



*History of Science Department
University of Aarhus*

SIMON OLLING REBSDORF

Milnes kosmofysik
En undersøgelse af E. A. Milnes levnedsforløb
og hans forsøg på at reformere fysikken

*Hosta, No. 1, 2000
Work-in-Progress*

Hosta (**H**istory **O**f **S**cience and **T**echnology, **A**arhus) is a series of publications initiated in 2000 at the History of Science Department at the University of Aarhus in order to provide opportunity for historians of science and technology outside the Department to get a glimpse of some of the ongoing or recent works at the Department by researchers and advanced students. As most issues contain work in progress, comments to the authors are greatly valued.

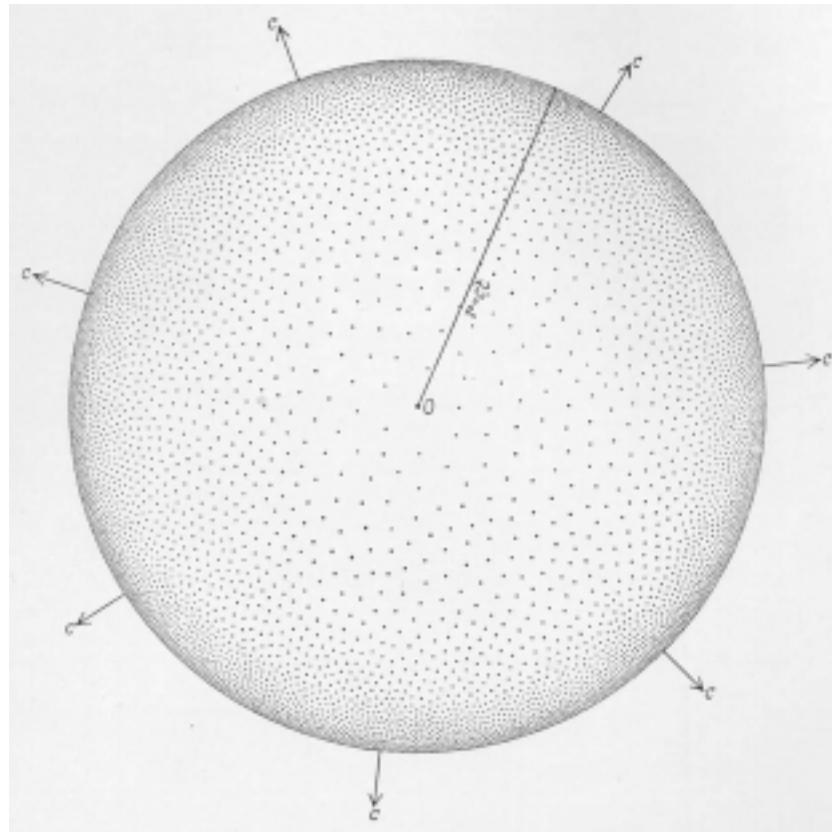
Publication is only made electronically on the web site of the Department (www.ifa.au.dk/ivh/hosta/home.dk.htm). The issues can freely be printed as pdf-documents. The web site also contains a full list of issues.

ISSN: 1600-7433



History of Science Department
University of Aarhus
Ny Munkegade, building 521
DK-8000 Aarhus C
Denmark

Milnes kosmofysik



**En undersøgelse af E.A. Milnes levnedsforløb
og hans forsøg på at reformere fysikken**

Speciale af Simon Olling Rebsdorf
Institut for Videnskabshistorie, Århus Universitet
1. December 1999
Vejleder: Helge Kragh

Abstract

Even though Edward Arthur Milne (1896-1950) is almost forgotten today he was probably one of the most important and notable figures in prewar cosmology when his ideas to a considerable extent set the agenda in the discussion on the fundamental concepts and methods of cosmology. From the perspective of the history of science Milne is interesting because his scientific works covered a wide field, and his career was split into an orthodox and scientific fruitful astrophysical phase (ca. 1920-1935) and a more heterodox cosmological phase (ca. 1932-1950).

In the first period Milne was one of the leading astrophysicists (Milne's equations, Saha's equation); and the thesis gives a biographical account of his years until 1932. Under the impression of a general excitement over the expanding universe, in 1932 Milne began to focus his interests on cosmology, a field of which he had not previously shown any interest. He developed an original cosmological scheme very different from general relativity, and his ambitious project was to reform physics by means of a new theoretical foundation, his kinematical relativity. His methodological and epistemological ideas aroused the relatively new cosmological community, especially in England (the cosmological principle, the Robertson-Walker metric).

During the thirties, philosophical controversy between the rationalistic 'cosmophysicists' and the more empirically-minded scientists affected the models and methods of cosmological science. Milne's project can be labelled as a potential paradigm, and by analysis of his published works and some unpublished manuscripts and correspondence, the case study of Milne makes an exciting example of conceptual changes in theoretical physics.

Forord

Hensigten med dette speciale er en undersøgelse af forskellige aspekter af den spændende fysiker Edward Arthur Milnes videnskabelige liv og frembringelser (1896-1950). Bredt formuleret er afhandlingen et videnskabshistorisk studium af Milnes kosmologi.

Læseren vil opdage, at studiet omfatter adskillige felter af teoretisk (astro-)fysik samt af videnskabshistorien og –filosofien. Naturligvis kan en ydmyg specialeafhandling ikke excellere i alle felterne - man må bestemme sig for hvor koncentration skal fokuseres; men de valg jeg har truffet vil forhåbentlig stemme overens med læserens forventninger. Genstandsfeltet er ikke nyt i den forstand, at der ikke er skrevet om det før. Der findes nogen sekundær litteratur om emnet, som angriber emnets mangfoldige problemer og spørgsmål med forskellig baggrund og optik. Min opgave har været, at forsøge at samle denne forholdsvis begrænsede mængde tilgængelige litteratur til en flerdimensional fremstilling af det spændende område. Dette er sket med et stærkt ønske om bl.a. en grundig og opdateret undersøgelse af Milnes levnedsforløb forlenet med en sympatisk-kritisk analyse af Milnes kosmologi og hans bagvedliggende filosofiske metodologi, samt hvad den i bredere perspektiv afstedkom.

Jeg håber at specialet vil tjene som en guide for dem der kunne ønske at fortsætte arbejdet hvor jeg slap, idet læseren vil opdage et antal afdækkende kildehenvisninger af meget forskellig og specifik art, hvoraf nogle af disse kan opfattes som pile, der peger mod specielle underområder, der ikke grundigt behandles her, men som dog sagtens kunne tåle mere belysning.

Ved gennemlæsninger af forskellig relevant litteratur har jeg opdaget nogle små, men ikke ubetydelige, uoverensstemmelser mellem refererende sekundærlitteratur og refereret primærlitteratur. Disse uoverensstemmelser vil dukke op i teksten løbende, med relevante referencer, idet det på ingen måde er 'store' opdagelser, men snarere små kommentarer og rettelser til den allerede eksisterende litteratur. Alle oversættelser fra engelsk står for min egen regning. De fleste længere citater præsenteres på originalsproget, da en retfærdig oversættelse i sig selv vil kræve en poetisk åre i visse tilfælde.

Da 'ingen er noget, alene ved sig selv' har andre personer været mere eller mindre involveret i frembringelsen af afhandlingen. Det er en fornøjelse at takke fru Meg Weston Smith i London for en frugtbar brevveksling og tilladelse til kopiering

af personlige breve mm., Felicity Pors ved Niels Bohr Arkivet i København, Henrik Zinkernagel og Poul Olesen ved NBI, Poul Erik Nissen ved IFA, IVH for kopifinanciering (specielt v. erhvervelsen af kopier fra Bodleian Library, Oxford), ansatte og studerende ved IVH som gennem forløbet har udvist megen optimisme og tiltro til mit arbejde. Min tak går også til Mogens Wegener, Institut for Idéhistorie, for nogle interessante diskussioner, og jeg står i gæld til min vejleder Helge Kragh for hans mangeartede, konstruktive og store hjælp, ikke mindst ved forsyningen af obskure primærkilder. Endelig vil jeg takke min kære hustru Charlotte for at være ligeså tålmodig som jeg er stædig. Det burde være unødvendigt at anføre, at ovennævnte personer på ingen måde kan drages til ansvar for indholdet af denne tekst. Arbejdstitlen på specialestudiet har været "Milnes kosmologi og hans forsøg på at reformere fysikken". Jeg har imidlertid valgt en mere informativ titel til forsiden.

1. December 1999.

S.O.R.

Indhold

Indledning	1
1 Milnes karriere frem til 1932	4
1.1 Barndom og ungdom	5
1.2 'Banditten' Milne under krigen	6
1.3 Milnes akademiske liv tager sin begyndelse	10
1.4 Ionisering og strålingsteori	13
1.4.1 Milne og Fowlers statistiske metode	15
1.4.2 Temperaturskalaen forfines	18
1.5 Stjernernes struktur	21
1.5.1 Målene med teoretisk fysik	24
1.5.2 Eddington-Milne kontroversen	27
2 Milnes kosmofysik	32
2.1 Fremkomsten af moderne kosmologi	32
2.2 Milne trækker gardinet fra	35
2.3 Kinematisk Relativitetsteori	39
2.3.1 Det kosmologiske princip	41
2.3.2 Substratum: Verdens underlag	43
2.3.3 Lyssignalering	46
2.3.4 Den kinematiske ækvivalens	48
2.3.5 De to tidsskalaer	51
2.3.6 Dynamik og den frie partikel	54
2.3.7 Inertiel masse og gravitationskonstanten	58
2.4 De første reaktioner	62
2.4.1 Milne-McCrea modellen	64
2.4.2 Robertson-Walker metrikken	67
2.4.3 Diracs hypotese om 'store tal'	68
2.5 Resumé og kritik af Milnes kosmofysik	69
3 Aspekter af Milnes kosmofysik	75
3.1 Den kosmologiske kontrovers	75

3.1.1	Dingles angreb	77
3.1.2	Angrebets reaktioner	79
3.1.3	Steady-state teorien	86
3.2	Religiøse aspekter af Milnes kosmofysik	88
3.2.1	Vurdering af Milnes teori	93
3.3	Epilog	95
4	Konklusion	98
4.1	Opsummering	98
4.2	Diskussion	100
4.3	Forslag til videre forskning	101
A	The Relations of Mathematics to Science	103
B	Kort introduktion til teoretisk astrofysik	117
B.1	Ioniseringsteori og Sahas ligning	117
B.2	Gastryk og strålingstryk	119
B.3	Strålingsligevægt og <i>Milnes ligninger</i>	119
C	Gravitation og geometri	121
C.1	Einstiens feltligninger	121
C.2	Robertson-Walker metrikken	122
C.3	Hubbles lov	123
D	Bevægelsesligning for fri partikel	124
D.1	Lorentztransformationen (§62)	124
D.2	Hastighedstransformationen (§63)	125
D.3	Bevægelsesligningernes 4-vektor form (§68)	127
E	Symbolindeks	130

Indledning

*The universe is merely a fleeting idea in God's mind
- a pretty uncomfortable thought, particularly if you've
just made a down payment on a house.*

Woody Allen¹

De fleste mennesker forbinder ikke navnet Milne med videnskab, men måske snarere med børnebøger om Peter Plys og buddhistisk inspireret filosofi. Det er imidlertid forfatteren A.A. Milnes navnebroder, den engelske teoretiker Edward Arthur Milne (1896-1950), der er udgangspunkt og omdrejningspunkt for denne specialeafhandling, som dels indeholder en videnskabelig biografi, dels en undersøgelse af Milnes mangfoldige videnskabelige aktiviteter og produktion. Kort sagt er specialet en samlet og opdateret videnskabshistorisk fortælling om Milne og hans arbejder, som spillede en væsentlig rolle for datidens astrofysiske og kosmologiske netværk, specielt i det tyvende århundredes andet kvartal.

Det er tilstræbt først og fremmest at give en beskrivelse af teoretikeren Milnes frembringelser og deres betydning for moderne kosmologi, og det må nævnes, at et fuldstændigt studium af Milne naturligvis ikke kan gennemføres på blot et år. Dette har betydet at jeg i specialet har måttet fravælge mindre vigtige aspekter og dele af Milnes forskellige teoretiske ideer og perioder i hans liv, som enten ikke har været beskrevet i den tilgængelige litteratur, eller som jeg har fundet perifere i forhold til de mere substantielle elementer af Milnes videnskabelige karriere. Prisen for disse fravalg er naturligvis begrænsninger i specialets fuldstændighed, men overnævnte afgrænsninger har imidlertid været nødvendige af tidsmæssige årsager.

Milnes videnskabelige beskæftigelsesområder gennemgik forskellige faser, som alle var centrale på hans tid, og hans fysiske teorier og filosofiske ideer fik stor direkte og indirekte betydning for udviklingen af både astrofysik og kosmologi. Førstnævnte i form af revolutionerende nyskabelser i teorier for stjerneatmosfærer, og sidstnævnte i kraft af Milnes alternativ til Albert Einsteins almene relativitetsteori, nemlig den såkaldte *kinematiske relativitetsteori*, som i dag kan betegnes som et mislykket, potentielt paradigme. Specialet vil behandle de vigtigste faser i Milnes videnskabelige liv i en vis detalje, og vil forsøge at sætte dem i perspektiv i videnskabshistorien.

¹Fra *Getting Even* 1966, [43].

