelig i forhold til den energi stof indeholder, så trykket fra stof kan negligeres, $p = 0$. Dog kan det tryk der stammer fra elektromagnetisk stråling influere på forholdene, idet trykket, selvom det er svagt, jo skal summeres op over hele universet og således kan komme til at antage betydelige dimensioner. Trykket vil derfor indgå i ligningerne. Lemaîtres linieelement kommer herefter til at se således ud:

$$ds^2 = -R^2 d\sigma^2 + dt^2, \quad (3.27)$$

hvor $d\sigma^2$ er den elementære afstand i et rum med enhedsradius og R er en funktion af tiden, hvilket er det samme som det oprindelige linieelement (lign. 3.2) fra den generelle relativitetsteori. Lemaître opskriver feltligningerne på differentialform som:

$$3\frac{R'^2}{R^2} + \frac{3}{R^2} = \lambda + \kappa\rho \quad (3.28)$$

og

$$2\frac{R''}{R} + \frac{R'^2}{R^2} + \frac{1}{R^2} = \lambda - \kappa\rho, \quad (3.29)$$

hvilket er magen til Friedmanns ligninger (3.22 og 3.23) på nær c^2 i nogle af ledene og $\kappa\rho$ i 3.23. Lemaître angiver også bevarelsesligningen for impuls og energi:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{3R'}{R}(\rho + p) = 0, \quad (3.30)$$

hvilket viser at "the variation of total energy plus the work done by radiation-pressure in the dilation of the universe is equal to zero" [99].

3.5.3 De statiske løsninger

De statiske løsninger, der svarer til Einsteins og de Sitters, når Lemaître frem til ved at holde massen ($M = V\delta$) i universet konstant og opskrive udtrykket:

$$\kappa\delta = \frac{\alpha}{R^3}, \quad (3.31)$$

hvor δ er energi-stress tensoren T på formen $\delta = \rho - 3p$, når Lemaître frem til følgende integraludtryk for tiden:

$$t = \int \frac{dR}{\sqrt{\frac{\lambda R^2}{3} - 1 + \frac{\alpha}{3R} + \frac{\beta}{R^2}}}, \quad (3.32)$$

hvor α og β er konstanter. Dette udtryk indeholder Einsteins og de Sitters løsninger, idet man ved at sætte $\beta = 0$ og R konstant, opnår:

$$R = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \quad \kappa\delta = \frac{2}{R_E^2}, \quad (3.33)$$

hvor $\rho = \delta$ og p således er lig 0, R_E angiver Einsteins radius (jvf. lign. 3.7). Sammenholdes dette med lign. 3.31 fås:

$$\alpha = \kappa\delta R^3 = \frac{2}{\sqrt{\lambda}}. \quad (3.34)$$

Hvis α og β forsvinder i udtryk (3.32) fås de Sitters løsning på Lanczos' form:

$$R = \sqrt{\frac{3}{\lambda}} \cosh \sqrt{\frac{\lambda}{3}}(t - t_0), \quad (3.35)$$

denne har vi dog ikke arbejdet med.

3.5.4 Det ekspanderende univers

Ved at sætte $\lambda = \frac{1}{R_0^2}$ og sammenholde det med lign. 3.33 og 3.34 giver det universets variable radius:

$$R^3 = R_E^2 R_0. \quad (3.36)$$

For en lysstråle fås afstanden mellem to rum-koordinater ved:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{R}, \quad (3.37)$$

hvor σ_1 er udsendelsesstedet og σ_2 observationsstedet. En lysstråle udsendt δt_1 senere fra σ_1 når σ_2 δt_2 senere, hvilket giver:

$$\frac{\delta t_2}{R_2} - \frac{\delta t_1}{R_1} = 0 \Leftrightarrow \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1, \quad (3.38)$$

hvor R_1 og R_2 er størrelsen af R på udsendelsestidspunktet t_1 og observationstidspunktet t_2 . Hvis δt_1 er perioden af det udsendte lys og δt_2 perioden af det observerede lys, vil δt_1 også være perioden af lys udsendt under samme betingelser i nærheden af observatøren. Derfor fås den tilsyneladende Doppler effekt:

$$\frac{v}{c} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1, \quad (3.39)$$

der hidrører fra universets udvidelse, hvor v svarer til den hastighed observatøren skulle have for at frembringe samme effekt.

Ud fra "a discussion of available data" [100] regner Lemaître sig frem til følgende værdier for R og R_0 : $R = 6 \times 10^9$ pc og $R_0 = 2,7 \times 10^8$ pc.

3.5.5 Konsekvenser af det ekspanderende univers

Universet udvider sig uden grænser startende asymptotisk fra R_0 for $t = -\infty$, det medfører en radial hastighed for de tåger, der ligger uden for Mælkevejen. Rødforskydningen der skyldes universets udvidelse medfører desuden, at størsteparten af universet ligger uden for vores rækkevidde, da de store afstande til fjerntliggende galakser, vil forskyde lyset ind i det infra-røde spektrum. Lemaître runder af med en bemærkning om, at det mangler at blive bestemt, hvad der forårsager universets udvidelse. Lemaître mener det muligvis skyldes strålingstrykket fra elektromagnetiske bølger, da disse i et endeligt univers vil vende tilbage til deres udsendelsessted og akkumuleres i det uendelige, hvilket giver et enormt tryk. Det er måske på sin plads lige at pointere, at der endnu ikke var snak om, hvordan universet blev skabt. Der var altså ingen, der havde hørt om Big Bang.

Kapitel 4

Videnskabsteorier

I dette kapitel vil vi introducere de to videnskabsteorier, vi har valgt at arbejde med i analysen af begrebsdannelsen omkring universets udvidelse for at give læseren et vurderingsgrundlag.

Vi har valgt at arbejde med to forskellige videnskabsteorier i vores analyse: logisk empirisme og Poppers falsifikationsteori. Disse to er valgt ud fra en ide om, at de vægter forholdet mellem observationer og teorier forskelligt. Derudover er disse to teorier udviklet i tidsrummet omkring den periode vi arbejder med, nemlig den logiske empirisme i slutningen af forrige århundrede og Poppers falsifikationsteori i 30'erne.

I de to følgende afsnit gives en kort introduktion til de to teorier. Introduktionen bygger på [35] og er på ingen måde tænkt som værende en diskussion af videnskabsteori, men kun som en guide til de termer vi vil bruge i vores analyse. Introduktionerne kan virke en smule firkantede og bastante, men det skyldes at vi vil fremhæve betydningen af hhv. observationer og teorier i de to videnskabsteorier.

4.1 Logisk empirisme

Den logiske empirisme er en videnskabsteori, der siger at al viden bygger på observationer. Udfra observationer kan man så induktivt slutte sig frem til den sande viden om verden.

Når man skal foretage observationer, er det vigtigt, at man er objektiv, og at ens sanser fungerer optimalt, idet man skal observere alt, hvad der foregår og notere det, så andre kan bruge observationerne til at drive videnskab. Med et tilstrækkeligt stort antal observationer foretaget

under mange forskellige forhold, der alle angiver en bestemt egenskab ved det observerede, kan man så konkludere, at alle forekomster af det observerede vil have den bestemte egenskab. Udfra et endeligt antal observationer kan man således uddrage den endegyldige sandhed omkring et observeret fænomen. Det er klart, at der ikke må forekomme observationer, som modsiger sandheden, da den jo så ikke længere kan være sandheden. Med denne nyvundne videnskabelige sandhed i hånden kan man komme med forudsigelser omkring fænomener, der kan udledes af den sandhed, man er i besiddelse af. Herefter kan der så gøres nye observationer, som udbygger den viden man allerede har opnået. På denne måde akkumuleres den sande viden; "The growth of science is continuous, ever onward and upward, as the fund of observational data is increased" [36].

En af videnskabens vigtigste funktioner er at kunne forudsige fænomener. Med den sande viden som grundlag, kan man udfra nogle givne startbetingelser, slutte sig frem til resultatet. På denne måde opnår man et sikkert resultat — hvergang. En anden vigtig ting ved videnskaben er, at den skal være objektiv. Ifølge den logiske empirisme er viden objektiv, idet al viden stammer fra observationer, der er foretaget med sanserne af objektive videnskabsmænd.

4.1.1 Poppers falsifikationsteori

Poppers falsifikationsteori, skyldes den østrigsk fødte engelske videnskabsteoretiker Karl R. Popper. Ifølge falsifikationsteorien er grundlaget for videnskab falsificerbare teorier. En teori, der ikke er falsificerbar, er ikke en teori, som udtrykker noget, der er værd at vide om verden.

Videnskabsmandens fornemmeste opgave er at fremsætte falsificerbare teorier, der vel at mærke skal udsige noget nyt om verden og have så stor generalitet som muligt. Når en teori så bliver testet ved eksperimenter/observationer og der ikke observeres noget, som er i modstrid med teorien, så er det den hidtil bedste teori, der er fremsat om fænomenet. Men i samme øjeblik der observeres noget, som falsificerer teorien, skal den forkastes. Kun på denne måde opnår man, at videnskaben er i stadig fremdrift.

Når en teori skal udsige noget nyt om verden, er det fordi det giver anledning til mere ny viden end, hvis man fremsætter en ny teori om nogle velkendte fænomener, man allerede har en teori, der kan forklare. Har man en ny teori, der siges at give forklaring på nogle fænomener, man

ikke kan forklare med eksisterende teorier, kan man prøve at falsificere den nye teori. Hvis forsøg på at falsificere den nye teori mislykkes (indtil videre), har man opnået ny viden, og den bliver dermed en del af det grundlag videnskaben kan bygge videre på. Den nye teori kan så afstedkomme nye forudsigelser om fænomener, man ikke hidtil har tænkt på eller haft teorier om, og ved at forsøge at falsificere disse forudsigelser, kan man således udbygge den tilgængelige viden.

Jo mere generel en teori er, des flere fænomener beskriver den, og des mere falsificerbar er den. Det bør derfor tilstræbes, at de teorier der fremsættes har så stor generalitet som muligt, da det herefter vil være lettere at falsificere den. Hvis forsøg på at falsificere teorien derimod mislykkes, har man opnået et større område af ny erkendelse. Dette leder direkte over i, hvornår man opnår store fremskridt i videnskaben. De største fremskridt sker, når man enten får falsificeret en af de store grundliggende teorier, eller når man ikke kan falsificere en dristig teori, der kommer med nye anderledes indfaldsvinkler på kendte fænomener. Grunden til at dette giver de største fremskridt er, at når man falsificerer en grundliggende teori, bliver alt det, man hidtil har troet på usandt. Ligeledes er det et stort fremskridt, når man ikke kan falsificere en ny dristig teori, da man således må indse, at ting man hidtil havde anset som værende umulige pludselig er mulige. Det giver sig selv, at falsifikationismen ikke tillægger nogle teorier endelig sandhedsværdi, en teori kan højst være bedre end sine forgængere til at forklare fænomener, den bliver aldrig endegyldig. "... as a science progresses, its theories should become more and more falsifiable, and consequently have more and more content and be more and more informative" [37].

Er en teori i fare for at blive falsificeret, må man ikke indføre *ad hoc* justeringer, som ikke er falsificerbare. Man må i stedet modificere sin teori, så den stadig er falsificerbar ellers går det videnskabelige fremskridt i stå.