Milnes kosmologiske tanker fik fx med sit kosmologiske princip stor betydning for udviklingen af Robertson-Walker metrikken, der idag anvendes i den moderne kosmologiske standardmodel. Uover astrophysik og kosmologi, udviklede Milne ved sin militærtjeneste under begge verdenskrige bl.a. originale ballistikmodeller til brug for Englands antiluftskyts, og specialet vil på basis af forskellige tilgængelige primære og sekundære kilder så vidt muligt undersøge de vigtigste elementer af Milnes ideer og frembringelser.

Med udgangspunkt i Milnes filosofiske metodologi, der kan klassificeres som rationalistisk og hypotetisk-deduktiv, vil jeg undersøge Milnes betydning for datidens kosmologiske subkultur, hvor en hed kontrovers udspillede sig under en rationalistisk strømning i tredivernes England. Specialet vil undersøge denne kontrovers, som resulterede i nye, fundamentale filosofiske overvejelser og vurderinger af grundlaget for fysik og moderne kosmologi. Med baggrund i bl.a. kontroversens diskussioner om demarkationskriterier for videnskabelighed vil specialet forsøge at kortlægge denne vigtige brydningsperiode i moderne kosmologi, og bl.a. eksemplificere hvordan studiet af såkaldte fejlslagne teorier kan medvirke til forståelsen af begrebsændringer i fysikken, og forhåbentlig bidrage til en klarlæggelse af forståelsen for den historiske udvikling af det moderne verdensbillede.

Med hensyn til benyttet kildemateriale tager specialet udgangspunkt, dels i udvalg fra den relativt begrænsede mængde af bevarede upublicerede breve, korrespondencer og manuskripter, som overvejende befinder sig ved Bodleian Library i Oxford, dels i publiceret primærlitteratur. Den eksisterende sekundærlitteratur er stort set tilgængelig ved IVH Århus, og vil blive kritisk vurderet gennem teksten. Der findes ikke meget sekundærlitteratur om astrophysikkens historie i den beskrevne periode, og jeg har derfor benyttet en del tilgængelige primærkilder i form af publicerede artikler. Jeg har iøvrigt korresponderet med Milnes datter, Meg Weston Smith, der som nævnt har givet mig tilladelse til kopiering af bestemte kilder fra Oxford, og som også har forsynet mig med forskelligartet interessant information. Specielt har hun hjulpet mig med at transskribere et manusskript fra 1922, som er vedlagt efter hovedteksten (appendix A).

Specialet burde være kronologisk opbygget, da det giver det naturlige forløb af begivenhederne, men dette krav kommer imidlertid ofte i konflikt med, at der tit sker flere ting på samme tid, og en streng kronologisk opbygning gør det somme tider vanskeligere at adskille begivenhedsforløbene. Derfor optræder visse forløb løsrevet fra kronologien, og behandles i separate kapitler, fx sker der store kronologiske spring i beskrivelsen af Milnes kinematiske relativitetsteori. Disse spring er imidlertid prisen for en mere sammenhængende præsentation af hans teori, som udviklede sig støt fra de første ideer i 1932 og gennem de næste atten år.

Kapitel 1 er en biografisk gennemgang af Milnes opvækst, tjeneste under Første Verdenskrig, hans universitetsår og hans debut som astrophysiker. Kapitlet beskriver bl.a. de vigtigste elementer af hans bidrag til en ny, original temperaturskala for stjerneatmosfærer, og kommer videre ind på Milnes skift til undersøgelser af stjerners

struktur samt hans videnskabsfilosofiske tanker. Kapitlet tager forskellige primærkilder i anvendelse, og vil derfor være af interesse selv for læsere der allerede har kendskab til de berørte emner.

Kapitel 2 giver en videnskabelig undersøgelse af Milnes kinematiske relativitetsteori. Fremkomsten af den moderne kosmologi ridses op som baggrund for Milnes originale ideer, der dukkede op i 1932, og teoriens indhold beskrives i kapitel 2.3. Herefter redegør jeg for de første reaktioner på teorien, og beskriver teoriens videnskabelige konsekvenser, herunder Robertson-Walker metrikken, og endelig behandles den analyserede teori kritisk, i videnskabeligt og historisk lys. Det må nævnes at min undersøgelse af Milnes kinematiske relativitetsteori er temmelig teknisk.

Kapitel 3 udredrer den kosmologiske kontrovers mellem empiristerne og 'deduktivisterne' i slutningen af 1930'erne, og de filosofiske og religiøse aspekter af Milnes kosmofysik, og hans betydning for eftertiden bliver behandlet. Endelig afsluttes kapitlet med en kort redegørelse for Milnes senere år i et biografisk lys.

I Kapitel 4 opsummerer jeg specialets vigtigste hovedtræk, og giver nogle bud på oplagte muligheder for videre undersøgelser af forskellige aspekter af Milnes videnskabelige liv og arbejder.

Det første appendix A er, som nævnt, min transskription af Milnes tale fra 1922, som ikke hidtil er blevet publiceret. Appendix B giver en kort introduktion til de elementer af teoretisk astrofysik, som er nødvendige at kende til, ved læsningen af kapitel 1. Appendix C er tilsvarende et hjælpebilag til læsningen af kapitel 2, idet Einsteins feltligninger, Robertson-Walker metrikken og Hubbles lov kort forklares. Appendices B og C kan således fungere som sammenligningsgrundlag for forskelle og ligheder mellem datidens teorier og teorierne i dag. I appendix D gennemgår jeg Milnes udledning af sin kinematiske bevægelsesligning i stor detalje, af den grund, at udledningens resultat er citeret i nogen sekundær litteratur, uden redegørelser for ligningens teoretiske tilblivelse. Endelig har jeg i appendix E forklaret specialets anvendte notation i et indeks.

I afhandlingen omtales personer normalt ved deres efternavn, og første gang de præsenteres ved deres fulde navn (med enkelte undtagelser, hvor jeg ikke kunne finde fornavet). Alle kildehenvisninger er til bibliografiens bagest i specialet. Der skelnes mellem publiceret materiale (artikler og bøger) og upubliceret materiale (manuskripter og breve). Dette fremgår dog ikke eksplisit af kildehenvisningernes nummerering i teksten, men til gengæld ses det ved kildeangivelsernes placering i bibliografiens.

Kapitel 1

Milnes karriere frem til 1932

Dette kapitel vil undersøge Milnes videnskabelige levnedsforløb frem til vendepunktet i begyndelsen af 30'erne. Det er håbet, at en belysning af Milnes videnskabelige baggrundshistorie vil klarlægge, at han forlængst var med i 'det gode selskab' i Englands videnskabelige samfund, da han omkring 1932 ændrede sin løbbane fra astrofysik til kosmologi. Han var da en overordentlig anerkendt og velset matematiker og fysiker, og havde god ballast og ørenlyd i sine videnskabelige omgivelser. Man opdeler visse steder Milnes professionelle karriere (efter Første Verdenskrig) i tre rimeligt veldefinerede faser [118, s.429]:

- 1920-1929: Teori om ionisering og strålingsligevægt i stjerneatmosfærer.
- 1929-1935: Teori om stjernestruktur.
- 1932-1950: Kinematisk Relativitetsteori.

Første fase har afgjort vist at have den største videnskabelige frugtbarhed; endvidere har arbejdet med stjerners struktur været inspirationskilde til videreudviklingen af fysiske teorier om bl.a. de såkaldte hvide dværgstjerner; men sidste fase, Milnes kosmologi, er den mest selvstændige, om end fejlslagne teori, og det er den vi hovedsagelig skal beskæftige os med. Men inden vi kommer så vidt vil jeg i første kapitel demonstrere grobunden for hans høje anseelse. Gennem beskrivelser og analyser af hans videnskabelige idéer, vil behandlingen af de to første videnskabelige faser give et indblik i Milnes filosofiske placering på det 'epistemologiske spektrum', og det vil fremgå, at han udviklede sig til en teoretisk fysiker med et stærkt rationalistisk-deduktivt syn på sin rolle i videnskaben. Det vil ikke komme som en stor overraskelse, at hans geografiske placering, kombineret med de medfølgende opgaver som blev ham pålagt og tilbuddt, var medvirkende ikke-epistemiske faktorer der spillede en rolle for arten af hans videnskabelige produktion. Inden vi kommer ind på hans teorier om sterneatmosfærer, vil vi se på hans militær-videnskabelige tjeneste under Første Verdenskrig. Det var her, hans interesse for atmosfæreteori

blev vækket, og han stiftede under krigen desuden bekendtskaber, som senere blev helt afgørende for hans karriere; men vi begynder med begyndelsen.

1.1 Barndom og ungdom

Edward Arthur Milne blev født den 14. Februar 1896 i den engelske by Hull, der i dag hedder Kingston-Upon Hull, og som ligger i den østlige del af Yorkshire. Milnes far, Sydney Arthur Milne (1867-1921), var et ud af 13 børn af Joshua Milne. Han var rektor på skolen Saint Mary's Church of England, som ligger på Salthouse Lane i Hull, og han fik tre sønner med sin kone, Edith Milne, tidligere Edith Cockcroft fra Pontefract. Edith Milne blev så gammel at hun overlevede sin ældste søn Edward Arthur, vores hovedperson. Han døde 54 år gammel, den 21. september 1950 i Dublin, dagen inden han skulle holde en forelæsning om kosmologi. Edward Arthur Milne havde to brødre: Geoffrey og Philip. Geoffrey Milne (1898-1942) blev geolog i Amani ved det daværende Tanganyika i Østafrika. Han konstruerede et kort over jordarter i Østafrika, og definerede det geologiske udtryk *Catena*, for en følge af jordarter. Den yngste bror, Philip Milne (1910-1972), blev entomolog og biavlrådgiver ved Landbrugsministeriet på Rothamsted Prøvestation i Hertfordshire¹.

Arthur - han blev kaldt ved sit mellemnavn - påbegyndte sin skolegang i 1901, og gik på Lambert Street Council School i Hull sine første fire skoleår. Hele familien flyttede derefter fem mil mod vest til den lille landsby Northfield mellem Hessle og Hull, og Arthur fortsatte sin skolegang i Church of England National School i Hessle fra 1905-1908. Han modtog, som tolvårig, et stipendum til Hymers College i Hull, hvortil han rejste hver dag de næste seks år. På Hymers College fik en bestemt person stor indflydelse på den lovende elev. Det var rektoren Charles Henry Gore, som var en begavet matematiker, og som inspirerede Arthur til en udpræget forkærighed for faget [118, s.421]. Hymers College frigjorde angiveligt Arthur fra forældrene Edith og Sydneys restriktive opdragelse, som ”kørte Arthur og lillebror Geoffrey temmelig hårdt, og han gav dem ikke tilladelse til mange friheder eller sjov. [...] Arthur blev en ret alvorlig og intens lille dreng, elskværdig, men fjern og åndsfraværende, og gav sig ikke hen til vittigheder eller spøg. Han havde brunt hår, og var lille og spinkel af bygning, og havde en kapacitet for hurtige konversationer, en udpræget passion for detalje og en næsten fotografisk og fonografisk hukommelse” [129, s.4]. Under studierne ved Hymers fødtes hans yngste bror Philip, da Arthur var 14 år. Familien havde nu ikke længere plads i det lille hus i Northfield, og flyttede derpå til et større hus i udkanten af Hessle².

I december 1913 vandt Arthur Milne til sin store glæde et stipendum i mate-

¹Se artiklen af Milnes datter, Meg Weston Smith, som har udstyret mig med adskillige brugbare, faktuelle oplysninger vedrørende Milnes tidlige år, [128, s.245].

²Meg Weston Smith har skrevet en detaljeret artikel om sin faders opvækst i East Yorkshire, og specielt om Gores altafgørende indflydelse på den unge student ved Hymers College, [129].

matik og naturvidenskab ved Trinity College i Cambridge. Han dimmitedes fra Hymers College med rekordhøje eksamenskarakterer [132, s.404] og forberedte sig snart på rejsen til Cambridge. Milne ville aldrig have nået Cambridge uden Gores vejledning, endsige have specialiseret sig i matematik, og Gore tilskrives i Weston Smiths artikel [129] en stor del af æren for Milnes vellykkede begyndelse på sin akademiske karriere. Da England erklærede Tyskland krig den 4. august 1914, var Første Verdenskrig således allerede i gang da Milne immatrikuleredes ved Trinity College i oktober samme år. Han udviste stor begejstring for det store universitet og oplevede en vældig intellektuel frigørelse [118, s.421], mens han fulgte undervisning hos blandt andre fysikeren Sydney Chapman, som introducerede ham til ”vektoranalysens styrke” [3, s.viii]. Også den kendte matematiker Godfrey Harold Hardy gjorde et dybt indtryk på Milne, idet han blandt andet lærte ham ”elementerne i matematisk stringens” og specielt vakte han Milnes ”interesse for teorien for punktmængder” [3, s.viii]. Godt et år senere skulle Milnes studier imidlertid bringes til ophør. Han blev indlemmet i Første Verdenskrig, efter modtagelsen af en invitation fra en kaptajn, der senere skulle blive en god kammerat og kollega.

1.2 ’Banditten’ Milne under krigen

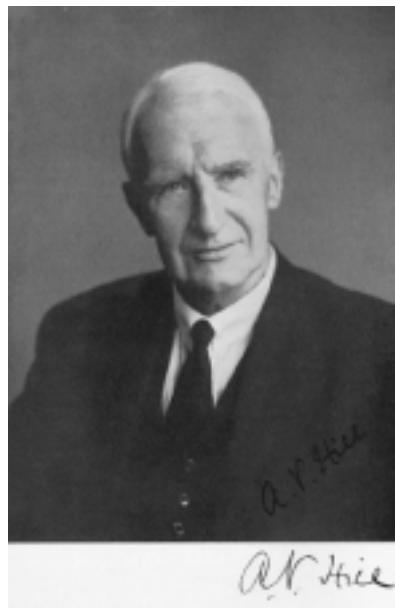
I januar 1916 fik kaptajnen ved Cambridgeshire Regiment, Archibald Vivian Hill³ til opgave at finde en gruppe gode videnskabsmænd til udviklingen af nye instrumenter, som skulle bestemme flyvemaskiners positioner i luftrummet. Planen var, at disse militære instrumenter skulle bruges af Englands antiluftskyts. Hill var selv Fellow⁴ ved Trinity College, og påbegyndte derfor sit rekrutteringsarbejde netop dér. Han adspurgte Milnes lærer, Godfrey Hardy, som var indædt antimilitaristisk. Han takkede derfor nej, idet ”selvom han var rede til at lade sin krop nedskyde, var han ikke belavet på at skulle prostituere sin hjerne til krigsformål” [128, s.242]. Hardy anbefalede imidlertid blandt andre Ralph H. Fowler⁵ og Milne, som var ”en af hans bedste elever” [128, s.242]. Det lykkedes Hill at samle en gruppe under afdelingen Munitions Inventions Department, forkortet MID. Denne afdeling blev grundlagt i august 1915 under Ministry of Munitions, og vurderede flere tusinde mere eller mindre fantasifulde opfindelser til hjælp for krigsindsatsen i England⁶. Ministeriet

³Senere professor og nobelprisvinder i fysiologi i 1922 (musklers fysiologi og biokemi), se [116].

⁴En *Fellow* er et *senior* medlem af et college, som er valgt til en bestemt stilling med bestemt autoritet og ansvar i forbindelse med det akademiske arbejde ved, og ledelsen af det pågældende college. Et *fellowship* er en økonomisk belønning som kan finansieres af forskellige akademiske organisationer. Jeg vil her anvende de engelske udtryk *Fellow* og *fellowship* idet det danske ord ’medlemskab’ ikke anses for at være tilstrækkeligt dækkende.

⁵Ralph Howard Fowler var da engelsk løjtnant ved det kongelige marineartilleri (Royal Marine Artillery). Senere blev han fysiker og Milnes gode kollega (se portrætfoto, figur 1.4).

⁶MID var en af de største og mest produktive britiske videnskabelige institutioner i krigstiden, og afdelingens historiske betydning er ifølge historikeren M. Pattison blevet dybt negligeret af de fleste historikere [123]. MID-afdelingen blev opløst i 1921.



Figur 1.1: Archibald Vivian Hill (1897-1977).

udviste dog betænkelighed ved at engagere den tyveårige Milne til sådanne videnskabelige formål, på grund af hans lave alder. Den almindelige værnepligt blev indført i England i begyndelsen af 1916, og Milne burde derfor retteligt aftjene sin almindelige værnepligt ved militæret. Dette ville imidlertid blive en kontorstilling, da Milnes syn ikke var særlig godt. Han blev alligevel ansat ved MID's eksperimentelle antiluftskytsafdeling (Anti-Aircraft Experimental Section of the Munitions Inventions Department) takket være Hills vedholdende insisteren. Af mangel på et kortere navn til denne samling af folk fra det civile liv, fra hæren, fra den kongelige flåde og marinen fik MID-afdelingen kælenavnet *Hills 'banditter'*⁷.

Hills 'banditter' udførte matematiske analyser, udviklede forskellige militære instrumenter, undersøgte diverse våben og udregnede nye skydetabeller, som senere, i midten af 1917, kom til anvendelse af de fleste antiluftskyts i marken. Næstkommanderende i Hills 'banditafdeling' blev Ralph Fowler, som kom til at gøre et stort indtryk på den unge Milne i krigsårene. I august 1916 installerede Hill sine 'banditter' på HMS Excellent artilleriskolen ved Whale Island i Portsmouth. De undersøgte hvilke fysiske størrelser der spillede den største rolle ved beregning af antiluftskytsenes skydetabeller og fandt, at skudsmålets højde var den vigtigste parameter. Man kendte imidlertid ikke de fysiske forhold i jordens atmosfære, som angiveligt indvirkede på de ballistiske beregninger. Derfor deltog blandt andre Milne i adskilige flyvninger, hvor han målte vindhastigheder, temperaturer og tryk i forskellige flyvehøjder, og ved hjælp af disse data udregnede 'banditterne' nye og bedre bal-

⁷ *Hill's Brigands*, [128, s.243].



Figur 1.2: Edward Arthur Milne som R.N.V.R. i 1919.

listiske skydetabeller. Milne beskrev en kold flyvetur i et brev til sin bror Geoffrey den 14. maj 1917 [128, s.247]:

My boy, I have had the time of my life these two days. Yesterday I went up in an F.E.2d.⁸ We topped 13.500 feet and we bottomed 10 °F of frost! [ca. -12 °C]. Heavens, but it was cold, but heavens how I enjoyed it! I may say that my function was to read a thermometer hung out on the wing - no easy job, my sight being so rotten.

Milne arbejdede også med *sound ranging*, en metode til bestemmelse af positionen, og dermed højden af flyvemaskiner, som ikke var synlige ved natlige luftangreb eller i tåget vejr. De store luftskibe, de lydløst snigende Zeppelinere, havde eksempelvis hidtil været umulige at opspore under fjendens natflyvnninger i luftrummet. *Soundranging*-metoden gjorde brug af udsendelse af lydbølger til, og refleksion fra det flyvende objekt i atmosfæren⁹ og medvirkede til en effektivisering af forsvarrets antiluftskyts. Den 5. Juni 1917 blev Milne udnævt til flådeløjtnant af reserven¹⁰ og han arbejdede videre ved flåden, selvom hærrens rekrutteringsenhed fortsatte deres ihærdige forsøg på at få fingrene i den begavede unge mand. Det teoretiske arbejde

⁸ Fighting Experimental 2.d. På den tid en kraftig *pusher*-propelmaskine med en 250 hestekræfters Rolls Royce motor.

⁹ Milnes arbejde med lydbølger i atmosfæren blev samlet i hans efterkrigsartikel ”Sound Waves in the Atmosphere” [10].

¹⁰ Royal Naval Volunteer Reserve (R.N.V.R.).

med jordens atmosfære vækkede en interesse hos Milne, som siden skulle udømte sig i et frugtbart samarbejde med kollegaen Ralph Fowler¹¹. Et samarbejde som kom til at bidrage afgørende til 1920'ernes spektroskopiske astrofysik. Milne tilbragte i efteråret 1918 flere måneder ved den franske forsvarshærs antiluftskyts under en oberst Gill. Milne var indsat ved First Army Anti-Aircraft Defences, B.E.F., i Frankrig, hvor hans assistance også blev værdsat [70, s.10]. Han skrev hjem til sin far i Hessle den 22. september om de tydeligvis irriterende kommunikationsforhold ved de franske militæranelæg; men dette lille uddrag fra brevet giver samtidig et indblik i hans humoristiske sprogbrug: ”Telefonlinierne fortsætter med at give mig uudtømmeligt besvær. De knækker hele tiden, eller går ud, eller bliver klippet over af franskmænd (med mindre de franske køer går rundt med trådsakse på hovene)” [128, s.251]. Milne befandt sig i Paris den 11. november samme år, da våbenstilstanden endelig blev underskrevet. Han blev efter krigens afslutning tildelt den såkaldte Member of (the Order of) the British Empire (M.B.E) for sin militære indsats. M.B.E. er en britisk militær eller civil orden indstiftet i 1917 til belønning af værdifulde indsatser til gavn for det britiske statssamfund (Commonwealth of Nations). Han havde iøvrigt redigeret en militær håndbog, hvori han selv skrev en artikel om brugen af 'lydsøgere' [*sound locators*] til antiluftskyts. Bogen fik titlen *Secret War Office Handbook* [1], og fandt anvendelse igen under Anden Verdenskrig¹².

Efter krigen stod økonomien ikke særlig godt for Milnes familie, og han agtede derfor at finde et job med penge i, frem for at fortsætte sin akademiske karriere ved Trinity College. Hill, der var imponeret over Milnes mangeartede bidrag i 'banditafdelingen', overtalte dog alligevel Milne til at søge et *fellowship* ved Trinity College. Milne skrev fire afhandlinger som blev medtaget i ansøgningen, og da det lykkedes ham at blive optaget som Fellow var han således tilbage i Cambridge som 23-årig. Af alle tilknyttede folk ved Cambridge Universitet, aftjente 13.878 deres værnepligt under Englands flag. Hele 2.470 af dem kom aldrig tilbage [142]. Det må anses for ekstraordinært, at han blev optaget som Fellow uden mere uddannelse ved Trinity, end den han havde gennemgået i de knapt to år inden krigens udbrud. Grunden til at det alligevel lykkedes, tilskrives hans originale afhandlinger, som var udfærdiget med hjælp fra både Chapman og Hill. Milne og Hill fortsatte iøvrigt deres venskab, og vedblev med at korrespondere resten af Milnes liv. Milne skrev følgende om Hill i indledningen til sin første bog i eget navn: ”[Det var] Hill, som lærte mig elementerne i videnskabelig forskning og som overbeviste mig om, at matematikken, om end [den er] en god tjener, er en dårlig mester” [3, s.viii].

¹¹Læs mere om deres samarbejde under og efter krigen i Milnes Fowler-nekrolog [40].

¹²Om *The War Office*, se [123, s.523-525]. Om videnskaben og Første Verdenskrig og de indbyrdes påvirkninger, se [98].

1.3 Milnes akademiske liv tager sin begyndelse

I 1919 tilbød professor Hugh Frank Newall, der var direktør ved Solar Physics Observatory i Cambridge, den 23 årige Milne at blive assisterende direktør ved observatoriet. Men Milne fandt sig til sin ærgelse ikke i stand til at påtage sig opgaven. Han bad om et år til at studere de emner, som han følte at have forbigået i kraft af sin ualmindelige vej til sit fellowship ved Trinity College. I løbet af dette år fulgte han forelæsninger hos bl.a. matematikeren John Edensor Littlewood i forskellige fysiske fag, og Ebenezer Cunningham i relativitetsteori [3, s.viii]. Han udførte eksperimentelle fysikøvelser ved Cavendish laboratorium under Edward V. Appleton og Henry Thirkill, og han lærte sig endog at læse tysk. I april samme år blev Milne også medstifter af *Trinity Mathematical Society* under Hardys ledelse, og fungerede som præsident i det efterfølgende semester. Han skrev adskillige artikler i de såkaldte *Minute books*, som angivelig skulle være underholdende læsning. Milne involverede sig også i andre klubber, bl.a. Cambridge Philosophical Society, ∇^2 -klubben og den gamle *Cambridge University Natural Science Club* (CUNS-klubben), som han besøgte jævnligt på lørdag aftener¹³. Han var i 1921 formand for de to sidstnævnte klubber, og Milnes datter har i et brev til mig beskrevet hans tid som ”ekstremt energisk”.

I 1920 tog han endelig imod den tilbudte stilling som assisterende direktør ved observatoriet og han besad posten frem til 1924, hvor han trådte tilbage til fordel for et forelæsningsjob i matematik ved Trinity. Milne vandt i 1920 et *prize-fellowship* ved Trinity og forestod fra 1921 undervisningen i astrofysik ved universitet. Samme år mistede Milne sin fader, Sydney Arthur Milne, som kun blev 53 år gammel. Dette store og pludselige tab betød, at Milne nu samtidig måtte støtte sin familie økonomisk, som den ældste i brødreflokken.

Milne gav i februar 1922 et foredrag i CUNS-klubben under titlen ”The relations of mathematics to science” [143]. Det fremgår af en pjece om hundredeåret for CUNS-klubben [97], at han gav foredraget d. 6. februar 1922, men ikke hvorvidt talens manuskript [143] er blevet udgivet. Dette er ifølge Weston Smith imidlertid ikke tilfældet, og jeg har af denne grund transskribert det håndskrevne manuskript i samarbejde med Weston Smith, som er vedlagt i slutningen af denne afhandling, se appendix A.

Ved talen kundgjorde Milne sine tanker om matematikken, som skulle befinde sig i en ”meget misundelsesværdig og præviligeret position, ophøjet over alle andre studier” [app.A, s.104]. Formålet med hans foredrag var at undersøge denne enestående position for disciplinen, og han foreslog en test, et æstetisk kriterium for at bedømme værdien af et givent stykke videnskabeligt arbejde, idet videnskabens sande mål var ”search towards orderliness”¹⁴ [app.A, s.107]:

¹³I [126] beskrives denne klub, der blev stiftet i 1872.

¹⁴Milne forklarede ordet ’orderliness’, som skulle forstås som ordentlighed eller simpelhed. Jeg bruger blot ordet ’orden’ i min oversættelse.