Kapitel 5

Analyse af erkendelsesforløbet

I dette kapitel vil vi forsøge at sætte fokus på observationerne og teorierne, der er beskrevet i kapitlerne 2 og 3 samt prøve at kaste lys over nogle af de forskellige forskere, der har prøvet at udvikle en sammenhæng mellem de to områder. I forbindelse med observationerne vil vi lægge vægt på udviklingen af målemetoder og synet på universets struktur. Med hensyn til teorierne vil vi gøre nogle betragtninger over, hvilke konsekvenser de har i forhold til matematiske/fysiske forhold (den generelle relativitetsteori, Machs princip) samt teoriernes indbyrdes forhold. I begge tilfælde vil vi inddrage videnskabsteoriene fra kapitel 4 for at se, hvordan de stemmer overens med det faktiske forløb. Selvom videnskabsteoriene er normative sammenligner vi dem her med det faktiske forløb, for at kunne drage konklusioner om, hvorvidt forskerne har fulgt normerne for god videnskabelighed, og på den måde komme med nogle betragtninger omkring deres indflydelse eller mangel på samme. Til sidst i kapitlet vil vi komme ind på nogle forskere, der har prøvet at etablere en forbindelse mellem observationer og teorier. Grunden til at de er sat uden for forløbet er, at de ved knytte de to områder sammen ikke er dækket af de to videnskabsteorier vi arbejder med.

5.1 Observationerne

I dette afsnit vil vi sammenstille de forskellige observationer, der er gennemgået i kapitel 2 samt analysere, hvad der sker med den viden

observationerne indeholder. Analysen sker ud fra logisk empirisme (jvf. afsnit 4.1), der er den videnskabsteori, der lægger specielt vægt på observationer.

For at astronomer og teoretikere kunne nå til erkendelse af universets udvidelse måtte der ske en udvikling af metoder og begreber. Først og fremmest var det nødvendigt, at man fandt ud af, at universet bestod af meget mere end Mælkevejen, og at de spiraltåger man kunne observere var galakser ligesom Mælkevejen. De to målemetoder, der var brug for til at opdage universets udvidelse, skulle også være opfundet og anerkendt. De to målemetoder er hastighedsmåling vha. rødforskydning og afstandsbestemmelse vha. cepheider.

5.1.1 Opfattelsen af universet

I starten af 1900-tallet var flertallet af astronomer overbevist om, at universet var det samme som Mælkevejen. Den overbevisning byggede på observationer, hvorfra det var muligt at udregne afstanden til stjernerne vha. parallakse. En afstandsmålingsmetode, der var accepteret før 1900-tallet. Astronomer havde forskellige teknikker til at bestemme universets struktur og omkring 1900 kom en ny metode, hvor egenbevægelsen af stjernerne benyttedes. Denne teknik og andre teknikker, der blev udviklet i starten af 1900-tallet kunne kun benyttes på grupper af stjerner og stjerner, der lå relativt tæt på. Dette gjorde, at de første modeller af universet eller Mælkevejen set med eftertidens øjne var meget små.

I perioden vi har valgt er Kapteyn den første, der opstiller en model over universet (jvf. afsnit 2.1.1). Han benyttede netop teknikken med stjernernes egenbevægelse. Selv om Kapteyn benyttede nyudviklet metode til at afstandsbestemme blev hans model accepteret af astronomer. Strukturen og størrelsen af Kapteyns univers lignede meget en model, der blev opstillet i slutningen af 1800-tallet af William Herschel [3]. Dette var måske grunden til, at Kapteyns model blev accepteret uden andre astronomers observationer til at eftervise Kapteyns resultat. Det Kapteyns resultat gjorde var, i og med han fik nogenlunde samme resultat, at eftervise Herschels model med en anden fremgangsmetode. Det eneste nye i Kapteyns model var, at Solen ikke var placeret i centrum af Mælkevejen.

Selv om Mælkevejen blev betragtet som værende lig universet, kom der allerede i 1909 observationer, der kunne have betydet en ændring af

den opfattelse. Opfattelsen var den, at Mælkevejen rummede alt, der kunne observeres på himmelen. Da Kapteyns model af universet var accepteret, var der en grænse for, hvor langt væk et objekt kunne ligge. Denne grænse havde en indirekte indflydelse på, at Faths observationer ikke blev anerkendt (jvf. afsnit 2.1.4). Hans observationer af spiraltåger viste, at de måtte rumme stjerner. Astronomer var på det tidspunkt af den opfattelse, at spiraltåger, som navnet antyder, var spiralformede tåger af gas eller støv. Dette var, hvad der kunne ses med datidens teleskoper. Faths opdagelse kunne være blevet startskudet til en ny opfattelse af universet men det blev den ikke. Konklusionen af opdagelsen var, at spiraltåger ikke kun bestod af gas eller støv men også indeholdt stjerner. Stjernerne i spiraltågerne var så svage, at de ikke kunne skelnes enkeltvis, der var to mulige forklaringer på dette; enten var det en ny slags stjerne, ikke før set i Mælkevejen eller også lå spiraltågerne meget langt væk. Længere væk end den grænse universet havde i følge Kapteyns model. Denne konklusion var Faths chef ikke meget for [102], hvilket kunne være grunden til at Fath i publiceringen af sine resultater selv forslog, at en bestemmelse af afstanden til spiraltågen (ved parallakse) ville kunne be- eller afkræfte hans teori. Fath var helt klart forud for sin tid ved at betragte spiraltåger med spektroskopi.

I 1908 kom en ny metode til afstandsbestemmelse. Fundet af variable stjerner, cepheider, i de Magellanske skyer (jvf. afsnit 2.1.3) ledte til opdagelsen af relationen mellem cepheiders periode og luminositet. Som tidligere nævnt kunne en kalibrering af denne relation bruges til at bestemme afstanden til enhver cepheide. Det var ikke lige til at kalibrere relationen, men det blev gjort, og dermed fik den en afgørende betydning for opfattelsen af universet. Godt nok var cepheider kendt af astronomer, men at der fandtes flere forskellige slags cepheider var astronomerne ikke klar over. Denne fejl blev ikke opdaget før en gang i 1950 længe efter erkendelsen af universets udvidelse og dermed uden betydning for opfattelsen af universet i perioden 1900-1930.

Shapley var den første, der vha. en kalibrering af relationen mellem cepheiders periode og deres luminositet ændrede på modellen af universet (jvf. afsnit 2.1.8). Shapley var af den overbevisning, at alt der kunne observeres på himlen lå indenfor Mælkevejens grænser. Da han så fandt cepheider i afstande, der lå udenfor Mælkevejens grænser (ifølge Kapteyns model jvf. afsnit 2.1.1) opstillede Shapley en model af Mælkevejen, der viste, at den var ca. 10 gange større end Kapteyns univers. Hans model viste, at universet var kugleformet og ikke aflangt som

Kapteyns model. Før Shapley fremsatte sin model, havde han sikkert været tilhænger af den struktur, universet havde ifølge Kapteyns model. Da han så observerede cepheider udenfor Mælkevejens grænser, måtte han tage stilling til, om universet var større end Mælkevejen, eller om Mælkevejen reelt var større end den gængse model. Han valgte den sidste løsning.

At han valgte at udvide Mælkevejen i stedet for at udvide universet kunne skyldes, at han ikke havde kendskab til observationer, der kunne understøtte en teori om et univers større end Mælkevejen. En grund til at Shapleys model ikke blev accepteret kunne være, at der ikke var observeret cepheider på grænsen af Shapleys univers, der var derfor ingen beviser for, at grænsen lå så fjernt (jvf. afsnit 2.1.8). En anden grund kunne være, at astronomer mere eller mindre havde accepteret en anden model af universet nemlig \emptyset -univers teorien (jvf. afsnit 2.1.7). Selv om astronomer ikke kendte spiraltågers natur, var der meget, der talte for, at disse tåger var fjerne stjernesystemer. Der var bla. fundet novaer i flere spiraltåger, de havde en stor rotationshastighed, og da der var fundet så mange, kunne deres roterende bevægelse ikke længere forklares med, at en stjerne skulle have passeret en gas- eller støvsky. Det eneste, der manglede var en afstand til spiraltågerne. En sådan afstand ville have kunne afgjort, om teorien overhoved var mulig. Fortaleren for denne teori var Curtis (jvf. afsnit 2.1.7), det er muligt at han havde kendskab til Faths observationer da de begge havde tilknytning til Lick observatoriet. Curtis nævner dog så vidt vides ikke Fath på noget tidspunkt. Faths observationer kunne ellers have understøttet \emptyset -univers teorien, i og med de viste, at spiraltåger også indeholdt stjerner. Den vigtigste observation manglede dog stadigvæk; afstanden til spiraltågerne.

Curtis havde en ide om, hvor langt væk spiraltågerne lå efter fundet af novaer i tågerne. Som nævnt i afsnit 2.1.7 sammenlignede Curtis novaer fra Mælkevejen med novaer fundet i spiraltågerne. Dette var ikke bevis nok, muligvis fordi kendskabet til novaer ikke var særligt stort, f. eks. modargumenterede Shapley ved at nævne en anden nova fundet i Andromedatågen i 1800-tallet. Denne novas lysstyrke indikerede, at Andromedatågen ikke lå så langt væk, som de sidst fundne novaer antydede.

I dag ved vi, at novaen opdaget i 1800-tallet var en supernova og derfor ikke kan sammenlignes med de novaer bl. a. Ritchy fandt. Det altafgørende var at finde en metode til at bestemme afstanden til spiraltågerne. En metode til at bestemme afstanden til spiraltågerne fandt Hubble da

han observerede cepheider i bl. a. Andromedatågen. Ved at benytte den kalibrering af cepheiders periode-luminositets relation Shapley havde foretaget kunne Hubble bestemme afstanden til bl.a. Andromedatågen (jvf. afsnit 2.1.12).

Hubbles observation viste, at universet var meget større end nogen astronom havde forestillet sig. I forbindelse med Hubbles opdagelse af de enorme afstande kom det ikke på tale at udvide Mælkevejen, som Shapley havde gjort. Der var ingen tvivl hos astronomerne, spiraltågerne måtte ligge udenfor Mælkevejen. Afstandsmålingsmetoden Hubble benyttede var ikke ukendt for astronomer, selv om Shapleys model af universet ikke blev accepteret, kunne metoden godt accepteres. Dette skyldes måske, at modstandere af \emptyset -univers teorien (tilhængere af Shapleys model) ikke kunne argumentere mod Hubbles afstandsmålingsmetode, da Shapley havde benyttet samme metode til at udregne størrelsen af Mælkevejen. Tilhængere af spiraltåger som \emptyset -universer havde endelig, ved fundet af cepheiderne, fået bevis for, at spiraltåger indeholdt stjerner, og at de var meget fjerne. Universet havde ændret struktur, det var blevet meget større end Mælkevejen. Indholdet af universet havde også ændret sig fra kun at indeholde stjerner til også at indeholde andre galakser af samme slags som Mælkevejen.

I forhold til logisk empirisme kan man sige, at udviklingen af opfattelsen af universet i perioden 1900-1930 starter med sandheden om universets struktur (jvf. Kapteyns univers). Før denne sandhed kan ændres må der findes en ny metode til at bestemme afstande. Denne metode finder Leavitt, da hun observerer cepheider og opdager relationen mellem cepheidernes periode og luminositet. Denne viden om cepheiderne bygger Shapley videre på ved at kalibrere relationen og derved udregner afstanden til nogle, af ham observerede, cepheider. På trods af den nye afstandsmålingsmetode ændrer Shapleys observationer og resultater ikke ved sandheden om universets struktur. Hans resultater og syn på universet er dog en del af debatten om, hvad universet er, og hvor stort det er. Shapleys metode til at afstandsbestemme bliver desuden brugt, da afstanden til cepheider afgør, at universet er større end Mælkevejen. Det er Hubbles observationer af cepheider, der medfører, at opfattelsen af universets struktur ændres. Cepheiderne i spiraltåger viser, at disse ligger langt udenfor Mælkevejen. Denne nye viden om spiraltågerne fører til, at astronomerne anerkender dem som værende fjerne galakser, og at universet er meget større end Mælkevejen. En ny sandhed om universet.

5.1.2 Hastighedsmåling

En af de vigtigste opdagelser, der blev gjort i starten af 1900-tallet, var opdagelsen af spiraltågers radiale hastigheder og deres rotation. Endnu før en teknik til at afstandsbestemme spiraltågerne var fundet, kunne spiraltågers radiale hastigheder udregnes. Slipher var den første, der udregnede spiraltågers radiale hastigheder omkring 1912 (jvf. afsnit 2.1.6). Han opdagede Doppler effekt i bl. a. Andromedatågen. Ud fra Doppler effekten kunne den radiale hastighed af objektet, hvori effekten var fundet, udregnes. At den radiale hastighed kunne bestemmes ved hjælp af Doppler effekten var ikke en ny og ukendt metode for astronomerne. At spiraltågerne havde en stor radial hastighed fik mange astronomer til at tro, at disse tåger ikke kunne være en del af Mælkevejen. Slipher var selv overbevist om, at den enorme radiale hastighed indikerede en stor afstand til spiraltågerne [18]. Da der på det tidspunkt ikke var fundet en relation mellem radial hastighed og afstand, kunne Sliphers resultater ikke bruges til at bestemme afstanden til spiraltågerne. På trods af den manglende afstand overbeviste Sliphers resultater en del astronomer om ϕ -univers teorien.

Først med Hubble i 1929 findes relationen, hvorved afstanden til spiraltågerne kunne udregnes ved at kende Doppler effekten for objektet. Relationen var en observation mellem spiraltågers Doppler effekt og deres magnitude. Hubble troede ikke helt på Dopplers fortolkning af rødforskydningen, at det var en hastighed. Hubble mente ikke det kunne være så simpelt, og at der var andre fortolkningsmuligheder, f. eks. at tabet af energi i udstrålingen kunne ske på lysets lange vej gennem rummet. Hubbles tvivl af Dopplers fortolkning af rødforskydning lå så sent som i 1931, hvor teorien om universets udvidelse var blevet fremsat. Hubbles tvivl kom modstanderne af teorien om universets udvidelse til gode. Det lykkedes ikke for Hubble at finde bevis for, hvilken fortolkning, der var den rigtige. Men han mente, at en konklusion burde vente, til der var fundet beviser på, hvilken betydning rødforskydning egentlig havde. Disse beviser skulle i følge Hubble komme fra observationer [33].

Udover at finde spiraltågers radiale hastighed efterviste Slipher spiraltågers rotation i 1914 [19]. Denne opdagelse vakte større opmærksomhed end hans fund af spiraltågers radiale hastig i sin tid gjorde. Det, at spiraltåger roterede, indikerede muligheden for at finde egenbevægelse i spiraltåger. Kunne egenbevægelsen findes havde astronomerne et redskab til at udregne afstanden. En metode til at bestemme afstande,

der blev brugt til at lave den gængse model over universet (jvf. afsnit 2.1.1). Spiraltågers form, der før blev forklaret ved, at en stjerne skulle have passeret forbi, blev ved opdagelsen af rotation forkastet. Curtis, fortalere for \emptyset -univers teorien mente endda, at lykkedes det ikke at eftervise rotation i en spiraltåge måtte det være fordi tågen var enorm. Dermed måtte spiraltågen også ligge udenfor Mælkevejen [20]. Adriaan van Maanen efterviste omkring 1916 rotation i spiraltåger. Han opdagede rotation ved at sammenligne gamle fotoplader med nye og ikke som Slipher, der brugte spektroskopi. Van Maanen fik da også et helt andet resultat, der gjorde, at han efterhånden blev modstander af \emptyset -univers teorien. Hans resultater viste, at spiraltågerne havde så stor en rotation, at de ikke kunne ligge udenfor Mælkevejen.

Observationene af spiraltågers radiale hastighed er et tydeligt eksempel på logisk empirisme. Slipher observerer Dobbler effekten i spiraltågers spektre, derudfra udregner han tågenes radiale hastighed. Denne viden om spiraltågerne bliver generaliseret ved flere observationer af flere spiraltåger. Viden om spiraltågers radiale hastighed bliver sandheden i følge logisk empirisme. Denne viden bygger Hubble oven på, da han finder relationen mellem spiraltågers hastighed og deres afstande. Denne viden bliver igen generaliseret ved flere observationer af spiraltågers afstande og deres hastigheder. Denne viden bliver i følge logisk empirisme sandheden, denne sandhed er med til bane vejen for erkendelsen af universets udvidelse. Som det ses af ovenstående afsnit var der observationer, der var forkerte, men blev brugt til at underbygge en anden model for universet (jvf. van Maanens indflydelse på Shapleys univers afsnit 2.1.10) end den astronomerne ender med at erkende.

5.1.3 Virkeligheden $\langle \rangle$ logisk empirisme

Det er tydeligt, at observationsforløbet ikke følger logisk empirisme fuldstændigt, observationer bliver ikke brugt eller brugt forkert. Et eksempel på det første er Faths observationer, der viser, at spiraltåger indeholder andet end gas og støv. Hans observationer bliver ikke fuldt op af andre astronomer, hvorved de ikke fører til en generel viden om spiraltågerne. Slipher observerer som den første spiraltågers rotation, van Maanen finder også tågenes rotation. De to astronomer bruger hver sin metode til at finde denne rotation og fik forskellige resultater. Begge resultater bruges i debatten om universets struktur, men fører ikke til yderligere viden om spiraltågerne. Hubbles observation af cepheider i spiraltåger er et eksempel på logisk empirisme, observationen

medførte nemlig en generalisering af, hvad spiraltåger er. Denne generalisering fører til erkendelsen af, at universet er mere end Mælkevejen. Et andet eksempel, der bryder med logisk empirisme, er Hubbles observationer af spiraltågers hastigheder og hans opdagelse af relationen mellem tågernes hastigheder og deres afstande. Denne opdagelse fører til erkendelsen af universets udvidelse. Denne erkendelse opstår dog ikke alene på grund af opdagelsen af relationen mellem hastigheder og afstande. Relationen gør, at de eksisterende teorier om universet ikke længere kan forklare universets struktur. Erkendelsen af universets udvidelse opstod ikke før teorien, der forklarede observationerne var anerkendt. Logisk empirisme tager ikke højde for, om der eksisterer teorier om universet, og som det kan ses, kunne erkendelsen af universets udvidelse ikke opstå alene ud fra observationer.

5.2 Teorierne

I dette afsnit vil vi beskæftige os med de forskellige relativistiske kosmologier, der er refereret i kapitel 3. Nogle af de spørgsmål vi vil beskæftige os er:

- Hvilken betydning havde de forskellige teorier for samtidens opfattelse af universet?
- Hvilken betydning havde de forskellige observationer på udviklingen af teorierne?
- Hvilke motiver havde de forskellige forskere for at opstille deres teorier?

I analysen af forløbet vil vi inddrage Poppers falsifikationsteori (jvf. afsnit 4.1.1) for at se, om forløbet stemmer overens med denne. Til sidst i dette afsnit vil vi bruge den engelske astronom Arthur S. Eddington og hans holdning til universets struktur som eksempel på den herskende opfattelse.

5.2.1 Einsteins tilknytning til Machs princip

Efter Einstein havde fremsat sin generelle relativitetsteori i 1915, var det meget naturligt, at han et par år senere ville se, hvilke anvendelsesmuligheder den havde. Hvad var mere nærliggende end at opstille en kosmologi — en teori for hele universet.

Einstein startede med at gøre to antagelser om universet (jvf. afsnit 3.2.1); universet er statisk og alt stof i universet er jævnt fordelt. Denne forestilling opretholder han hele vejen igennem sin artikel, og han er derfor nød til at modificere sine ligninger, da matematikken giver et andet resultat end det ønskede. Einstein må indføre den kosmologiske konstant λ i feltligningerne for at "...making possible a quasi-static distribution of matter, as required by the fact of the small velocities of the stars" [53]. Dvs. at λ gør det ud for en kraft, der modvirker ekspansionen af universet.

Det er således tydeligt, at Einstein i dette tilfælde tror mere på sin egen forestilling om, hvordan universet må opføre sig, end den opførelse der kommer ud af matematikken. Han er således villig til at gå på kompromis med sin egen nyudviklede relativitetsteori, hvor en af de fornemmeste egenskaber ved relativitetsteorien er, at den ikke inddrager nye konstanter "Einstein ... [had a] ... desire to devise a theory exclusive of arbitrary constants that would be dependent upon empirical determination" [25]. En af grundene til Einsteins fastholden af det statiske univers kunne være, at han er overbevist om, at Machs princip er grundlæggende for inertis relativitet [112]. En måde at udtrykke Machs lov om inertie er: "A system on which no forces act is either at rest or in uniform motion relative to ... the fixed stars idealized as a rigid system" [113]. Einstein skriver således selv om inertie: "In a consistent theory of relativity there can be no inertia *relatively to* "space", but only an inertia of masses *relatively to one another*" (Einsteins kursivering) [49]. Da fixstjernerne har så stor betydning for Einsteins opfattelse af inertie, er det måske ikke så svært at forstå, at Einstein havde umådelig svært ved at acceptere, at universet skulle kunne udvide sig. I den forbindelse er det værd at bemærke, at Einstein blev mindre og mindre tilhænger af Machs princip i de senere år af sit liv. I 1954 skrev han således "Von dem Mach'schen Prinzip sollte man eigentlich überhaupt nicht mehr sprechen" i et brev til F. Pirani [115].

Einstein runder sin artikel af med nogle betragtninger omkring teoriens holdbarhed i forhold til f. eks. tyngdekraft (jvf. afsnit 3.2.4). I den forbindelse siger han eksplicit, at han ikke vil forsøge at forene sin teori med aktuel astronomisk viden. Det er derfor klart, at han som udgangspunkt har et ønske om at beskrive universet på en matematisk enkel og konsistent måde.