We have then a criterion as to the value of any given piece of scientific work, any achievement or *result* in the ordinary sense. Does it minister directly to our sense of beauty and orderliness? If not, if it appears to import confusion and ugliness, we may further ask: is this ugliness merely an unfortunate, temporary necessity, a small pucker introduced in order to smooth out some larger fold elsewhere? If the answer to both questions is in the negative, then I say, "away with it, for it cumbereth the ground"¹⁵. I am prepared to apply this test ruthlessly.

Milne opdelte matematikken i tre undergrupper: abstrakt eller ren matematik, anvendt matematik og matematisk eller teoretisk fysik, og det var den teoretiske fysik som interesserede ham, fordi den repræsenterede "alle de matematiske aktiviteter som higer efter at bringe 'orden' i det eksperimentelle kaos" [app.A, s.108]. Han anså den teoretiske fysiks frembringelser som kunstværker med en værdi i sig selv, som et filter, der sier irrelevante eksperimentelle data fra, og derved finder simpelhed og orden i naturen. I sin diskussion af forholdet mellem teori og observation anførte Milne matematikerens "evne til at udpege ligheder mellem de mest forskelligartede fænomener" som dennes vigtigste rolle i sit arbejde med udførelsen af sine matematiske eksperimenter, og han udtrykte sin tydelige utilfredshed med den gængse holdning ved de naturvidenskabelige universitetsinstitutioner i England, idet han mente den hindrede mulighederne for at foretage matematiske eksperimenter. For Milne ville den ideelle laboratorieleder være en teoretisk fysiker [app.A, s.113]:

But instead of this ideal, we have a school of thought in english physics which definitely discourages the pursuit of mathematical physics. Applied mathematics it tolerates, and indeed makes its dupe, but it would entirely suppress the investigation of its own problems by mathematicians.

Milne agterede således for en holdningsændring, og derigennem en institutionsfornyelse, som kunne varetage de krav han mente der burde stilles til nødvendig forskning i teoretisk fysik for de matematiske eksperimenters egen skyld, bl.a. fordi dette kunne tænkes at fremme nationens videnskabelige status på internationalt plan, således som det allerede var sket via Tysklands repræsentanter for udviklingen af kvanteteorien [app.A, s.114]:

It is a positive disgrace to English mathematical physics that, except Rayleigh and Jeans' early work, not a single development of the theory of quantum dynamics has been made in this country. Yet one feels that had the ideas actually occurred to some one here, they might have never seen the light. All our physicists moan and cry out that they have no mathematical fluency or facility. How on earth are they to get it if they are to be discouraged from

¹⁵Milne kendte Bibelen ud og ind, og trak ofte på sit kendskab til forskellige bibelske passager. Ordet "cumbereth" er et eksempel på hans anvendelse af bibelske ord.

engaging in mathematical physics for its own sake? The curious theory is - and I believe it to be true - that though if every mathematician had a line of experimental work to work at, physics would not advance appreciably faster, yet if every experimentalist had a line of mathematical investigation to go on, physics would perhaps develop at an enormously greater rate. I suggest that this point is worth discussing.

Knapt ti år efter dette foredrag foreslog Milne faktisk oprettelsen af et Institut for Kosmisk Fysik i Oxford, som netop skulle varetage opgaver som de her beskrevne, men mere herom senere. Foredraget tegner et billede af en visionær 26-årig astrofysiker med hang til rationel metodisk tankegang, med nationale følelser for sin disciplin og med en klar idé om hvilke retninger for forskningen der ville tjene faget bedst. Og det er nok ikke tilfældigt at disse tanker optog ham nu, hvor han uddover sine undervisningsforpligtelser også satte forskning på sit arbejdsprogram.

Det skal iøvrigt nævnes at Milne afsluttede sit foredrag med en sympatisk kritik af den franske filosof Henri Bergsons epistemologiske ideer. Bergson angreb matematiikkens effektivitet og anfægtede den ideelle orden, som Milne regnede for at være videnskabens ultimative forbillede. Han, Bergson, anså visse grene af den biologiske videnskab som ubeskrivelig, som modstående enhver formulering af specifikke lovmæssigheder. Ifølge Milne betragtede Bergson de lovmæssigheder, som mennesket har opdaget, som værende antaget for blot at beskrive én bestemt slags stof, det 'døde' stof, og disse love var essentielt på matematisk eller geometrisk form. Geometri var et produkt af intelligens, der blot kunne manipulere med geometri, og derfor var intelligensen impotent når det gjaldt beskrivelser af ting, der ikke relaterede til geometriske relationer", som fx mentale oplevelser. Milne fremlagde Bergsons synspunkter, og citerede i talen lange passager af Bergson. Han bedyrede sin enighed i Bergsons anskuelser om beskrivelsens begrænsninger i den henseende, at fremtidens problemer med at 'læse naturen' bliver langt vanskeligere end de hidtil opnåede resultater. Selvom budskabet med Milnes indlæmmelse af Bergson imidlertid forekommer lidt uklart, da er det ikke desto mindre evident, at Bergsons filosofi også i høj grad optog Milne.

Han påbegyndte snart studiet af stjerners strålingsligevægt og arbejdede med teorier for stjerneatmosfærer. Milne definerede selv begrebet strålingsligevægt i en af sine første artikler om emnet: "A mass of material is said to be in radiative equilibrium when the temperature at each point is steady and when the only agency effecting the transfer of heat is thermal radiation" [9, s.361]. Han udviklede i de følgende år en integralligning som er både matematisk og fysisk interessant. Ligningen bærer i dag navnet *Milnes ligning*, og bestemmer den såkaldte totale strålingsflux \mathcal{F} , der udsendes fra overfladen af en stjerneatmosfære:

$$\mathcal{F} = 2\pi \int_0^\infty \left[\int_0^\infty S_\nu(\tau) E_2(t - \tau) dt \right] d\nu,$$

her er τ den såkaldte optiske dybde, S_ν er en kildefunktion (fx Planckfunkcio-

nen, hvis der er lokal termodynamisk ligevægt) og E_2 er en matematisk funktion¹⁶. Milne modtog i 1922 hædersprisen Smith's Prize for sit originale arbejde med strålingsligevægt, som erstattede blandt andre astronomen Karl Schwarzschilds undersøgelser fra 1906, og *Milnes ligning* anvendes endnu i dag ved analyser af stjerners fotosfærer, og optræder under samme navn i moderne astronomisk litteratur, men i forskellige teoretisk videreudviklede afskygninger.

Vi vil nu koncentrere os om det skelsættende astrofysiske arbejde med stjerneatmosfærer og spektroskopi, som Milne indledte i begyndelsen af tyverne. Dette skete under hans henvi som assisterende direktør ved Solar Physics Observatory, sammen med sin tidligere overordnede 'bandit', Ralph Fowler; men først vil vi kort skitsere stjernespektroskopiens fremkomst, for bedre at forstå værdien af Milnes og Fowlers vigtige bidrag til datidens frontforskning.

1.4 Ionisering og strålingsteori

I 1814 monterede den tyske optiker Joseph Fraunhofer et prisme på sit teleskop og rettede det mod solen. Han så solens spektrallinier og overbeviste sig om, at de ikke repræsenterede farvernes indbyrdes grænseområder, idet de samme farver fandtes forskellige steder i spektret. I 1821 målte han linierne bølgelængder, og to år senere rapporterede han liniespektre fra både planeter og stjerner. Den italienske astronom Angelo Secchi monterede i 1860'erne ligeledes et spektroskop på sit teleskop, og han opdagede, at stjernernes spektre ofte indeholdt absorptionslinier, som lagde grunden for hans klassificering af stjernerne i spektraltyper, i henhold til deres udseende¹⁷. Stjernespektroskopien var hermed bragt til verden, og den bød snart på problemer, som 1800-tallets fysikere ikke var i stand til at løse. De kunne nemlig ikke redegøre for hvordan spektrallinierne for en bestemt stofsammensætning bliver påvirket af temperaturen og tætheden af den gas, som linierne bliver dannet i. I begyndelsen af 1900-tallet gennemgik den astronomiske spektroskopi imidlertid afgørende ændringer, idet den hidtil kvalitative spektroskopi nu blev kvantitativ [136, s.102].

Detektion af stjerners liniespektre og analysen af grundstoffers atomstrukturer var de afgørende byggesten, der skulle bringe forståelse for de kemiske stofsammensætninger og fysiske forhold i solens og andre stjerners atmosfærer. I dag taler man om tre atmosfærelag. Det inderste lag, *fotosfæren*, har en tykkelse på omkring 400 km og udgør bl.a. stjernens synlige overflade. Temperaturen aftager fra fotosfærens inderste lag og frem til overfladen. *Chromosfæren* ligger udenfor fotosfæren, og har

¹⁶Se endvidere appendix B.3 om strålingsligevægt.

¹⁷Hans klassifikation er siden videreudviklet til den såkaldte Harvard-klassifikation: (W)OBAF-GKM. O-stjernetyper er de varmeste, med overfladetemperaturer på 40.000 °Kelvin og stjerner af M-spektralklassen de koldeste, $T \approx 3.000 \text{ }^{\circ}\text{K}$. En god historisk gennemgang af spektroskopiens historie findes i [138].



Figur 1.3: Megh Nad Saha (1894-1956).

ca. samme tykkelse. I chromosfæren stiger temperaturen med radius, indtil chromosfæren gradvis er gået over i stjernens yderste lag, *koronaen*, hvor temperaturen er i størrelsesordenen 10^6 °K [140, s.2]. Man arbejdede fra midten af 1910'erne med talrige analyser af, hvilken rolle atmosfærrens temperatur- og trykforhold spiller for stjernerne, og i oktober 1920 opstillede den indiske fysiker Megh Nad Saha en ligning i *Philosophical Magazine* [81, s.479], der udtalte sig om bueliniers og såkaldte forstærkede liniers relative intensiteter i stjernespektre, under forskellige temperatur- og trykforhold. Ligningen er siden blevet opkaldt efter Saha og så dengang således ud (se også [136, s.111]):

$$\log \left(\frac{\tilde{x}^2}{1 - \tilde{x}^2} P \right) = -\frac{U}{4,571 T} + \frac{5}{2} \log T - 6,5. \quad (1.1)$$

Her var P stjerneatmosfærens totale gastryk, \tilde{x} var gassens ioniseringsgrad, dvs. brøkdelen af atomer der er ioniserede, U var grundstoffets ioniseringspotential og T gassens temperatur¹⁸. Teoriens fundamentale princip var, at siden buelinier kun produceres af neutrale atomer, og forstærkede linier kun dannes af ioniserede atomer, da må de relative intensiteter for de to linietyper angive forholdet mellem antallet af neutrale og ioniserede atomer i stjernens fotosfære¹⁹. Under forudsætning af bestemte temperatur- og trykforhold var det således muligt at beregne disse relative

¹⁸Se appendix B.1 om ioniseringsteori.

¹⁹Megh Nad Saha kaldte de betragtede atmosfærelag for *reversing layers*, hvilket vi her vil oversætte med *fotosfæren*.

antal vha. den såkaldte teori for dissociativ ligevægt. Det var altså muligt at finde stjerneatmosfærens tryk og temperatur vha. linierne relative intensiteter. Sahas artikel affødte snart reaktioner fra bl.a. Milne og den amerikanske astrofysiker Henry Norris Russell, og Milne udtrykte, i tidsskriftet *The Observatory*, sin beundring for Sahas arbejder, som værende ”et eksempel på en kombination af fysisk kemi, kvanteteori og teorierne om atomstruktur, som kun kan appellere til sansen for skønheden ved den systematiske samordning af fysiske fænomener” [8, s.261].

Teorien havde to anvendelser [11, s.404], den ene var sammenligninger af spektre for solens chromosfære og fotosfære, for fotosfæren og solpletter, og for kæmpe- og dværgstjerner. Megh Nad Saha og Henry Russell viste, at intensitetsforskellene kunne forklares ved ændringer i ioniseringsgraden forårsaget enten af temperaturforskelle²⁰ eller trykforskelle²¹. Teoriens anden anvendelse udmøntede sig i ønsket om at finde en temperaturskala for stjernernes spektralklasser. Sahas strategi var at iagttagte en given linies intensitetsændringer henover spektralskalaen. Temperaturskalaen blev fastlagt efter hvornår en bestemt absorptionslinie befandt sig på et grænsepunkt, hvor linien enten kom til synne eller forsvandt. Ved et sådant punkt på spektralskalaen måtte brøkdelen af absorberende atomer (for den pågældende linie) være meget lille, og med et givet tryk var det i principippet muligt at beregne temperaturen på stjernens overflade. Megh Nad Saha og den amerikanske astronom Harry Hemley Plaskett udførte disse beregninger i hhv. 1921 og 1922²². Plaskett forsøgte endog at forbedre Sahas teori, som den tog sig ud i hans første artikler, og han forfinede Sahas metode til bestemmelse af stoffers relative hyppigheder i stjerner [75]. Milne pegede imidlertid på flere fatale fejl i Plasketts beregninger. Bl.a. fremhævede Milne ved dimensionsbetragtninger, at Plaskett i en ligning satte antallet af atomer lig med antallet af atomer per sekund, hvilket gjorde ligningen dimensionalt meningsløs [12, s.119].