Det er også væsentligt for diskussionen, at Einstein i hvert fald på tidspunktet for fremsættelsen af sin kosmologi anså Mælkevejen som universet: "...in Einstein's work of 1917 the universe was still believed

to be identical with our own galactic system, the Milky Way" [83], og han har næppe heller kendt ret meget til nogle af de observationer, der fortæller om store hastigheder for spiraltåger. Han har således ikke ret meget andet end den generelle relativitetsteori og sine egne antagelser at bygge sin kosmologi op omkring. Men det er slående, at Einstein op gennem 20'erne fastholder forestillingen om det statiske univers på trods af, at indtil flere uafhængige teorier (konsistente med Einstein øvrige forestillinger) muliggør, at universet kan udvide sig samtidig med, at flere og flere observationer konfirmerer, at universet består af meget mere end Mælkevejen, og dette meget mere bevæger sig med store hastigheder. Dette vil vi diskutere yderligere i de følgende afsnit.

Sammenfattende og i forhold til Poppers falsifikationsteori kan man sige, at Einstein ud fra den generelle relativitetsteori prøver at opstille en teori for universets struktur, men da han ved hjælp af matematikken når frem til, at universet må udvide sig, tror han ikke på fysikken i det, han indfører derfor en konstant til at modvirke ekspansionen (jvf. afsnit 3.2.3). Man kan således ud fra Poppers falsifikationsteori sige, at Einstein ikke troede på universets udvidelse, men istedet prøver at fremsætte en teori, der stemmer bedre overens med hans verdensbillede. Einstein var ikke interesseret i, hvorvidt hans teori var falsificerbar, hvilket han skriver direkte (jvf. afsnit 3.2.4). Men teorien er dog falsificerbar; "a static or stationary unchanging universe . . . can be tested by number counts of galaxies" [57]. Både Einsteins og de Sitters (se nedenfor) modeller viser sig dog hver især at kunne forklare nogle observationer, mens de modsiges af andre.

5.2.2 De Sitter bryder med relativitetsånden og Machs princip

Der er ikke gået meget mere end et halvt år, siden Einsteins teori kom frem, før de Sitter kommer med sit bud på et univers, der er konsistent med feltligningerne. De Sitter er astronom, og hans udgangspunkt er derfor et andet end Einsteins. I modsætning til Einstein prøver han da også at relatere sin teori til faktiske observationer, selvom hans materiale er meget begrænset (jvf. afsnit 3.3.4).

Men selvom de Sitters teori er konsistent med feltligningerne, har den alligevel en masse konsekvenser i forhold til relativitetsteorien. Han starter f. eks. sin artikel med, at gå imod det han kalder det materielle postulat om inertis relativitet (jvf. afsnit 3.3.1), hvilket dækker over

Machs princip. Derudover har teorien også som konsekvens, at der indføres et centrum i universet, hvilket afstedkommer, at partikler vil opføre sig forskelligt alt efter, hvor i universet de befinder sig. Dette er helt sikkert i modstrid med 'relativitetsånden', ifølge hvilken alle love er universelle, og partikler skal således opføre sig ens uanset, hvor i universet de befinder sig. Dette er bl. a. Lemaîtres motivation for at fremsætte sin teori om universet, hvilket vi kommer ind på i et senere afsnit.

At der fandtes en konsistent løsning til feltligningerne, der medførte at universet er masseløst må have været en stor skuffelse for Einstein, i hvert tilfælde skriver A. Pais i sin Einstein-biografi "Einstein never said so explicitly, but it is reasonable to assume that he had in mind that the correct equations should have no solutions at all in the absence of matter. ... Thus the cosmological term $\lambda g_{\mu\nu}$ does not prevent the occurrence of 'inertia relative to space' " [114].

En anden konsekvens af de Sitters teori er, at der forekommer rødforskydning i lysspektraet målt fra fjerne objekter som følge af, at atomvibrationer sløves over store afstande, eller populært sagt, at lyset bliver træt (jvf. afsnit 3.3.4). Det er nok denne egenskab ved de Sitters teori, der i slutningen af 20'erne gør, at de fleste astronomer er tilbøjelige til at foretrække de Sitters løsning fremfor Einsteins, da der jo observeres rødforskydning.

De Sitter havde, da han fremsatte sin teori, en ide om, at universet var mere end Mælkevejen (jvf. citat i afsnit 3.3.4). Men han havde angiveligt heller ingen observationer af betydning, selvom Sliphers data på dette tidspunkt havde været publiceret i nogle år; "Slipher's list of 13 velocities, although published in 1914, had not reached de Sitter, probably as a result of the disruption of communications during the war" [79]. I hvert tilfælde er de resultater, de Sitter når frem til i sin artikel baseret på kun tre målinger (jvf. afsnit 3.3.4).

De Sitter ved, at der er observeret rødforskydning af spiraltåger og har en formodning om, at spiraltågerne er fjerne galakser (jvf. afsnit 3.3.4), og vil gerne have inkorporeret disse observationelle fakta ind i en model af universets struktur. I modsætning til Einstein tager de Sitter højde for disse observationer, men når til gengæld frem til, at universet må være masseløst (jvf. afsnit 3.3.2). De Sitter prøver således at tage højde for de observationelle fakta, han ved eksisterer, men når alligevel frem til noget, der ikke er i overensstemmelse med den gængse opfattelse af universets struktur (masseløst, bryder med relativitetsånden). Man kan sige at de Sitters teori er dristig, i og med de ovenstående brud med den

gængse opfattelse, men da den ret hurtigt kan falsificeres, bringer den ifølge Poppers falsifikationsteori ikke så meget nyt. De Sitters teori kan bl. a. falsificeres ved at se om de observerede rødforskydninger passer med teorien, hvilket flere senere prøver (dette kommer vi ind på i et senere afsnit). Ifølge Poppers falsifikationsteori er der altså på dette tidspunkt ikke nogen teorier, der kan forklare universets struktur.

5.2.3 Friedmanns matematik

Med fremkomsten af Friedmanns artikel i 1922 er der for første gang fremsat en kosmologi, der konkluderer, at universet er ikke-statisk (jvf. afsnit 3.4.2). Friedmann bygger sin teori op omkring den generelle relativitetsteori og de samme antagelser som Einstein — undtagen selvfølgelig at universet skal være statisk. Udelukkende ved hjælp af matematiske argumenter, når han herefter frem til konklusionen om universets udvidelse.

Det er sandsynligt, at Friedmann har fundet indførslen af λ besynderlig, og at dette har fået ham til at undersøge, hvor langt man kan komme rent matematisk med feltligningerne uden λ . I hvert tilfælde forholder han sig ikke synderligt, til de fysiske konklusioner han slynger ud; "The time since the creation of the Universe is the time that has elapsed from the moment when space was a point ($R = 0$) to the present state ($R = R_0$): this term may also be infinite" [69] skriver han f. eks. i en fodnote uden at kommentere det yderligere.

Denne manglende fysiske indfaldsvinkel på problemstillingen kunne være en af årsagerne til, at Friedmanns artikel bliver ignoreret. For artiklen blev trykt i et af de meget ansete fysiske tidsskrifter; *Zeitschrift für Physik*, hvilket betyder, at mange astronomer må have set artiklen og givetvist også læst den. Einstein kritiserede endog matematikken i artiklen [54], men fandt senere ud af, at det var ham selv der tog fejl og trak kritikken tilbage [55]. I udkastet til den senere artikel skal han have skrevet: "[Friedmann's paper] while mathematically correct is of no physical significance" [59]. Det er således tydeligt, at Einstein stadig ikke på dette tidspunkt tillægger det ekspanderende univers nogen betydning. Heller ikke resten af forskersamfundet er synderligt interesseret i Friedmanns teori, hans artikel bliver kun citeret 5 gange indtil 1930 [90].

Heller ikke i afrundingen af sin artikel, bliver Friedmann særlig fysisk, han nøjes med at angive nogle discipliner, inden for hvilke problem-

stillingen omkring universet muligvis kan afklares. Han skriver med hensyn til observationer: "Our information is completely insufficient to carry out numerical calculations and to distinguish which world our universe is" [68], og på denne måde kommer han uden om at lave en kobling mellem sin teori og observationer.

Med hensyn til Friedmanns teori kan man for alvor tale om en dristig teori. Her er en teori, der vender op og ned på alt det man tror om strukturen af universet. Friedmann når som bekendt frem til at universet må udvide sig, som følge af matematiske manipulationer af feltligningerne for den generelle relativitetsteori. Men i forhold til Poppers falsifikationsteori har Friedmanns teori det problem, at den ikke kan falsificeres, idet den er matematisk i sit udgangspunkt og ikke angiver, hvilke konsekvenser den har for det observerbare univers. Det er nok også på den baggrund man skal se det faktum, at Friedmanns teori negligeres, idet der for andre forskere ikke er andet at forholde sig til end, at universet skulle udvide sig. Det er denne udvidelse som bl. a. Einstein ikke kan acceptere (jvf. hans kritik af artiklen) uden at have observationelle fakta til at understøtte den.

5.2.4 Lemaître's fysik

I 1927, hvor Lemaître's artikel kom, havde verdensbilledet ændret sig betydeligt. Man havde fastslået, at der var andre galakser end Mælkevejen, og at disse galakser bevægede sig (jvf. afsnit 5.1). Alligevel vakte Lemaître's arbejde ikke genklang hos hverken teoretikere eller astronomer.

Allerede i en artikel fra 1925 [94] var Lemaître på sporet af universets udvidelse, han tror ikke på konsekvenserne af de Sitters teori og prøver derfor at lave en anden opdeling af tid og rum, end den de Sitter bruger i sin teori. Det medfører, at universet bliver ikke-statisk, men også uden krumning, hvilket Lemaître er stærkt utilfreds med, hvorfor han ikke drager konklusionen om universets udvidelse explicit [86]. At han er på sporet kan ses af følgende citat: "Our treatment evidences this non-statistical character of de Sitter's world which gives a possible interpretation of the main receding motion of spiral nebulae" [95].

Lemaître når i sin 1927-artikel frem til de samme matematiske konklusioner som Friedmann, men derudover regner han sig også frem til den rødforskydning, der vil kunne observeres som konsekvens af universets udvidelse (jvf. afsnit 3.5.4). Man skulle derfor tro, at Lemaître's artikel

lige var noget for astronomer, der her havde en teori for, hvordan den rødforskydning, man observerede, skulle opføre sig. Men sandheden er, at artiklen blev ignoreret endog endnu mere end Friedmanns, ja faktisk skulle artiklen overhovedet ikke være citeret indtil 1930 [89].

Det er temmelig mærkeligt, at der ikke er mere opmærksomhed omkring Lemaîtres artikel, godt nok publiceres den i et ikke særlig anset belgisk tidsskrift, men Lemaître har kontakt til mange af de store kanoner indenfor astronomien; han er uddannet delvist i Cambridge hos Eddington, han har skrevet sin Ph. D. på MIT, og i den periode havde han også kontakt til Harvard College Observatory, hvor Shapley arbejdede [84]. Efter offentliggørelsen af Hubbles observationer i januar 1925 rejste Lemaître rundt i USA til bl. a. Slipher og Hubble for at få informationer om de nyeste observationer. Lemaître havde nemlig indset, at med de nye observationer kunne hverken Einsteins eller de Sitters teorier længere forklare universets struktur [85]. Lemaître har således været i kontakt med mange af de betydende folk indenfor astronomien, og det er mærkeligt, at ingen af dem reagerer på hans artikel. En af de få reaktioner kom fra Einstein, der under en kongres diskuterede Lemaîtres ideer med ham, hvor han dels gjorde opmærksom på Friedmanns artikel, dels sagde at matematikken havde han intet imod, men han troede ikke på det fysiske [89].

Efter at den store debat er blevet afgjort med erkendelsen af, at der er andre galakser end Mælkevejen udenfor denne, hvilket er sket med Hubbles opdagelse af cepheider i meget fjerne spiraltåger (jvf. afsnit 2.1.12), er der grobund for at tænke andre tanker om universets struktur end, at det skulle være statisk. Lemaître er en af de få, der allerede i 1925 indså dette. Lemaître regner sig herefter frem til universets udvidelse ud fra den generelle relativitetsteoris feltligninger og angiver samtidig, hvilke konsekvenser det har for umiddelbart observerbare fænomener. Han opstiller således en rødforskydningsrelation, der kan falsificeres ved at sammenstille den med observerede rødforskydninger. Lemaîtres teori skulle altså ifølge Poppers falsifikationsteori være fremsat i overensstemmelse med alle forskrifter for, hvordan man dyrker videnskab. Problemet med udbredelsen af Lemaîtres teori skal derfor nok ses i lyset af, at han dels publicerede i et ukendt tidsskrift og dels i, at han ikke udbredte sin teori til alle sine kontakter indenfor astronomien. Endelig skal man nok ikke negligere betydningen af, at de fleste andre stadig havde problemer med at acceptere, at universet skulle udvide sig uden, at det var understøttet af observationer.

5.2.5 Eddington som udtryk for tidsånden

Den engelske astronom Arthur S. Eddington fra Cambridge universitetet, var en af autoriteterne indenfor astronomien, bl. a. var det ham der ledede den ekspedition, der observerede lysets afbøjning under en solformørkelse, som var en af de ting, Einsteins generelle relativitetsteori forudsagde. Eddington var derfor i en position, hvor han kunne blande sig i debatten om universets struktur, og hans mening blev hørt. Det er derfor interessant, at følge Eddingtons udsagn i debatten, da de kan tages som en slags udtryk for tidsånden, altså de tanker som blev diskuteret omkring de forskellige teorier.

Udsagnene om Eddingtons stillingtagen, i årene umiddelbart efter Einstein og de Sitter havde fremsat deres teorier, er få, men der er dog en enkelt reference, ifølge hvilken han i et brev (1918) skal have udtrykt sin sympati for de Sitters teori [62]. I de følgende år skifter han imidlertid standpunkt, hvilket kommer til udtryk i hans bog fra 1923 [40], da Einsteins teori svarer bedre til hans egne synspunkter [84], men han har dog stadig et godt øje til de Sitter teoriens evne til at forklare rødforskydning (jvf. citat s. 6). I en senere bog fra 1928 [41] gør Eddington stadig brug af begreber fra både Einsteins og de Sitters teorier. Han skriver således om rum: "... space is finite — finite though unbounded" [42], hvilket svarer til Einsteins univers, og om lys: "... light which has travelled an appreciable part of the way "round the world" is slowed down in its vibrations, with the result that all the spectral lines are displaced towards the red" [42], hvilket er de Sitter teoriens forklaring af rødforskydning.

Af Eddingtons forskellige udsagn kan man uddrage, at allerede i løbet af 20'erne kunne man se, at begge teorier havde stærke sider, der kunne forklare nogle af de observerede fænomener, men man kom alligevel ikke frem til konklusionen om universets udvidelse før i 1930, efter offentliggørelsen af Hubbles observationer om sammenhængen mellem hastighed og afstand. I denne sammenhæng skal det lige nævnes, at de fleste astronomer i modsætning til Eddington hældede mest til de Sitters teori.

Det var faktisk Eddington, der blev årsag til, at Lemaitres teori kom til ære og værdighed. Under et møde i Royal Astronomical Society i januar 1930 sagde Eddington: "de Sitter propounded the dilemma that the actual universe apparently contained enough matter to make it an Einstein world and enough motion to make it a de Sitter world. This naturally called attention to the need for intermediate solutions"

[45]. Efter at Lemaître havde hørt dette, sendte han en kopi af sin artikel til Eddington, der hurtigt sørgede for at den blev oversat og bragt i et af de førende astronomiske tidskrifter [96]. Eddington udgiver omkring samme tidspunkt en artikel, hvori han påviser, at Einsteins teori medfører, at universet er ustabil [43]. Disse begivenheder leder til, at de fleste astronomer bliver overbevist om, at universet udvider sig.

5.2.6 Virkelighed <> Popper

Var det, der skete indenfor teoriudviklingen i overensstemmelse med Poppers falsifikationsteori?

Nej, det var det tydeligvis ikke. Einsteins og de Sitters teorier var falsificerede faktisk allerede ved deres fremkomst. Alligevel blev de betragtet som de to mulige modeller for universets struktur. Friedmanns teori blev fremsat uden tanke for, om den kunne falsificeres. Lemaîtres teori, der blev fremsat i overensstemmelse med Poppers ideer, om hvordan videnskab drives, blev ignoreret. Men der, hvor virkeligheden adskiller sig afgørende fra Poppers falsifikationsteori, er på observationsområdet. Falsifikationsteorien tager overhovedet ikke højde for, at der kan gøres observationer uafhængigt af teorifremsættelse, og at disse observationer kan have afgørende indflydelse på teoridannelsen (og havde det i forbindelse med erkendelsen af universets udvidelse).

5.3 Forsøg på at finde en relation mellem observation og teori

I det følgende afsnit vil vi betragte fire astronomer og deres arbejde og resultater. Tre af dem (G. F. Paddock, Carl W. Wirtz og Ludvik Silberstein) fandt uafhængigt af hinanden frem til at universet udvider sig. Mens Ernst Öpik arbejdede på at finde en metode til at bestemme afstanden til spiraltågerne. Paddocks, Wirtzes og Öpiks opdagelser fik ingen betydning for deres samtid, da deres resultater forblev ubemærket. Silbersteins resultater blev bemærket, men hans resultater fik en ikke positiv virkning på samtiden. Alle fire astronomer benyttede eksisterende observationer i stedet for egne.

Det interessante ved disse fire astronomer er ikke kun, at deres opdagelser kunne have haft en positiv betydning eller havde en negativ

betydning for erkendelsesforløbet, men også at de ikke følger en af de to videnskabsteorier. Da de således ikke er dækket af videnskabsteorierne, har vi valgt at lægge analysen af deres betydning i forlængelse af resten af kapitlet.

5.3.1 Paddock

Paddock interesserede sig i 1916 for spiraltågers radiale hastigheder, som tidligere nævnt opdaget af Slipher (jvf. afsnit 2.1.6). Paddock benytter da også bl. a. Sliphers data i stedet for egne observationer. Det centrale spørgsmål i Paddocks artikel var: Er spiraltåger adskilt fra Mælkevejen? At han endte med at ville besvare dette spørgsmål skyldes, at data viste, at den gennemsnitlige radiale hastighed for andre objekter end spiraltåger var omkring 25 km/s . Den gennemsnitlige radiale hastighed for spiraltåger var på 400 km/s . Resultatet af hans undersøgelser viste, at spiraltåger ikke bare bevægede sig i forhold til observatøren eller stjernesystemet men også i forhold til hinanden. Sliphers data havde vist, at de fleste spiraltåger bevægede sig væk fra Solen, bevægede de sig så også væk fra hinanden måtte konklusionen være, at universet udvidede sig [111]. Han havde ud fra eksisterende data opdaget noget stort og revolutionerende. På trods af at han publicerede sine resultater i et kendt astronomisk tidsskrift (Publications of the Astronomical Society of the Pacific), forblev hans opdagelse ubemærket. Måske skyldes det, at han ikke selv troede på resultatet men mente det byggede på utilstrækkelig data. Paddock arbejdede som Campbells assistent, da han publicerede sine resultater. Vi nævner tidligere Campbell i forbindelse med Fath (jvf. afsnit 2.1.4). Ud fra den situation ses det, at Campbell var den type leder, der ikke ønskede, at nogen fra hans observatorie skulle publicere noget, der senere kunne vise sig at være forkert [107]. Det er højst sandsynligt, at Paddock havde vist Campbell sine resultater, og det er muligt, at Campbell skabte tvivl hos Paddock.

5.3.2 Wirtz

Den tyske astronom Carl W. Wirtz publicerede i 1918 så at sige de samme resultater som Paddock. Datamaterialet var mere eller mindre det samme, så Wirtz dublikerer Paddocks resultater. Om han kendte til Paddocks undersøgelser og resultater ved vi ikke, men Wirtz nævnte ikke Paddock en eneste gang. Da dette var midt i 1. verdenskrig er

det sandsynligt, at Wirtz ikke havde adgang til amerikansk litteratur og Paddock publicerede i et amerikansk astronomi tidsskrift. En stor forskel på de to astronomer var, at Wirtz i modsætningen til Paddock troede på sit resultat. Han mente også, at der måtte mere datamateriale til, ikke for at modbevise resultatet men derimod til at underbygge det. Han undersøgte, om den radiale hastighedsterm måske var en funktion af afstanden [29], men da afstande ikke var kendt på dette tidspunkt prøvede han at kæde termen med den tilsyneladende diameter uden succes. Han var inspireret af de Sitters teori, der indikerede en systematisk rødforskydning af spektrallinierne for fjerne spiraltåger.

5.3.3 Öpik

I sin artikel fra 1922 udregner Ernst Öpik afstanden til Andromedatågen (jvf. afsnit 2.1.11). Der var på dette tidspunkt ingen konkret metode til at bestemme afstanden til spiraltågerne. Öpik benyttede som de to ovenstående astronomer heller ikke egne observationer. I sin artikel henviste han til, at princippet han benyttede var det samme, som bl. a. Campbell havde brugt til at estimere minimummassen af planetare tåger. Öpik havde opdaget en metode til at udregne afstanden til spiraltågerne ved hjælp af et kendt princip og eksisterende datamateriale. Denne opdagelse burde have vakt stor opmærksomhed, her var svaret på et af de største problemer i datidens astronomiske kredse. Öpik publicerede sit resultat i et kendt amerikansk astronomisk tidsskrift (*Astrophysical journal*). På trods af det modtog hans udregninger eller hans brug af et kendt princip, hverken kritik eller anden opmærksomhed. Öpik gjorde opmærksom på, at hans metode til at bestemme afstande til tågerne ikke afhang af, hvad tågerne bestod af. Dette var måske en grund til at hans resultater ikke fik betydning for samtiden. Det var måske svært at forestille sig så fjerne objekter uden at vide, hvad de var. Han havde måske ikke kontakt til de astronomer, der ville være interesseret i afstanden til spiraltågen som f. eks. Curtis. Curtis kunne have brugt denne afstand til at bevise, at spiraltåger var fjernliggende, hvad de så end bestod af.