Udenfor videnskabens vægge udbrød der en sovesygelignende epidemi i Europa ved navn Encephalitis Letargica. Epidemien havde i 1923 bredt sig til England, og sneg sig også indenfor murene på observatoriet i Cambridge, hvor den angreb Milne, som i flere måneder efter pådragelsen af sygdommen måtte passes hos en gammel ven fra ’banditafdelingen’, William Hartree, og hans kone Eva Hartree. Deres søn, Douglas R. Hartree, blev senere kendt for sin kvantefysiske approximationsmetode, den såkaldte *Hartree-Fock-approximation*. Milne vendte svækket tilbage til sin forskning, men måtte bære den epidemiske encephalitis resten af livet.

1.4.1 Milne og Fowlers statistiske metode

Han og Fowler udgav samme år artiklen ”The intensities of absorption lines in stellar spectra, and the temperatures and pressures in the reversing layers of stars” [11]. De

²⁰Spektralforskelle mellem fotosfæren og solpletter.

²¹Spektralforskelle mellem chromosfæren og fotosfæren samt mellem kæmpe og dværg-stjerner.

²²Se [82] og citeplaskett3.



Figur 1.4: Ralph Howard Fowler (1889-1944).

introducerede her et alternativ til Sahas ideer om grænsepunktet for en absorptionslinie, og navngav dette grænsepunkt som liniens *marginale tilsynekomst*²³. Milne og Fowler rejste i artiklen tvivl om præcisionen af Sahas og Plasketts beregninger, som følge af vanskelighederne ved at formulere de fysiske betingelser for en linies marginale tilsynekomst. Desuden redegjorde teorien ikke for sammensætningen af grundstoffer, og den antog fejlagtigt, at alle tilstede værende elektroner kun kom fra ionisering af et enkelt grundstof [136, s.119]. De skønnede iøvrigt, at solens temperatur ifølge Sahas udledning var for høj, og at dette skyldtes det stadigt beskedne kendskab til det atmosfæriske tryk i stjerneatmosfærer. Man anså det i disse år for plausibelt, at trykket ved solens overflade måtte ligge tæt ved jordens tryk på 1 atmosfære [136, s.122], men dette skulle snart vise sig at være en forkert antagelse. Fowler havde i januar 1923 skrevet en artikel i *Philosophical Magazine* [60], som angreb problemerne på en original måde. Han gjorde brug af en metode, som han havde udviklet i samarbejde med den engelske fysiker Charles G. Darwin²⁴: *The method of partitions*, en metode der tog den statistiske mekanik i anvendelse. Denne artikel var grundlaget for samarbejdet mellem Milne og Fowler, der udmøntede sig i den nævnte artikel [11], og de reviderede her Sahas ligning, nu med brug af den *statistiske fordeling* af atomer i forskellige excitationstilstande²⁵.

De så tre hovedproblemer med Sahas teori. For det første var det ikke klart hvor lille en brøkdel atomer der skulle til for at give den marginale tilsynekomst. For det andet var punktet for marginal tilsynekomst afhængigt af den relative hyppighed af de grundstoffer, der frembragte linien. Endelig var det kendt, at forskellige

²³ *Marginal appearance*, se [11, s.403].

²⁴ Charles Galton Darwin var barnebarn af evolutionsteoriens stamfader, Charles Robert Darwin.

²⁵ Mere præcist indlempede de tilstandssummen (eng. *partition function*) i Sahas ligning; se appendix B.1.

atomer har forskellig absorptionseffektivitet, hvilket ville give usikkerheder i beregningerne. Det lykkedes imidlertid Fowler og Milne at undgå disse tre problemer. De antog nemlig, at absorptionsliniernes intensiteter i det store og hele er afhængige af antallet af atomer, der danner linierne, og de antog således, at ”intensiteten af en given absorptionslinie i et stjernespektrum er proportional med koncentrationen af de atomer i stjerneatmosfæren, der kan absorbere linien” [11, s.404]. Denne antagelse gjorde det muligt at se bort fra den marginale tilsynekomst, og i stedet vende blikket mod absorptionsliniernes *maksimale* intensiteter. Antallet af ubekendte var nu blevet reduceret: trykket og temperaturen var stadig variable, men atomernes relative hæufighed og antallet af atomer, der producerede linierne (samt spørgsmålet om absorptionseffektivitet) var ikke længere nødvendige at medtage i teorien.

Deres revidering af Sahas teori gjorde dem nu i stand til at udføre nye beregninger af (T, P) datapar vha. forskellige grundstoffers absorptionslinier. Saha kunne med sin teori fra 1920 nok beregne fx H og K linier for Ca^+ ved de to nært liggende bølgelængder $\lambda = 3933,7 \text{ \AA}$ og $\lambda = 3968,5 \text{ \AA}$ ²⁶. Men han indrømmede i sin artikel [81], at han ikke var i stand til at beregne atomfordelingen ved *høje* temperaturer, dvs. ved atomernes højere excitationsniveauer. Milne-Fowlers ensembleteori gjorde imidlertid dette muligt, nemlig at tage hensyn til de excitedede atomer ved givne T - og P -størrelser. Dette kan vi se af deres reviderede Saha-ligning [11, s.407], som vi her kalder *Milne-Fowler ligningen*²⁷:

$$\log \left(\frac{x}{1-x} P_e \right) = -\frac{\chi_1}{kT} + \frac{5}{2} \log T + \log \frac{\sigma(2\pi m)^{\frac{3}{2}} k^{\frac{5}{2}}}{h^3} - \log b(T). \quad (1.2)$$

Her er σ antallet af ækvivalente valenselektroner i atomet ($\sigma = 1$ eller 2), k er Boltzmanns konstant, h er Plancks konstant, m er elektronmassen, x er atomernes ioniseringsgrad²⁸, χ_1 er ioniseringspotentialet og $b(T)$ er den afgørende *tilstandssum* for de højere excitedede elektroner (se appendix B.1). I tabel 1.1 ses et par udpluk fra Milne og Fowlers beregninger af stjerneatmosfærernes fysiske værdier for elektronernes partialtryk samt den maksimale temperatur ved liniernes maksimumspunkter.

Milne og Fowler var overraskede over de lave atmosfæretryk, og skrev i artiklen: ”vi oplever her lavere tryk end de hidtil fundne” [11, s.414]. Ved at sammenligne

²⁶Disse linier er de kraftigste linier i G2-stjernetypers spektre, såsom solens.

²⁷I moderne litteratur kaldes den samme ligning netop for *Saha-ligningen*, se fx [140, s.13] samt appendix B.1.

²⁸Det skal bemærkes, at Fowler brugte Sahas udtryk $\log(\tilde{x}^2 P / (1 - \tilde{x}^2))$ i sin reviderede Saha-ligning i [60]. Ved Milne-Fowlers præsentation af deres ligning (i [11]), henviste de til Fowlers ligning. De skrev: ” x is the fraction of ionized atoms”, præcis som Saha[81] og Fowler[60] skrev. Men i Sahas og Fowlers ligninger optrådte ioniseringsgraden imidlertid *kvadreret* (se ligning (1.1)), hvilket *ikke* er tilfældet i Milne-Fowler ligningen [11, s.407]. De fandt det åbenbart ikke nødvendigt at kommentere denne forskel i deres nye artikel. Bemærk iøvrigt, at det i (1.2) ikke længere er det totale gastryk P , men istedet elektronernes partialtryk P_e , som indgår i ligningen (se endvidere appendix B.1 og B.2).

Grundstof	Liniernes moderne navn	Bølgelængde λ Å	T_{max} Kelvin	P_e 10^{-4} atm.
Mg I	b_1, b_2, b_4	5184, 5173, 5167	5500°	3,45
Ca II (Ca^+)	H, K	3934, 3969	6000°	0,50

Tabel 1.1: Temperatur T_{max} og tryk P_e i G-stjerneatmosfærer, beregnet af Milne og Fowler vha. ligning (1.2).

de forskellige spektralklassers teoretiske opførsel med den observerede opførsel af stjerne- og solspektre fandt de, at elektronernes partialtryk i solens og stjernernes fotosfærer lå omkring $P_e = 10^{-4}$ atmosfærer for de fleste stoffer. Dette var et meget vigtigt fund, fordi det bekræftede, at strålingstrykket, dvs. fotonernes trykbidrag P_{str} , er dominerende i forhold til P_e ²⁹. Milnes og Fowlers udledning af disse ekstremt lave tryk kom som en overraskelse. Årtiet efter huskede Russell dette som ”oplivende og revolutionerende” fordi ”alle havde underbevidst vænnet sig til den tanke, at solens atmosfære lignede jordens” [136, s.122]. Milne og Fowler rettede nu blikket mod stjernernes temperaturskalaer. På baggrund af de samme data, som Saha havde brugt, suppleret med data fra blandt andre den engelske astrofysiker Alfred Fowlers nylige arbejde ved Solar Physics Observatory, lykkedes det nu Milne og Fowler at bestemme netop de temperaturer, hvor forskellige kraftige linier havde maksimal intensitet i Harvard-spektralserierne. I figur 1.5 [11, s.420-421] ses deres forslag til denne temperaturskala, som dog stadig ansås for at være provisorisk, fordi den var helt afhængig af trykket. Hvis fotosfærens temperatur var højere end antaget, ville trykket således også antage en større værdi (se ligning (1.2)). De fandt det dog ikke nødvendigt at ændre skalaen, da der så ud til at være god konsistens mellem denne og empirisk fundne temperaturer.

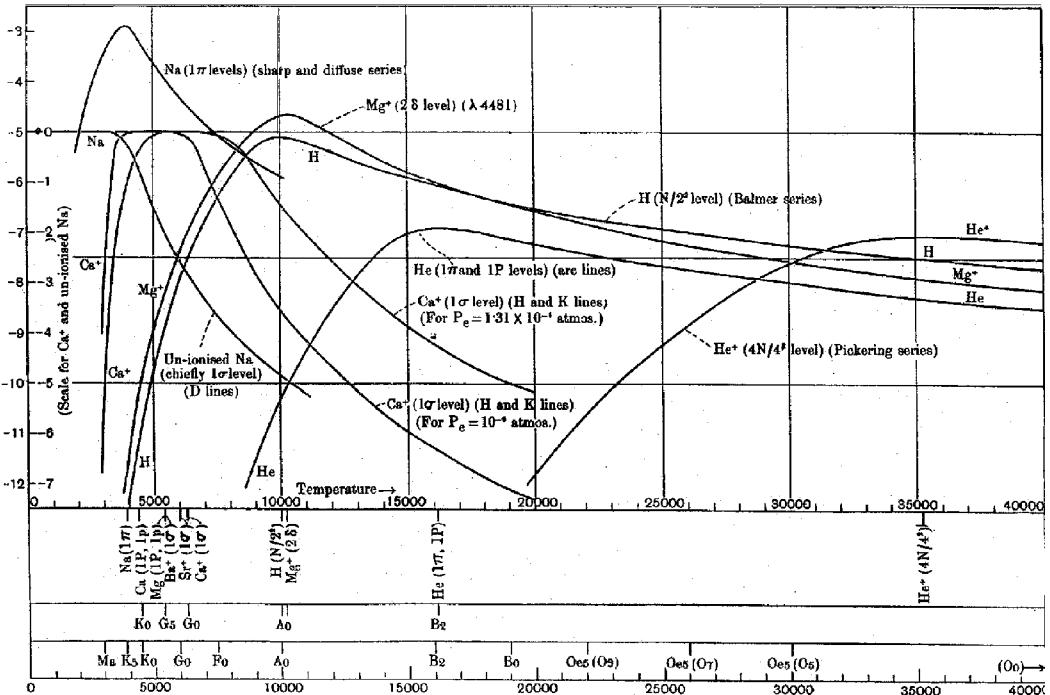
1.4.2 Temperaturskalaen forfines

Milne og Fowler indså yderligere, at man nu kunne vende proceduren, og anvende marginal tilsynekost teknikken til at bestemme grundstoffernes relative hyppigheder i stjernernes atmosfærer [11, s.404]:

When the proper foundations of the theory have been laid, a discussion of marginal appearances should later provide important information as to relative abundance and the minimum number of atoms necessary for appearance.

Dette arbejde blev taget op af videnskabsfolk ved Harvard- og Mount Wilson Observatorierne. Disse havde alle tilknytning til enten Milne og Fowler eller til Russell.

²⁹ $P_{total} = P_{gas} + P_{str}$, hvor $P_{gas} = P_e (+P_{atomer} + P_{ioner} + P_{molekyler})$, og P_{str} = strålingstrykket. Se appendix B.2.



Figur 1.5: Milne og Fowlers foreslæede temperaturskala. Stofkoncentration som funktion af spektraltype og temperatur.

Blandt dem var englænderen Cecilia Payne-Gapotschkin³⁰, som havde studeret i to år ved den store astronom Arthur Stanley Eddington og hos Fowler og Milne i Cambridge. Hun begyndte at arbejde med Fowler-Milne ligningens anvendelser ved Harvard. Både Payne og astronomen Donald Menzel fuldførte betydelige arbejder under anvendelsen af den nye reviderede teori. Payne forfinede temperaturskalaen for spekralserien, hun undersøgte atmosfæretrykkene igen, hun genoptog undersøgelser af Harvard-spekralseriens fysiske betydning og tilvejebragte et nyt estimat af de relative hyppigheder. Disse mange originale resultater samlede hun i sin Ph.D.-afhandling: "Stellar atmospheres: A contribution to the observational study of high temperature in the reversing layers of stars" [73]. Afhandlingen bragte en fuldere forståelse for de fysiske forhold i stjerneatmosfærer, og løste dermed nogle af astrofysikkens største problemer på den tid. Den viste sig senere at være et bevis på, at solatmosfærens grundstofsammensætning var afgørende forskellig fra jordskorpens fordeling af grundstoffer, noget man ikke hidtil havde antaget. Afhandlingen blev af astronomen Otto Struve, i 1962, kaldet "den mest geniale Ph.D. afhandling, der nogensinde er skrevet i astronomi" [86, s.220].