5.3.4 Silberstein

Silberstein prøvede i 1925 at verificere den relation de Sitter forudsiger mellem hastighed og afstand. Han opstillede en teori, der forklarede rødforskydning-afstands relationen. I følge Silberstein byggede formelen

på observationer af kugleformede stjernehober. Få astronomer var overbevist om rigtigheden af formlen og efter en nærmere gennemgang, af det datamateriale Silberstein havde brugt, blev den afvist. Silberstein blev nærmest latterliggjort af førende astronomer. En eftervirkning af Silbersteins mislykkede forsøg på at finde relationen mellem hastigheder og afstande var, at andre forsøg på samme område blev mødt med skeptis. Det er især værd at bemærke, at da Hubble senere fandt relationen var han meget påpasselig; "Because some workers might link his work to earlier attempts, Hubble was careful in 1929 to distinguish between observation and theory" [31]. Hubble nævnte kun de Sitter en enkel gang meget kort [83] [30].

5.3.5 Afrunding på forsøg på at finde ...

De ovenfor beskrevne forsøg på at etablere en relation mellem observationer og teorier led alle en krank skæbne. Enten blev de overset af forskersamfundet, eller også blev de latterliggjort. Men fælles for dem alle er, at de i forsøget på at finde en sammenhæng kom tættere på erkendelsen af universets udvidelse, end dem der arbejdede med observationer eller teori alene. At de ikke fik nogen betydning for erkendelsesforløbet, skal nok ses på baggrund af, dels at der ikke var observationer nok til at underbygge deres teorier, og dels at de ved at prøve at finde en sammenhæng mellem observationer og teorier satte sig ud over de givne regler, for hvordan videnskab drives — videnskabsteoriene.

Kapitel 6

Konklusion

I begyndelsen af projektforsøget blev vores interesse fanget af, at det tog 13 år fra Einstein havde regnet sig frem til, at universet udvider sig, men forkastede det, til at universets udvidelse var almindeligt anerkendt som en fysisk realitet. Undervejs fandt vi ud af, at der var mange ting, som skulle afklares, inden det var muligt at erkende universets udvidelse. I starten så det for os ud som om, at løsningen lå lige om hjørnet, men som projektet skred frem blev vi mere og mere klar over, at det faktisk var ret imponerende, det ikke tog længere tid.

For at nå frem til erkendelsen af universets udvidelse skulle der først eksistere et univers, som kunne udvide sig. Op gennem 10'erne og starten af 20'erne var det således endnu uklart, om universet var Mælkevejen eller, om de spiraltåger man observerede var stjernesystemer som Mælkevejen. Det var først, da Hubble i starten af 1925 offentliggjorde observationer af, at en af de fjerntliggende spiraltåger indeholdt cepheider, det blev almindeligt accepteret, at universet består af enorm mængde af galakser. Det var også ved den lejlighed, det accepteredes, at man var i stand til at foretage afstandsmålinger over store afstande. Man indså derfor, at universet var meget større, end man hidtil havde troet. Det var nødvendigt at indse, at universet bestod af meget mere end Mælkevejen, før man kunne begynde at diskutere, hvorvidt universet udvider sig eller ej. Selvom man allerede i 1914 med Sliphers rødforskydningsmålinger havde vidst, at spiraltågerne bevæger sig, var der ingen, som kunne udnytte disse data til at konkludere universets udvidelse, da der ikke var andre indikationer, af at det måtte forholde sig sådan.

Men observationerne alene var ikke nok til at nå frem til erkendelsen af universets udvidelse, der måtte også være nogle teorier, som kunne

beskrive universets struktur og medføre universets udvidelse. Med den generelle relativitetsteoris fremkomst i 1915 havde man teorien, der kunne forklare universets struktur. Selvom teoriens matematik ledte til universets udvidelse, blev det forkastet af Einstein, da han fremsatte sin relativistiske kosmologi i 1917, og han fastholdt sin modstand mod universets udvidelse lige til 1930. Som beskrevet i afsnit 5.2.1 skal Einsteins afvisning nok ses i lyset af hans overbevisning om, at inertie skal ses i forhold til fixstjernerne, og at fixstjernerne derfor må være statiske. Heller ikke da Friedmann i 1922 konkluderer, at universet udvider sig på baggrund af relativitetsteoriens matematik, vinder det indpas i forskersamfundet. Først da Lemaître i 1927 kommer med sit bud på en relativistisk kosmologi, eksisterer der en teori, som kan forklare den observerede rødforskydning. Lemaître bliver bl. a. inspireret til sin teori af Hubbles førromtalte observation, som han mener umuliggør, at universet er statisk.

I sidste ende er det Hubbles observationer af sammenhængen mellem galaksernes hastigheder og afstande i 1929, der nødvendiggør, at der skal findes en anden forklaring på universets struktur, end at det er statisk. Men det er først, da Lemaîtres teori bliver almindeligt kendt, at erkendelsen af universets udvidelse er mulig. Denne teori er nemlig i overensstemmelse med det observerede samtidig med, at den passer med relativitetsteorien.

Det er udfra det ovenstående klart, at hverken teori eller emperi alene har været styrende for erkendelsen af universets udvidelse. Der har været tale om et samspil i hele erkendelsesforløbet, uden hvilket erkendelsen i hvert tilfælde havde været længere undervejs.

Vi har i kapitel 4 kort beskrevet to videnskabsteorier; logisk empirisme og Poppers falsifikationsteori, der henholdsvis lægger vægt på observationer og teorier. I og med ingen af de to videnskabsteorier inddrager et samspil mellem empiri og teori, kan det af ovenstående konkluderes, at alene kan én af disse videnskabsteorier ikke beskrive erkendelsesforløbet. Skal erkendelsesforløbet beskrives, giver videnskabshistorien et mere realistisk billede af, hvad der skete. Af det eksempel vi har brugt fra videnskabshistorien, kan man lære, at det tager tid og et bredt interesseområde at nå til en erkendelse, det er ikke nok at være enten observatør eller teoretiker. Skal man generalisere udfra denne konklusion, må det betyde, at for at lære hvordan man dyrker videnskab, er det ikke nok at studere videnskabsteori, man må også grave i historien og se, hvordan nye erkendelser er fremkommet.

6.1 Perspektivering

Kunne universets udvidelse være opdaget tidligere end 1930 udfra observationer alene? Vi ved at der meget tidligt i perioden 1900-1930 var en del observationer og opdagelser, der kunne have ændret synet på universet. Det interessante i den forbindelse er, at Campbell, der var chef for Fath og senere Paddock på Lick observatoriet, ud fra de kilder vi har benyttet, lader til, at have haft en negativ betydning for udbredelsen af disse observationer og opdagelser. I 1909 konkluderede Fath udfra sine observationer, at spiraltåger indeholdt utallige stjerner, hvorved tågerne måtte ligge udenfor Mælkevejen. Da der ikke var en metode til at afstandsbestemme på daværende tidspunkt påvirkede Campbell Fath til, ifølge vores kilder, at pointere dette i sin publikation, hvorved resultatet ikke fik betydning. I 1916 opdagede Paddock, at universet udvider sig, han troede dog ikke selv på dette resultat. Der står ingen steder i vores kilder noget om, at Campbell havde indflydelse på Paddocks tvivl, men det kunne være interessant at undersøge Campbells indflydelse og betydning nærmere.

Vi har valgt at slutte vores gennemgang af erkendelsesforløbet i 1930, hvor universets udvidelse er almindeligt anerkendt. Den kosmologiske konstant λ er fjernet fra den kosmologiske relativitetsteori og Hubbles lov er en anerkendt metode til afstandsbestemmelse. Dermed er det ikke sagt, at der ikke blev forsket videre i bl. a., hvordan universet er sammensat. Som med så meget andet forskning dukker der hele tiden nye spørgsmål op som f. eks., hvad er universets alder ?

Ud fra Hubbles konstant er det muligt at beregne alderen af universet. I dag, mere end 50 år efter Hubble fremsatte sin lov, der rummer Hubbles konstant, er der stadigvæk diskussion om værdien af denne konstant. Det eneste kosmologerne er enige om er, at konstanten må have en værdi, der ligger mellem 50 og 100 $km/s/Mpc$, og det har delt den kosmologiske verden i to lejre; dem, der tror på en lav værdi og dem, der tror på en høj værdi. En høj værdi resulterer i, at universets alder bliver ca. 8 mia. år, hvor imod en lav værdi giver en alder på ca. 14 mia. år. Visse stjerner er aldersbestemt til at være 13 mia. år. Det burde vel være klart, at værdien af Hubbles konstant i så fald må være lav, men i 1994 viste observationer, at Hubbles konstant måtte være ca. 80 $km/s/Mpc$. Altså er universet yngre end visse stjerner. Men diskussionen af værdien af Hubbles konstant er nok ikke afgjort endnu, hvis observationerne er korrekte, og Hubbles konstant virkelig

er fastlagt, må der ændres på teorierne for at få denne høje værdi til at passe. For en diskussion af Hubble konstanten henvises til [129].

I forbindelse med diskussionen om universets alder er den kosmologiske konstant blevet genstand for fornyet interesse, idet konstanten kan bruges til at ændre udvidelseshastigheden, således at universet i starten udvidede sig langsommere, end det gør i dag. På den måde kan man forklare, at universet er ældre, end det umiddelbart ville være ud fra den høje værdi af Hubble konstanten. Men ligesom diskussionen om Hubble konstanten er dette langtfra afklaret. For en diskussion af den kosmologiske konstant henvises til [38] og [34].

Litteraturliste

1. Balbinot, B. & Messina, B. (ed.): "*Modern Cosmology in Retrospect*", Cambridge University Press, 1990, New York.
2. Berendzen, R., Hart, R. & Seeley, D.: "*Man Discovers the Galaxies*", Science History Publications, 1976, New York.
3. Ref. [2] s. 11.
4. Ref. [2] s. 18-20.
5. Ref. [2] s. 20.
6. Ref. [2] s. 21.
7. Ref. [2] s. 22.
8. Ref. [2] s. 24-25.
9. Ref. [2] s. 25.
10. Ref. [2] s. 26.
11. Ref. [2] s. 26-28.
12. Ref. [2] s. 27.
13. Ref. [2] s. 28.
14. Ref. [2] s. 29.
15. Ref. [2] s. 36.
16. Ref. [2] s. 104-107.
17. Ref. [2] s. 105.
18. Ref. [2] s. 106.

19. Ref. [2] s. 108.
20. Ref. [2] s. 110.
21. Ref. [2] s. 133.
22. Ref. [2] s. 133–136.
23. Ref. [2] s. 158.
24. Ref. [2] s. 187–190.
25. Ref. [2] s. 188.
26. Ref. [2] s. 191–192.
27. Ref. [2] s. 195.
28. Ref. [2] s. 196.
29. Ref. [2] s. 197.
30. Ref. [2] s. 199–200.
31. Ref. [2] s. 200.
32. Ref. [2] s. 201.
33. Ref. [2] s. 208.
34. Carroll, Sean M. & Press, William H.: *“The Cosmological Constant”*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, **30**, 499–542, 1992.
35. Chalmers, A. F.: *“What is this thing called Science?”*, University of Queensland Press, (1. udg. 1976) 2. udg. 1982, St Lucia, Queensland.
36. Ref. [35] s. 5.
37. Ref. [35] s. 51.
38. Crosswell, Ken: *“The quest for the cosmological constant”*, New Scientist, **137**:1861, 23–27, 1993.