³⁰Celia Helena Payne giftede sig i 1934 med russeren Sergej Gapotschkin, og fik hans efternavn, se hendes selvbiografi [125].



Figur 1.6: Cecilia Helena Payne, anno 1919 (1900-1980).

Det frugtbare samarbejde mellem Milne og Fowler var originalt i sin nye betragtningsmåde, og udgjorde således et afgørende bidrag til den videre udvikling af astrofysikken. De opdagede at solens atmosfæriske tryk var langt lavere end den etablerede viden havde forudsagt, og med deres nye statistiske metode gjorde de rede for stjerners fysiske forhold ved højere temperaturer end Saha hidtil havde formået. Med deres temperaturskala lagde de endvidere grunden for Paynes vigtige etablering af den nye astrofysiske viden. Milnes ven gennem mere end tyve år, den kendte indiske fysiker Subrahmanyam Chandrasekhar, skrev i 1987, i et tilbageblick på tyvernes astronomi, om Milnes astrofysik [99, s.75]:

It was fortunate that the problems to which Milne first turned his attention was one that suited his style and methods admirably. [...], the results which he derived in these, his first and earliest investigations in astrophysics, have remained essentially unchanged over the years and have provided the basis for certain permanent features of our understanding of the outer layers of the stars.

Vi vil nu se på den efterfølgende udvikling af Milnes forskning, som imidlertid ikke fik nær så stor indflydelse på astrofysikken som hans temperaturskala, om end det videre forløb ledte til nye ideer om stjerners strukturelle komposition.

1.5 Stjernernes struktur

Milne blev i 1924 udpeget til Beyer professor i anvendt matematik ved Manchester Universitet, og efterfulgte derved matematikprofessoren Sydney Chapman, hans gode kollega, der havde undervist ham i Cambridge. Det bør nævnes, at arbejdet i en afdeling for anvendt matematik i England svarede omtrent til hvad der går for sig i en fysikafdeling på et dansk universitet. Milne besatte først stillingen i 1925, da han flyttede til Manchester, efter at have gjort sine pligter ved Trinity College, og han forlod først denne stilling tre et halvt år senere. Professoratet kom ham vel, og han optog nu megen af sin tid med administrative opgaver, uddover nye akademiske udfordringer, som han lagde liv og sjæl i. Han foretog fx en generalisering af det fysiske virialteorem, en kendt fysisk ligning, som har den preussiske fysiker Rudolf Clausius som ophavsmand. Clausius definerede virialbegrebet i sin klassiske, mekaniske ligning, der udtaler sig om massepartiklers dynamiske middelhastighed under påvirkning af en ekstern kraft³¹. Milne generaliserede virialteoremet til også at gælde for partikler der udsættes for friktionskræfter. Han anvendte denne generalisation til teoretiske undersøgelser af bl.a. stjerners gravitationelle bevægelse i et medium med friktion, fx som det kunne tænkes i solsystemets tidlige historie [14].

Også pulsationsvariable stjerner og ligevægt i stjerners kalcium-chromosfære blev Milnes arbejdsområder³², og han undersøgte endvidere problemet om stjerners hydrodynamiske ligevægt, dvs. balance mellem en indadrettet tyngdekraft og et udadrettet strålingstryk. Det gik op for ham, at hvis strålingsfluxen indefra ikke er konstant, da vil stjernen være i ustabil ligevægt, som følge af en ellers konstant tyngdekraft, og under visse omstændigheder vil denne ustadighed forårsage en udsendelse af atomer med hastigheder på over 10^6 ms^{-1} . Han gav med denne teori³³ astrofysikken endnu et signifikant bidrag til forståelsen af stjerners dynamik, og med hans samlede, betydningsfulde indsats indenfor astrofysikkens atmosfæreproblemer og stjerners dynamik blev han i 1926 valgt til *Fellow of the Royal Society* (F.R.S.), en fin engelsk hædersbevisning.

Med sin undervisning ved Manchester, samt sine mange administrative poster, vandt han høj anseelse blandt sine kolleger og studenter, og han opbyggede mange venskaber i Manchester. Han mødte også kvinden 'Margot' Scott³⁴, som han to år senere skulle blive lykkelig gift med, og Milne nød sine tre og et halvt år på det moderne universitet [77, s.205].

Han arbejdede videre med atmosfærisk ionisering, og viste nu hvordan koncen-

³¹Se [47] (oversættelse fra forfatterens tale til Niederrheinischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde i 1870).

³²Dette arbejde varede fra omkring 1924 til 1928. Se fx artiklerne [13] og [15].

³³Milnes student William Hunter McCrea beskrev senere forskellige aspekter af denne teori i [117, s.214].

³⁴Margaret Scott (født Campbell) blev kaldt 'Margot'.



Figur 1.7: E.A. Milne som F.R.S. i 1926.

trationsbegrebet, som han og Fowler hidtil havde benyttet sig af i deres ligning (1.2), kunne erstattes af det samlede antal af ioniserede atomer over stjernens fotosfære. Han relaterede ioniseringsantallet til et veldefineret mål for intensiteten af de tilhørende spektrallinier, og dette medvirkede til den første kvalitative teori om den såkaldte *absolute størrelsesklasses* effekt på liniernes intensiteter. Fotosfærelagenes fysiske tilstand blev dermed udsat for en hidtil uset og grundig analyse, og hans arbejde kom herved til at stimulere astrofysikkens efterfølgende udvikling. Milne blev desuden optaget som æresmedlem og sekretær ved *Manchester Literary and Philosophical Society* i 1927. Han fortsatte også sine undersøgelser af stjerneatmosfærer, og det mangeårige arbejde inden for feltet kulminerede i 1929 med hans *Bakerian lecture*, en forelæsning, som blev udgivet med titlen ”The structure and opacity of a stellar atmosphere” [17].

Samme år som brylluppet fandt sted, blev Milne som 32-årig ”fuld af beklagelse”³⁵ udpeget til den første Rouse Ball professor i matematik ved det gamle universitet i Oxford, og han modtog samme år et fellowship ved Oxfords Wadham College, som han kom til at besidde resten af sine dage. Professoratet er opkaldt efter den engelske matematiker og matematikhistoriker Walter William Rouse Ball (1850-1925), og professorstolen blev etableret ved Rouse Balls testamente, som i 1925 bl.a. efterlod 25.000 £ til Oxford, ”til en matematiker, som Rouse Ball håbede ikke ville ignorere matematikkens historiske og filosofiske aspekter” [120, s.315]. Lærerstolen besiddes i dag af den kendte og anerkendte matematiske Roger Penrose. Oxfords

³⁵[77, s.205].

videnskabsmænd så øjeblikkelig denne velgørenhed som en mulighed for at ansætte en højtestimeret teoretisk fysiker, som kompenstation for den eksisterende dominans af 'rene' matematikere blandt de andre professorater. Da stillingen blev bekendtgjort i marts 1928 blev det bestemt, at en teoretisk fysiker skulle have stillingen. Milne var den eneste ansøger, og han blev enstemmigt valgt til at besætte posten i januar 1929. Valgkomitéen bestod af Hardy og den engelske fysiker Frederick Alexander Lindemann, og de var helt enige om at placere Milne i Oxford. Hardy, fordi Milne jo havde været en af hans yndlingsstuderende ved Trinity College, og Lindemann, fordi han var desperat efter at sikre stolen til en matematiker, der kunne være nyttig for stedets mange fysikerne. Milne var det perfekte valg. Han var ung, en begavet og udmærket matematiker, en astrofysiker som havde forelæst i bølgeteori i Cambridge, og han var jo den daværende Beyer professor i anvendt matematik i Manchester, hvor han havde fortsat sin forskning i stjerneatmosfærer.

Det var kun hans faktiske udpegelse der drev ham til Oxford. Han havde egentlig afslået kandidaturet efter at være blevet kraftigt anmodet til at søge stillingen, men havde dog alligevel indsendt ansøgningen. Oxford var trods alt et fint sted at være professor, og dette gjorde stillingen meget attraktiv. Milnes beklagelse skyldtes imidlertid, at han jo som følge af det tildelte professorat naturligvis måtte forlade Manchester, byen som han holdt så meget af, og i stedet flytte med Margot til Oxford. De havde netop købt, istandsat og møbleret et hus og var derfor mere til sinds at tilbringe en længere periode der. Milne blev overrasket over udvælgelsen, fordi han anså både Fowler og Darwin for at være mere oplagte kandidater til stillingen end han selv. Oxford Universitetet var overlegent i forhold til Manchester hvad angik friheden til at fravælge administrativt arbejde, og det gav ham mulighed for at forske i teoretisk astrofysik så meget som han lystede, og familien flyttede således til den gamle by i januar 1929.

Milnes geografiske placering og sociale omgangskreds havde hidtil gennem karrieren indvirket på hans valg af forskningsområder. I sine første professionelle år i Cambridge var de fleste af Milnes kolleger dybt involverede i kvanteteoretiske spørgsmål, og Milnes arbejde afhæng, som vi har set, i høj grad af den nye atomfysiks anvendelser i hans astrofysiske spektralundersøgelser. Da han senere flyttede til Manchester, arbejdede han dels videre med lignende uafsluttede opgaver, som han havde medbragt fra Cambridge, dels havde han professoratets administrative forpligtelser i universitetsafdelingen at passe. Desuden blev han jo gift i 1928, og han havde således alt i alt meget at se til i Manchester-perioden. Da han sammen med Margot flyttede til Oxford i 1929, blev han som nævnt fri til at opfylde sine egne akademiske ønsker, uddover en begrænset arbejdsbyrde i form af undervisning, og det var nu, at hans individuelle synspunkter om den matematiske fysikers rolle i videnskaben begyndte at vise sin effekt i hans arbejde.

1.5.1 Målene med teoretisk fysik

Inden Milnes tid ved Cambridge kom til sin afslutning, arbejdede han, som nævnt, i Hills afdeling som matematiker og fysiker. Afdelingen husede en stor andel af de fremmeste matematikere i landet, som skulle undersøge ballistik og *sound ranging*. Under dette arbejde udviklede Milne et stærkt engagement i algebra, og engagementet levede med ham resten af livet. Milne studerede med stor grundighed Whitehead og Russell's *Principia Mathematica* [91], hvorfra han kunne recitere flere længere tekststykker, og hans kendskab og hengivelse til Whitehead og Russells axiomatiske matematik medvirkede til at forme hans senere konstruktion af teorier samt måske også til hans filosofiske syn på den teoretiske fysiks praksis og formål.

Gennem Milnes første videnskabelige arbejder med teoretisk astrofysik, og senere hans bredere arbejde som astronom bl.a. ved Cambridge-observatoriet, med visse forpligtelser af mere praktisk art, fremelskedes en videnskabsfilosofisk overbevisning, som senere skulle vise sig at provokere og splitte et helt nyt videnskabeligt samfund, nemlig de relativt få fysikere og astronomer, som beskæftigede sig med universets storskalastrukturer. Den moderne kosmologi blev lagt på et filosofisk fundament, som i høj grad udsprang af reaktioner på Milnes heterodokse ideer. Han lagde allerede grunden til sine filosofisk-metodologiske synspunkter ved sin tiltrædelsesforelæsning i 1929, som professor i Oxford, med titlen "Målene med teoretisk fysik"³⁶. I talen fremførte han en metodologisk position, der dengang ikke var typisk for den britiske opfattelse af den naturvidenskabelige metode. Den gængse metode havde en solid basis i Galilei og Newtons empirisk-induktive metode til frembringelsen af fysiske teorier og naturlove. Milne indledte med at referere til de teoretiske videnskabers fremmarch i Europa og Amerika, og skrev om de unge mænd, der hengav sig til denne branche [16, s.5]:

They are comparatively unfamiliar with the insides of laboratories. Many of them would have difficulties in distinguishing between the positive pole of a battery and the negative, and practically none could put a complicated piece of physical apparatus into adjustment. Yet it is from them that the new ideas have come. From their investigations have been born many of the concepts which dominate physics to-day. How have they done it? And what are they after?

Milne besvarede selv spørgsmålet om den teoretiske fysikers ædle mål, idet det ganske enkelt var at "forfølge sine undersøgelser fordi han ikke kan lade være, og fordi han nyder at gøre det" [16, s.13], og han må have overrasket sine tilhørere, idet han fortsatte:

³⁶Originaltitlen er: "The aims of mathematical physics" [16], men min oversættelse af 'matematisk fysik' til 'teoretisk fysik' forklarer ved forskellen mellem kontinental og britisk sprogbrug. Milne nævner selv i teksten den forskellige nomenklatur [16, s.4].

The greatest role of the mathematical phycisist is, however, the conjecturing of laws of nature, where he rises superior to the hypotheses with which he has been presented, and to satisfy some mathematical yearnings suggests a new hypothesis as one worth testing. The new hypothesis may be directly inspired by mathematical symbolism.

Milne tillagde dog den eksperimentelle verifikation en vis værdi, idet den nye hypotese jo kunne vise sig at være ”værd at teste”. Det er bl.a. denne bekræftelse af en tese, der adskiller den ’matematiske fysiker’ fra den ’rene’ matematiker. Forskellen kunne også defineres, som Milne senere gjorde det, at fysik, i modsætning til matematik, involverer tiden: ”En essential forskel mellem et kinematisk teorem og et geometrisk teorem er, at det første involverer referencer til temporale forskelle [...]. Det er nødvendigt at gå fra statiske teoremer til bevægelsesteoremer” [37, s.356].

Gennem adskillige eksempler redegjorde han for de mangfoldige felter af fysikken, som ikke var baserede på empirien. Han gav deskriptive forklaringer på klassiske områder og fænomener, som kunne beskrives ved differentialligninger, der igen udspredt af ren matematisk tankegang, og han nævnte en række fysiske eksempler som opspændte strenge, Gibbs’ matematiske idé til partielle differentialkoefficenter, eller ’ikke-observerbare’ størrelser i termodynamiske systemer. Han fortsatte med elasticitetsteori, Maxwells forskydningsstrøm, Newtons love, analytisk-mekaniske principper som Lagranges variationsprincip, d’Alemberts princip og Hamiltons ligninger. Videre nævnte han moderne eksempler, så som Einsteins gravitationslov, de Sitters kosmologi og kvantemekanikken. Milne understregede dog, at den teoretiske fysiker ikke ”dikterer hvordan verden skal være”, men at han ”bliver vejledt af matematiske former til at fremsætte forslag til eksperimentalfysikeren. Hans [den teoretiske fysikers] specielle rolle stopper her. Eksperimentalfysikeren bestemmer” [16, s.9]. Det var således vigtigt for Milne at pointere, at han ikke måtte fejlfortolkedes, at han bestemt *ikke* anså den teoretiske fysiker for at være hævet over den eksperimentelle fysiker, selvom man nogen gange kunne opleve, at ”den teoretiske fysiker anser sig selv for at være et overlegent væsen sammenlignet med eksperimentalfysikeren. Jeg håber og tror, at han ikke selv tror dette” [16, s.10].

Milne anlagde ved foredraget en falsifikationistisk position vedrørende forholdet mellem observation og teori, idet naturen trods alt var den endelige dommer, og han sluttede sin tale af med en præsentation af sit syn på den videnskabelige metode på sit eget specielle felt, teoretisk astrofysik [16, s.26-28]:

The method [...] is to suggest hypotheses and see if they predict results in agreement with observations. But I have already said that observation can never confirm our hypotheses, it can only disprove them. It is the prime business, then, of theoretical astrophysics to suggest not only one hypothesis in any given field, but many. [...] It is of little importance in the first instance whether the models reproduce nature or not. [...] [Theorems] will be discovered quite naturally by the study of idealized models; they will never

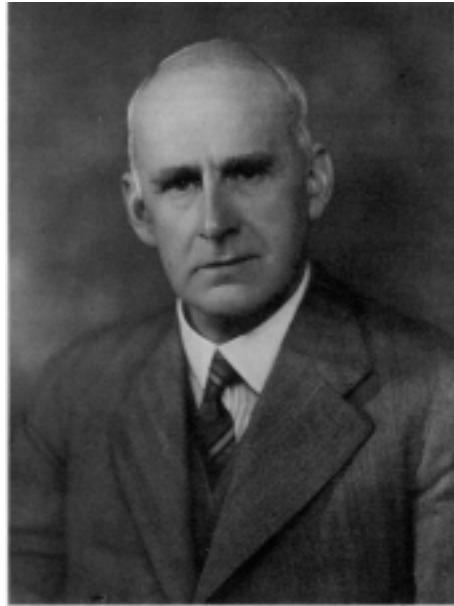
be discovered by explicitly seeking to account for observations. Only so can theoretical astrophysics claim the respect of its parent-sciences.

Talen var en skuffelse for eksperimentalphysikene i Oxford [120, s.316]. Milne gjorde det klart, at for ham handlede teoretisk fysik om idealiserede modeller for naturen, som den kunne tænkes at være, modeller, der aldrig kunne opdages blot gennem observationer, og han afslørede ved denne tiltrædelsesforelæsning sine rationalistiske tilbøjeligheder. For Milne måtte teoretisk fysik baseres på streng matematik og han beklagede anvendelsen af sjuskede eller *ad hoc* matematiske metoder til opnåelse af fysisk interessante resultater. Lindemann blev derfor snart skuffet over Milne, som forblev tro over for sin beklagelse, og således ikke var til stor nytte for de eksperimentelle fysikere, som Lindemann ved sin udpegelse af den første Rouse Ball professor havde forventet.

Det var synspunkter som de nævnte, forlenet med den rationalistiske hypothetiskdeduktive metodologi, der nogle år senere blev årsagen til kontroversen mellem de empiriske induktivistre på den ene side og de hypothetisk-deduktive fortalere på den anden. Milne foretrak teoretiske undersøgelser med meget få generelle fysiske betingelser som udgangspunkt, ud fra hvilke resten af arbejdet så bestod i matematisk deduktion. Milnes student, og senere kollega og nære ven, William McCrea, skrev i en nekrolog om Milne, at der ”ikke er nogen tvivl om, at Milne ikke havde hang til undersøgelser der krævede anvendelse af detaljerede data” [118, s.423]. Milne fik altså frihed til at styrke sin hypothetisk-deduktive opfattelse af naturvidenskabelig praksis. I den ’anden fase’ af Milnes forskningskarriere, som altså tog sin begyndelse med flytningen til Oxford, gav han sig de næste godt fem år i kast med et nyt aspekt af astrofysikken, teorier for stjerners strukturelle opbygning. Han anså dette nye område for at være så essentielt for moderne astrofysisk forskning, at han allerede i 1930 foreslog en plan for opførelsen af et nyt ’Institut for Kosmisk Fysik’, men han var ingen ’akademisk entreprenør’, og hans idé forblev en drøm. Han havde trods alt forladt Manchester dels for at undgå administrative forpligtelser, og det kan tænkes, at han ikke hårdnakket forsøgte at gennemtvinge sine ’byggeplaner’ pga. det omfattende universitetsbureaucrati. Sammen med fysikeren Plaskett lykkedes det dem imidlertid at gøre Oxford til et velkendt og vigtigt center for astrofysik i 30’erne. I 1930 var Milne iøvrigt medforfatter til en lærebog i fire bind, *Handbuch der Astrophysik* [2], med to lange kapitler om hhv. stjerners termodynamik og teori for pulserende stjerner.

På Milnes nye astrofysiske felt udviklede han i løbet af de følgende år en teori om stjerners struktur, baseret på en konstruktiv kritik af den kendte astronom Eddingtons (1882-1944) matematiske pionerarbejde indenfor området. Denne kritik mundede ud i den såkaldte ’Eddington-Milne-kontrovers’, som bliver skitseret i det følgende afsnit³⁷.

³⁷For en grundigere gennemgang af kontroversen henvises til [7, s.23-31], [67, s.33-45], [100, kapitel 7], [118, s.432-435] og [131, s.119-138].



Figur 1.8: Sir Arthur Eddington (1882-1944).

1.5.2 Eddington-Milne kontroversen

Milne og Eddington var ikke enige om hvad man kunne vide om en stjernes udstråling. Eddington havde længe arbejdet med teoretiske gasmodeller for stjerner, og hævdede, at han var i stand til at beregne *luminositeten* L for en stjerne med en given masse M , uden at vide noget om kilden til den udsendte luminositet. Luminositeten er defineret ved den totale strålingsflux, stjernen sender ud i rummet i alle retninger³⁸. Eddington opstillede en fysisk gasmodel for stjerner, og beregnede luminositetsværdier, som var i god overensstemmelse med de fleste observerede værdier af L . Den gjaldt dog ikke for hvide dværgstjerner, idet han ikke var i stand til at gøre rede for deres beskedne observerede luminositetsværdier.

Milne var uenig i Eddingtons synspunkt, og var overbevist om, at M og L måtte behandles som uafhængige variable, hvis man ikke kendte til kilden, der forårsagede strålingsudsendelsen. Han anskuede derfor problemet derhen, at den centrale opgave måtte være at beregne de eksisterende ligevægtsforhold i stjernen, med *givne* L - og M - værdier. Desuden var han overbevist om at have fundet en fejl i Eddingtons arbejde, og drog flere overraskende konklusioner som følge af sine nye beregninger. Konklusioner, som besynderligt nok styrkede ham i sin tro på, at han nu ”stod på grænsen til de største ting i hans karriere” [118, s.433]. Blandt hans overraskende resultater var nye numeriske værdier af visse stjerners indre temperaturer og

³⁸Luminositeten er altså $L = 4\pi r^2 \mathcal{F}$ for en sfærisk stjerne med radius r , der udsender sin stråling isotrop, med den totale flux \mathcal{F} . Se endvidere appendix B.3.

deres radier. Beregninger for visse stjernetyper resulterede i centraltemperaturer på omkring 10 billioner grader, og de største værdier for stjerners radier var ifølge udregningerne på flere lysår! Disse fantastiske resultater fik tilsyneladende ikke Milne til at overveje, om han kunne have taget fejl. Tværtimod arbejdede han de næste par år ivrigt videre med sin teori, og udgav omkring tyve artikler med resultaterne af omfattende matematiske udregninger. Han diskuterede hvor meget information det er muligt at have kendskab til om en stjernes indre forhold, og sammenlignede i diskussionerne sin teori med relevante observationer. Hvor Eddington havde gjort var, at løse den såkaldte *Emden*-differentialligning; men Milne havde indset, at der uddover Eddingtons singulære løsning var uendeligt mange andre løsninger til ligningen, som Eddington ikke havde overvejet. I sin biografi om den engelske fysiker og astronom James Hopwood Jeans, som blev udgivet posthumt i 1952 [7, s.25-31], gjorde Milne rede for disse tidlige meningsforskelle samt sine egne bidrag til diskussionen i 1930. Han følte, at både Eddington og Jeans misforstod de oplagte konsekvenser, som burde være draget af Eddingtons pionerarbejde. Endvidere mente Milne, som nævnt, at have indset sandheden, men han var ikke i stand til at overbevise de to ”titanner” [100, s.64].

Hele debatten blev opsummeret i tidsskriftet *The Observatory* februarnummer i 1931, som resumerede et møde den 9. januar i Royal Astronomical Society (RAS). Ved mødet diskuterede Milne sine synspunkter med blandt andre Eddington, Jeans og Hardy, som havde udpeget Milne til Rouse Ball professoratet. Divergerende synspunkter blev kridtet op, og diskussionen førte ikke til nogen konsensus. Milne troede ikke, at Eddington havde ret i sin antagelse om, at gaslovene gør sig gældende gennem hele stjernen. Han konstruerede derfor selv stjernemodeller, i hvilke gaslovene kun gælder nær overfladen, og hvor forskellige tilstandsligninger samler stoffet nær stjernens centrum. Under Eddingtons resumé af kontroversens problemer, undrede han sig imidlertid over Milnes skråsikkerhed og manglende tro på observationernes klare indikationer af, at det var Eddingtons løsning der var den rigtige, og han yttede sin uforbeholdne mening om Milnes position: ”Professor Milne befinner sig imellem djævlen og det dybe vand, eller rettere imellem mig og det dybe vand” [67, s.36]. Det har da også senere vist sig, at Milnes ideer måtte vige for Eddingtons, bortset fra tilfældet med de hvide dværge.

Hvide dværge er tætte ’stjernerester’, nemlig resultatet af millioner af års brint og heliumforbrænding i visse stjernetyper. Til sidst kollapser stjernen, efter en dramatisk bortkastning af sine ydre atmosfærerlag, og ender som en lille, svagt lysende dværgstjerne. Eddingtons model kunne som nævnt ikke gøre rede for dværgenes lave udstråling, men her slog Milnes teori til gengæld til. Teorien gjorde brug af statistisk mekanik i degenereret stof, og formåede faktisk at give en rimelig, teoretisk beskrivelse af forholdene i hvide dværge³⁹. Teorien inspirerede senere blandt andre Chandrasekhar til den nu veletablerede teori for kompakte stjerner. Ifølge McCrea

³⁹Se Milnes ’Halley forelæsning’ fra Oxford i 1932, [21].

[118] og senere Douglas [100] kunne Milne eksplisit have udelukket de tilfælde, som også Eddington udelukkede, nemlig de mange andre løsninger til *Emdens* ligning, og dermed have bekræftet Eddingtons resultater af den relevante løsning til ligningen. Dette havde dog krævet, at Milne var rede til at vende sine egne argumenter, en noget uforventetlig handling fra Milnes side nu, da han netop var så overbevist om sine egne synspunkter.

Det tolv sider korte resumé af mødet er underholdende og spændende læsning, og som det yderligere fremgik af mødet, kommenteredes Milnes forslag til en forbindelse mellem himmelens nova-fænomen og en stjernes pludselige kollaps: ”[...] overgangen fra en almindelig stjerne til en hvid dværg ville være diskontinuert, og Milne antyder med sit forsigtige forslag, at nova-fænomenet kan være en sådan overgang”⁴⁰. Det ser altså ud til, at Milne var den første til at foreslå denne bratte overgang som en del af udviklingen i visse stjerners liv; et forslag, som i dag er en fastslået bestanddel af den veletablerede teori for stjerneudvikling.