39. Forord i ref. [91] s. 698-699 til en samling af 3 artikler skrevet af Heber D. Curtis, George W. Ritchey & Harlow Shapley under titlen "*Novae in Spiral Nebulae*", alle artikler stammer fra *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **29**, 1917.
40. Eddington, Arthur S.: "*The Mathematical Theory of Relativity*", Cambridge University Press, 1923, Cambridge.
41. Eddington, Arthur S.: "*The Nature of the Physical World*", Cambridge University Press, (1. udgave 1928) 1946, Cambridge.
42. Ref. [41] s. 166.
43. Eddington, Arthur S.: "*On the Instability of Einstein's Spherical World*", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **90**, 668-678, 1930.
44. Eddington, Arthur S.: "*Council Note on Expansion of Universe*", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **91**, 412-416, 1930.
45. Ref. [43], her citeret fra ref. [56] s. 105.
46. Einstein, Albert: "*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*", *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, **7**, 142-152, 1917.
Her refereret fra oversættelsen: "*Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity*" i [101], s. 177-188.
47. Ref. [46] s. 177.
48. Ref. [46] s. 179.
49. Ref. [46] s. 180.
50. Ref. [46] s. 183.
51. Ref. [46] s. 185.
52. Ref. [46] s. 186.
53. Ref. [46] s. 188.
54. Einstein, Albert: "*Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedmann 'Über die Krümmung des Raumes'*", *Zeitschrift für Physik*, **11**, 326, 1922.

55. Einstein, Albert: "Notiz zu der Arbeit von A. Friedmann "Über die Krümmung des Raumes" ", Zeitschrift für Physik, **16**, 228, 1923.
56. Ellis, G. F. R.: "Innovation, resistance and change: the transition to the expanding universe" i [1] s. 97-113
57. Ref. [56] s. 97.
58. Ref. [56] s. 102.
59. Ref. [56] s. 102 her citeres ifølge Stachel 1986, men denne optræder ikke i referencelisten.
60. Ref. [56] s. 102 og tabel 6.3 s. 103-104.
61. Ref. [56] tabel 6.3 s. 103-104.
62. Ref. [56] tabel 6.3 s. 103-104 og referenceliste s. 108-112.
63. Ref. [56] s. 104.
64. Ref. [56] s. 105.
65. Ref. [56] s. 106.
66. Friedmann, Aleksandr: "Über die Krümmung des Raumes", Zeitschrift für Physik, **10**, 377-386, 1922.
Her refereret fra oversættelse af Doyle, Brian: "On the Curvature of Space" i [91] s. 838-843.
67. Ref. [66] s. 839.
68. Ref. [66] s. 842.
69. Ref. [66] s. 843.
70. Hertzprung, Ejnar: originaltitel ikke opgivet, Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, **3**, 429-442, 1905.
Her refereret fra oversættelse: "On the Radiation of Stars", oversat af H. Shapley og V. Icke i ref. [91] s. 208-211.
71. Forord til ref. [70] s. 208.

72. Hubble, Edwin P.: *Cepheids in Spiral Nebulae*, Publications of the American Astronomical Society, **5**, 261–264, 1925.
Her refereret fra genoptryk i ref. [91] s. 713-715.
73. Forord til ref. [72] s. 713.
74. Hubble, Edwin P.: “*Extra-Galactic Nebulae*”, *Astrophysical Journal*, **64**, 321–369, 1926.
Her refereret fra genoptryk i ref. [91] s. 716-724.
75. Forord til ref. [74] s. 716.
76. Hubble, Edwin P.: “*A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **15**, 168–173, 1929.
Her refereret fra genoptryk i ref. [91] s. 725–728.
77. Forord til ref. [76] s. 725.
78. Hubble, Edwin P.: *Realm of the Nebulae*, Yale University Press, 1936, New Haven.
79. Ref. [78] s. 109, her citeret efter ref. [2] s. 198–199.
80. Kaufmann III, William J.: “*Universe*”, W. H. Freeman and Company, (1. udgave 1985) 4. udgave 1994, New York.
81. Ref. [80] s. 458.
82. Kragh, Helge: “*The Beginning of the World: Georges Lemaître and the Expanding Universe*”, *Centaurus*, **30**, 114–139, 1987.
83. Ref. [82] s. 116.
84. Ref. [82] s. 118.
85. Ref. [82] s. 118–119.
86. Ref. [82] s. 119–120.
87. Ref. [82] s. 124.
88. Ref. [82] s. 124–125.
89. Ref. [82] s. 125.

90. Ref. [82] s. 135.
91. Lang, Kenneth R. & Gingerich, Owen (ed.): "*A Sourcebook in Astronomy and Astrophysics, 1900-1979*", Harvard University Press, 1979, Cambridge MA.
92. Leavitt, Henrietta S.: "*Periods of Twenty-five Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*", Harvard College Observatory Circular, **173**, 1-3, 1912.
Her refereret fra genoptryk i ref. [91] s. 398-400.
93. Forord til ref. [92] s. 398.
94. Lemaître, Georges: "*Note on de Sitter's universe*", Journal of Mathematics and Physics, **4**, 188-192, 1925.
95. Ref. [94] s. 192 her referet fra [82] s. 119.
96. Lemaître, Georges: "*Un Univers Homogène de Masse Constante et de Rayon Croissant, Rendant Compte de la Vitesse Radiale de Nebuleuses Extra-galactique*", Annales de la Société scientifique de Bruxelles, **A47**, 49-59, 1927.
Oversættelse: "*A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius accounting for the radial velocity of Extra-Galactic Nebulae*", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **91**, 483-490, 1931.
Her refereret fra genoptrykt af oversættelsen i [91] s. 844-848.
97. Forord til ref. [96] s. 844 i [91].
98. Ref. [96] s. 845.
99. Ref. [96] s. 846.
100. Ref. [96] s. 847.
101. Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H. & Weyl, H: "*The Principle of Relativity*", Dover Publications, Inc., 1952, New York.
102. Osterbrock, Donald E.: "*The observational approach to cosmology: U.S. Observatories pre-World War II*", i [1] s. 247-289.
103. Ref. [102] s. 250.

104. Ref. [102] s. 252.
105. Ref. [102] s. 253–255.
106. Ref. [102] s. 253–258.
107. Ref. [102] s. 255.
108. Ref. [102] s. 260.
109. Ref. [102] s. 263.
110. Ref. [102] s. 268.
111. Paddock, G. F.: “*The Relation of the System of Stars to the Spiral Nebulæ*”, Publications of Astronomical Society of the Pacific, **28**, 109–115, 1916.
112. Pais, Abraham: “ ‘*Subtle is the Lord ...*’ *The Science and the Life of Albert Einstein*”, Oxford University Press, 1982, Oxford.
113. Ref. [112] s. 284.
114. Ref. [112] s. 287.
115. Ref. [112] s. 288.
116. Robertson, H. P.: “*Relativistic Cosmology*”, Reviews of Modern Physics, **5**, 62–90, 1933.
117. Russel, Henry N.: “*Relations between the Spectra and Other Characteristics of Stars*”, Popular Astronomy, **22**, 275–294, 1914.
Her refereret fra genoptryk i ref. [91] s. 212–220.
118. Forord til ref. [117] s. 212.
119. de Sitter, Willem: “*On Einstein’s Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences. Third Paper*”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **78**, 3–28, 1917.
120. Ref. [119] s. 5.
121. Ref. [119] s. 8.
122. Ref. [119] s. 9.
123. Ref. [119] s. 11.

124. Ref. [119] s. 17.
125. Ref. [119] s. 24.
126. Ref. [119] s. 26.
127. Slipher, Vesto M.: *A Spectrographic Investigation of Spiral Nebulae*", Proceedings of the American Philosophical Society, **56**, 403-409, 1917.
Her refereret fra genoptryk i ref. [91] s. 704-707.
128. Ref. [127] s. 706.
129. Travis, John: "*Hubble War Moves to High Ground*", Science, **266**, 539-541, 1994.
130. Öpik, Ernst: *An Estimate of the Distance of the Andromeda Nebula*", Astrophysical Journal, **55**, 406-410, 1922.

Liste over tidligere udkomne tekster
tilsendes gerne. Henvendelse herom kan
ske til IMFUFA's sekretariat
tlf. 46 75 77 11 lokal 2263

-
- 217/92 "Two papers on APPLICATIONS AND MODELLING
IN THE MATHEMATICS CURRICULUM"
by: Mogens Niss
- 218/92 "A Three-Square Theorem"
by: Lars Kadison
- 219/92 "RUPNOK - stationær strømning i elastiske rør"
af: Anja Boisen, Karen Birkelund, Mette Olufsen
Vejleder: Jesper Larsen
- 220/92 "Automatisk diagnosticering i digitale kredsløb"
af: Bjørn Christensen, Ole Møller Nielsen
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 221/92 "A BUNDLE VALUED RADON TRANSFORM, WITH
APPLICATIONS TO INVARIANT WAVE EQUATIONS"
by: Thomas P. Branson, Gestur Olafsson and
Henrik Schlichtkrull
- 222/92 On the Representations of some Infinite Dimensional
Groups and Algebras Related to Quantum Physics
by: Johnny T. Ottesen
- 223/92 THE FUNCTIONAL DETERMINANT
by: Thomas P. Branson
- 224/92 UNIVERSAL AC CONDUCTIVITY OF NON-METALLIC SOLIDS AT
LOW TEMPERATURES
by: Jeppe C. Dyre
- 225/92 "HATMODELLEN" Impedansspektroskopi i ultrarent
en-krystallinsk silicium
af: Anja Boisen, Anders Gorm Larsen, Jesper Varmer,
Johannes K. Nielsen, Kit R. Hansen, Peter Bøggild
og Thomas Hougaard
Vejleder: Petr Viacor
- 226/92 "METHODS AND MODELS FOR ESTIMATING THE GLOBAL
CIRCULATION OF SELECTED EMISSIONS FROM ENERGY
CONVERSION"
by: Bent Sørensen
- 227/92 "Computersimulering og fysik"
af: Per M.Hansen, Steffen Holm,
Peter Maibom, Mads K. Dall Petersen,
Pernille Postgaard, Thomas B.Schrøder,
Ivar P. Zeck
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 228/92 "Teknologi og historie"
Fire artikler af:
Mogens Niss, Jens Høyrup, Ib Thiersen,
Hans Hedal
- 229/92 "Masser af information uden betydning"
En diskussion af informationsteorien
i Tor Nørretranders' "Mærk Verden" og
en skitse til et alternativ baseret
på andenordens kybernetik og semiotik.
af: Søren Brier
- 230/92 "Vinklens tredeling - et klassisk
problem"
et matematisk projekt af
Karen Birkelund, Bjørn Christensen
Vejleder: Johnny Ottesen
- 231A/92 "Elektrondiffusion i silicium - en
matematisk model"
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B.Hansen
- 231B/92 "Elektrondiffusion i silicium - en
matematisk model" Kildetekster
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B.Hansen
- 232/92 "Undersøgelse om den simultane opdagelse
af energiens bevarelse og isærdeles om
de af Mayer, Colding, Joule og Helmholtz
udførte arbejder"
af: L.Arleth, G.I.Dybkjær, M.T.Østergård
Vejleder: Dorthe Posselt
- 233/92 "The effect of age-dependent host
mortality on the dynamics of an endemic
disease and
Instability in an SIR-model with age-
dependent susceptibility
by: Viggo Andreassen
- 234/92 "THE FUNCTIONAL DETERMINANT OF A FOUR-DIMENSIONAL
BOUNDARY VALUE PROBLEM"
by: Thomas P. Branson and Peter B. Gilkey
- 235/92 OVERFLADESTRUKTUR OG POREUDVIKLING AF KOKS
- Modul 3 fysik projekt -
af: Thomas Jessen
-

- 236a/93 INTRODUKTION TIL KVANTE HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 236b/93 STRØMSSAMMENBRUD AF KVANTE HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 237/93 The Wedderburn principal theorem and Shukla cohomology
af: Lars Kadison
- 238/93 SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (2)
Vektorbånd og tensorer
af: Peder Voetmann Christiansen
- 239/93 Valgsystemer - Modelbygning og analyse Matematik 2. modul
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen, Maria Hermannsson, Allan Jørgensen, Ragna Clauson-Kaas, Poul Lützen
Vejleder: Mogens Niss
- 240/93 Patologiske eksempler. Om sære matematiske fisks betydning for den matematiske udvikling
af: Claus Dræby, Jørn Skov Hansen, Runa Ulsøe Johansen, Peter Meibom, Johannes Kristoffer Nielsen
Vejleder: Mogens Niss
- 241/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 1
af: Bent Sørensen
- 242/93 Brovedligeholdelse - bevar mig vel
Analyse af Vejdirektoratets model for optimering af broreparationer
af: Linda Kyndlev, Kare Fundal, Kamma Tulinius, Ivar Zeck
Vejleder: Jesper Larsen
- 243/93 TANKEEKSPERIMENTER I FYSIKKEN
Et 1.modul fysikprojekt
af: Karen Birkelund, Stine Sofia Korremann
Vejleder: Dorthe Posselt
- 244/93 RADONTRANSFORMATIONEN og dens anvendelse i CT-scanning
Projektrapport
af: Trine Andreasen, Tine Guldager Christiansen, Nina Skov Hansen og Christine Iversen
Vejledere: Gestur Olafsson og Jesper Larsen
- 245a+b/93 Time-Of-Flight målinger på krystallinske halvledere
Specialerapport
af: Linda Szkotak Jensen og Lise Odgaard Gade
Vejledere: Petr Viscor og Niels Boye Olsen
- 246/93 HVERDAGSVIEN OG MATEMATIK - LÆREPROCESSER I SKOLEN
af: Lena Lindenskov, Statens Humanistiske Forskningsråd, RUC, IMPUFA
- 247/93 UNIVERSAL LOW TEMPERATURE AC CONDUCTIVITY OF MACROSCOPICALLY DISORDERED NON-METALS
by: Jeppe C. Dyre
- 248/93 DIRAC OPERATORS AND MANIFOLDS WITH BOUNDARY
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski
- 249/93 Perspectives on Teichmüller and the Jahresbericht Addendum to Schappacher, Scholz, et al.
by: B. Booss-Bavnbek
With comments by W.Abikoff, L.Ahlfors, J.Cerf, P.J.Davis, W.Fuchs, F.P.Gardiner, J.Jost, J.-P.Kahane, R.Lohan, L.Lorch, J.Radkau and T.Söderqvist
- 250/93 EULER OG BOLZANO - MATEMATISK ANALYSE SET I ET VIDENSKABSTEORETISK PERSPEKTIV
Projektrapport af: Anja Juul, Lone Michelsen, Tomas Højgård Jensen
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 251/93 Genotypic Proportions in Hybrid Zones
by: Freddy Bugge Christiansen, Viggo Andreasen and Ebbe Thue Poulsen
- 252/93 MODELLERING AF TILFÆLDIGE FÆNOMENER
Projektrapport af: Birthe Friis, Lisbeth Helmgard, Kristina Charlotte Jakobsen, Marina Mosbak Johannessen, Lotte Ludvigsen, Mette Hass Nielsen
- 253/93 Kuglepakning
Teori og model
af: Lise Arleth, Kåre Fundal, Nils Kruse
Vejleder: Mogens Niss
- 254/93 Regressionsanalyse
Materiale til et statistikkursus
af: Jørgen Larsen
- 255/93 TID & BETINGET UAFHÆNGIGHED
af: Peter Harremoës
- 256/93 Determination of the Frequency Dependent Bulk Modulus of Liquids Using a Piezo-electric Spherical Shell (Preprint)
by: T. Christensen and N.B.Olsen
- 257/93 Modellering af dispersion i piezoelektriske keramikker
af: Pernille Postgaard, Jannik Rasmussen, Christina Specht, Mikko Østergård
Vejleder: Tage Christensen
- 258/93 Supplerende kursusmateriale til "Lineære strukturer fra algebra og analyse"
af: Mogens Brun Heefelt
- 259/93 STUDIES OF AC HOPPING CONDUCTION AT LOW TEMPERATURES
by: Jeppe C. Dyre
- 260/93 PARTITIONED MANIFOLDS AND INVARIANTS IN DIMENSIONS 2, 3, AND 4
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski

- 261/93 OPGAVESAMLING
Bredde-kursus i Fysik
Eksamensopgaver fra 1976-93
- 262/93 Separability and the Jones
Polynomial
by: Lars Kadison
- 263/93 Supplerende kursuseriale til
"Lineære strukturer fra algebra
og analyse" II
af: Mogens Brun Heefelt
- 264/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 2
af: Bent Sørensen
-
- 265/94 **SPHERICAL FUNCTIONS ON ORDERED
SYMMETRIC SPACES**
To Sigurdur Helgason on his
sixtyfifth birthday
by: Jacques Faraut, Joachim Hilgert
and Gestur Olafsson
- 266/94 Kommensurabilitets-oscillationer i
laterale supergitre
Fysikspeciale af: Anja Boisen,
Peter Bøggild, Karen Birkelund
Vejledere: Rafael Taboryski, Poul Erik
Lindelof, Peder Voetmann Christiansen
- 267/94 Kom til kort med matematik på
Eksperimentarium - Et forslag til en
opstilling
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 268/94 Life is like a sewer ...
Et projekt om modellering af aorta via
en model for strømning i kloakrør
af: Anders Marcussen, Anne C. Nilsson,
Lone Michelsen, Per M. Hansen
Vejleder: Jesper Larsen
- 269/94 Dimensionsanalyse en introduktion
metaprojekt, fysik
af: Tine Guldager Christiansen,
Ken Andersen, Nikolaj Hermann,
Jannik Rasmussen
Vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 270/94 THE IMAGE OF THE ENVELOPING ALGEBRA
AND IRREDUCIBILITY OF INDUCED REPRE-
SENTATIONS OF EXPONENTIAL LIE GROUPS
by: Jacob Jacobsen
- 271/94 Matematikken i Fysikken.
Opdaget eller opfundet
NAT-BAS-projekt
vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 272/94 Tradition og fornyelse
Det praktiske elevarbejde i gymnasiets
fysikundervisning, 1907-1988
af: Kristian Hoppe og Jeppe Guldager
Vejledning: Karin Beyer og Nils Hybel
- 273/94 Model for kort- og mellemdistanceløb
Verifikation af model
af: Lise Fabricius Christensen, Helle Pilemann,
Bettina Sørensen
Vejleder: Mette Olufsen
- 274/94 MODEL 10 - en matematisk model af intravenøse
anæstetikas farmakokinetik
3. modul matematik, forår 1994
af: Trine Andreassen, Bjørn Christensen, Christine
Green, Anja Skjoldborg Hansen, Lisbeth
Helmgaard
Vejledere: Viggo Andreassen & Jesper Larsen
- 275/94 Perspectives on Teichmüller and the Jahresbericht
2nd Edition
by: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 276/94 Dispersionsmodellering
Projektrapport 1. modul
af: Gitte Andersen, Rehannah Borup, Lisbeth Friis,
Per Gregersen, Kristina Vejro
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 277/94 PROJEKTARBEJDSPÆDAGOGIK - Om tre tolkninger af
problemorienteret projektarbejde
af: Claus Flensted Behrens, Frederik Voetmann
Christiansen, Jørn Skov Hansen, Thomas
Thingstrup
Vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 278/94 The Models Underlying the Anaesthesia
Simulator Sophus
by: Mette Olufsen(Math-Tech), Finn Nielsen
(RISØ National Laboratory), Per Føge Jensen
(Herlev University Hospital), Stig Andur
Pedersen (Roskilde University)
- 279/94 Description of a method of measuring the shear
modulus of supercooled liquids and a comparison
of their thermal and mechanical response
functions.
af: Tage Christensen
- 280/94 A Course in Projective Geometry
by Lars Kadison and Matthias T. Kromann
- 281/94 Modellering af Det Cardiovasculære System med
Neural Puls kontrol
Projektrapport udarbejdet af:
Stefan Frello, Runa Ulsøe Johansen,
Michael Poul Curt Hansen, Klaus Dahl Jensen
Vejleder: Viggo Andreassen
- 282/94 Parallele algoritmer
af: Erwin Dan Nielsen, Jan Danielsen,
Niels Bo Johansen

- 283/94 Grænser for tilfældighed
(en kaotisk talgenerator)
af: Erwin Dan Nielsen og Niels Bo Johansen
- 284/94 Det er ikke til at se det, hvis man ikke
lige ve' det!
Gymnasie matematikkens begrundelsesproblem
En specialerapport af Peter Hauge Jensen
og Linda Kyndlev
Veileder: Mogens Niss
- 285/94 Slow coevolution of a viral pathogen and
its diploid host
by: Viggo Andreasen and
Freddy B. Christiansen
- 286/94 The energy master equation: A low-temperature
approximation to Bässler's random walk model
by: Jeppe C. Dyre
- 287/94 A Statistical Mechanical Approximation for the
Calculation of Time Auto-Correlation Functions
by: Jeppe C. Dyre
- 288/95 PROGRESS IN WIND ENERGY UTILIZATION
by: Bent Sørensen
- 289/95 Universal Time-Dependence of the Mean-Square
Displacement in Extremely Rugged Energy
Landscapes with Equal Minima
by: Jeppe C. Dyre and Jacob Jacobsen
- 290/95 Modellering af uregelmæssige bølger
Et 3.modul matematik projekt
af: Anders Marcussen, Anne Charlotte Nilsson,
Lone Michelsen, Per Mørkegaard Hansen
Vejleder: Jesper Larsen
- 291/95 1st Annual Report from the project
LIFE-CYCLE ANALYSIS OF THE TOTAL DANISH
ENERGY SYSTEM
an example of using methods developed for the
OECD/IEA and the US/EU fuel cycle externality study
by: Bent Sørensen
- 292/95 Fotovoltaisk Statusnotat 3
af: Bent Sørensen
- 293/95 Geometridiskussionen - hvor blev den af?
af: Lotte Ludvigsen & Jens Frandsen
Vejleder: Anders Madsen