Eddingtons stjernemodel har udviklet sig meget siden mødet i Royal Astronomical Society, og selvom Milne ikke direkte deltog i dette efterfølgende forløb, bidrog han i det mindste med sit indgående kendskab til de krævende matematiske beregninger som modellerne gjorde brug af.

Milnes tendens til at opbygge rationelle teorisystemer irriterede de folk, der havde forventet at bruge ham til at finde specifikke matematiske løsninger til fysiske og astrofysiske modeller. Hans omdømme bredte sig imidlertid både i England og internationalt, og han blev en eftertragtet gæsteforelæser. Milne besøgte forskellige europæiske uddannelsesinstitutioner for at tale om sine specialer, og han og Plaskett inviterede adskillige kendte fysikere til Oxford for at tale og udveksle ideer, heriblandt Albert Einstein og Chandrasekhar. Milne modtog i 1931 en invitation fra den kendte kvantefysiker Erwin Schrödinger, der gerne ville høre astrofysikeren forelæse ved Berlins Universitet og han rejste også udenlands i foråret 1932, til Einstein Instituttet i Potsdam, hvor han tilbragte nogle måneder. Her fik han lejlighed til at diskutere med Einstein og astronomen Erwin Finley Freundlich, og bl.a. disse diskussioner udgjorde kimen til Milnes næste atten års hengivne og frugtbare, teoretiske arbejde. Milne havde samme år, i et majnummer af *The Times*, læst et indlæg af Sir James Jeans om det ekspanderende univers, som provokerede ham til startskuddet for de nye kosmologiske ideer, som vi i næste kapitel skal beskæftige os med. Under opholdet i Tyskland holdt han forelæsninger på tysk i bl.a. Potsdam, Göttingen og München, og han besøgte sidst på året ”Hjærtet [sic] af det Land, hvor den spektroskopiske Teori tog sin Oprindelse” [22, s.1]. Milne henviser til Niels Bohrs København, hvor han var inviteret af Astronomisk Selskab til at fortælle om ”Solens atmosfære som en typisk stjerneatmosfære” [ibid.]. Det blev et gennemgående træk ved Milnes præsentationer af sin metodologiske position, at

⁴⁰Citatet er fra en fodnote til mødereferatet [67, s.42], hvor RAS-formanden og medredaktøren for *The Observatory*, W.M.H. Greaves, iøvrigt refererede til Milnes redegørelse for sit forslag, i decembernummeret, 1930.

han sammenlignede teoretisk fysik med geomtri, og ved sit foredrag i København fremlagde han også dette forhold i relation til den teoretiske astrofysiker [22, s.5]:

[...] hans Arbejde er lige saa strengt og saa disciplineret som en Geometrikers, hvis Arbejde det er at skaffe sig Læresætninger, der logisk følger af et veldefineret Sæt Aksiomer. Den teoretiske Fysikers Arbejde er at drage Slutninger. At udskille en nyttig Model lykkes kun lejlighedsvis ligesom Udskillelsen af et nyt produktivt Sæt Aksiomer [...]. Han er ikke i første række interesseret i Problemet, om hans Model svarer til "Virkeligheden".

Det bemærkes at dette citat minder meget om visse passager fra Milnes tiltrædelsesforelæsning (se s. 24), som han gav tre år tidligere.

Milne boede under sit ophold i Danmark hos den kendte, unge astronom Bengt Strömgren og hans kone. Milne var meget imponeret over Strömgrens store naturvidenskabelige evner, og skrev i et takkebrev til Strömgren fra det tyske Einstein Institut [144, Milne → Strömgren]

I must also say to you how much I admire the completeness and extent of your knowledge of astronomy, indeed all physical science, at so young an age.
The future before you is brilliant, and I wish you all success.

Godt to år senere, i februar 1935, modtog Milne en af højest mulige priser og tilkendegivelser en astronom kan få, nemlig Royal Astronomical Society's Guldmedalje, som en velfortjent belønning for sit frugtbare "arbejde med strålingsligrægt og teori om stjerneatmosfærer"⁴¹. Det fremgår af Milnes bibliografi⁴², at han fortsatte sine undersøgelser af stjerners stråling og strukturelle opbygning helt frem til 1937, men antallet af artikler om emnet faldt drastisk allerede fra 1932. Mens samtlige af hans artikler handlede om stjerner og relaterede astrofysiske emner frem til 1932, aftog andelen af disse altså i den efterfølgende tid, og fra 1938 skrev Milne kun artikler om kosmologi og sin kinematiske relativitetsteori.

Som det har fremgået, er det veldokumenteret at Milne med sin store indsats medvirkede til afgørende ændringer i den gængse viden om stjernernes fysiske konfigurationer, opførsel og egenskaber. Han udvidede kendskabet til mange astrofysiske begreber med sine teorier om stjerners stråling og fungerede (i det mindste) som katalysator for fremkomsten af teorien for stjernestruktur. Sammen med Ralph Fowler forandrede han den spektroskopiske astrofysics metoder, og frembragte ved revideringen af Sahas ligning en original fremgangsmåde til bestemmelse af stjerners temperatur- og trykforhold. Den nye metode involverede teorien om den statistiske fordeling af atomer i forskellige ionisationsstilstande og spillede en afgørende rolle for astrofysikkens viderede udvikling. Milne var desuden ophavsmand til de astrofysiske ligninger, der bærer hans navn i dag og han var den første til at foreslå en

⁴¹Se [77, s.204] samt fotografiet i figur 1.9.

⁴²Se fx den omfattende, men ikke fuldstændige bibliografi i [118, s.438-443].



Figur 1.9: Guldmedaljevinderen Edward Arthur Milne. Billedet var på forsiden af martsnummeret af *The Journal of the British Astronomical Association*, og fotografiet blev taget til formålet af Margaret Milne.

sammenhæng mellem himlens nova-fænomen og visse stjerners diskontinuerte kollaps til hvide dværge. Allerede ved sin tiltrædelsesforelæsning i Oxford afslørede han sin hang til rationalistisk deduktion fra generelle hypoteser til specielle sætninger af astrofysisk relevans, og det var sådanne synspunkter, der snart skulle dukke op i kosmologien.

Kapitel 2

Milnes kosmofysik

Dette kapitel vil behandle den specielle del af kosmologien, der tog sit afsæt i slutningen af første verdenskrig, da Albert Einstein udgav sine kosmologiske overvejelser over den almene relativitetsteori, og som endelig blev forsynet med empiriske data i 1929. Den etablererede fraseologi, der bruges om denne 'nye kosmologi', vil jeg også anvende her, hvor jeg indledningsvis sammendrager den moderne kosmologis første åndedrag. Kapitlet vil redegøre for de udslagsgivende årsager til fødslen af Milnes kosmologi, som også er blevet kaldt kosmofysik, og manifesterede sig hos Milne gennem en kortvarig inspiration. Efter beskrivelsen af denne vil jeg vil lægge op til analysen af hans kinematiske relativitetsteori, som bliver behandlet i alle sine vigtigste aspekter. Teoriens deduktive, nærmest geometriske struktur og axiomatik vil vise sig ved den lange argumentationsrække af definitioner og konklusioner, der gennemsyrede Milnes logisk konsistente program.

Jeg vil i det følgende beskrive og analysere den kinematiske relativitetsteoris begreber, som blandt andre det kosmologiske princip, substratet, Milnes tidsskalaer samt hans behandling af gravitationskonstanten G . Endelig vil jeg redegøre for omgivelsernes første reaktioner på teorien, og udrede Milnes videnskabelige betydning for den nye kosmologi.

2.1 Fremkomsten af moderne kosmologi

Den moderne kosmologi har sine rødder i almen relativitetsteori samt i den amerikanske astronom Edwin P. Hubbles opdagelse af det lineære forhold mellem galaksernes afstande og deres spektrale rødforskydninger. Einstein havde med indførelsen af gravitationskraften i sin teori fra 1916 udvidet den specielle relativitetsteoris beskrivelsesdomæne, og havde relateret to ontologisk forskellige entiteter, nemlig rumti-

dens geometri og det fysiske, gravitationelle stof i sine berømte feltligninger¹

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}.$$

Feltligningerne er et sæt ikke-lineære, anden ordens differentialligninger, som gør det muligt at beregne gravitationsfeltet fra en given energi-impuls-fordeling af materielt stof. Einsteins kosmologiske løsning til feltligningerne i 1917 blev næsten øjeblikkelig modsvaret af den hollandske astronom Willem de Sitter, som foreslog en anden løsning. Begge løsninger var imidlertid observationelt utilfredsstillende, Einsteins fordi den foreslog et fyldt kosmos, de Sitters fordi den antog et tomt univers. Begge modeller var desuden statiske, dvs. de forudsagde ingen nettobevægelse af kosmos. Den russiske fysiker og matematiker Alexander Friedmann fremsatte i 1922 en ikke-statisk løsning til feltligningerne, som blev ignoreret af næsten alle. Einstein bemærkede dog løsningen, men afviste den som værende ukorrekt - en handling han senere fortrød. Friedmanns ekspanderende løsning, beskrevet ved den kendte Friedmann-ligning, har dog et andet udseende i dag end dengang, eftersom ingredienserne i ligningen er dels Einsteins feltligninger, dels Robertson-Walker metrikken, som dengang endnu ikke var fundet. Friedmanns ligning var dengang stort set baseret på Einsteins feltligninger med den kosmologiske konstant, se appendix C.1.

Året senere vendte Hubbles observationer af Andromedagalaksen om på det kosmologiske verdensbillede, idet man hidtil havde forestillet sig universet som én stor galakse. Hypotesen om ø-universet vandt indpas og lagde *Big Galaxy*-hypotesen bag sig². Det blev klart, at universet ikke blot var én stor mælkevej, men bestod af et stort antal øer, dvs. galakser, hver bestående af milliarder af stjerner. I 1927 kom den belgiske fysiker og præst Georges Edouard Lemaître med et forslag, der mindede om Friedmanns. Løsningen beskrev et univers der ekspanderer asymptotisk fra tilstanden i Einsteins statiske model til tilstanden i Friedmanns ekspanderende model fra 1922.

På den observationelle front havde den amerikanske astronom Vesto M. Slipher i 1925 målt spektralforskydninger af 45 stjernetåger, hvoraf 41 var rødforskydninger. I 1929 fremlagde Hubble empiriske resultater af sine spektrale galakseobservationer ved det amerikanske Mount Wilson observatorium. Han afbildede galaksernes tilsyneladende radialhastigheder som funktion af deres afstande, og mente at kunne påvise en lineær korrelation. På trods af en vis modstand overfor hans slutninger, blev resultatet alligevel generelt accepteret, og i 1931 blev den berømte Hubble-lov endelig cementeret, efter at Hubble i samarbejde med den amerikanske astronom Milton Humason producerede mere omfattende empiriske data, der underbyggede den lineære korrelation. Lyset fra galakserne viste en spektral rødforskydning, som blev fortolket som en Doppler-forskydning, og man sluttede, at galakserne havde en tilsyneladende hastighed v væk fra jorden. Loven siger, at denne tilsyneladende

¹Se en forklaring af de indgående størrelser i appendix C.1, se også Einsteins artikel [58].

²Debatten om ø-universer behandles i [107] og i [113, s.3-21].

radialhastighed er proportional med galaksernes afstand r , med proportionalitetsfaktoren $H(t)$, den såkaldte Hubble-parameter. Med andre ord er hastigheden en linær funktion af afstanden

$$v = H(t)r.$$

Det skal bemærkes, at rødforskydningen ikke skyldes et Doppler-skift, som følge af galaksernes bevægelse i universet, men at den er et resultat af en ekspansion af universet, som beskrevet af Robertson Walker-metrikken (se appendix C.3). Forvirringen omkring datidens forsøg på at bestemme, hvorvidt det var denne relativistiske geometriske forklaring eller den klassiske Doppler-forklaring der var den rette, udsprang iøvrigt af, at forskellen mellem de to forklaringer krævede så store rødforskydninger, at det ikke var observationelt muligt at detektere en sådan forskel, eftersom de observerede rødforskydninger dengang var relativt små.

I 1929 fremsatte den amerikanske matematiker Howard Percy Robertson to geometriske hypoteser om universet. Den første angik muligheden for at separere rumtiden i et rum og en derpå ortogonal tid, mens den anden hypotese sagde, at rumtidens spatiale del skulle være isotrop og homogen på stor skala. På disse præmisser udledte han det mest generelle linieelement på formen

$$d\tau^2 = dt^2 - e^{2f(t)} d\zeta^2,$$

hvor $f(t)$ var en vilkårlig reel funktion af tiden, og $d\zeta^2$ var en metrik med konstant krumning, uafhængig af tiden [78, s.822]. Denne generelle metrik for et homogent og isotropt univers fik indirekte betydning for Milnes kosmologi, som vi snart skal se.

Sir Arthur Eddington genopdagede nu Lemaîtres model, og ideen om et ekspanderende univers blev efterhånden bredt accepteret. I 1931 producerede Hubble og Humason som nævnt overbevisende evidens for den simple lov, og fandt en kvantitativ værdi for proportionalitetsfaktoren. Dette var helt nyt for kosmologien, der indtil da ikke havde haft datamateriale, som med rimelig sikkerhed indicerede en kosmisk storskaldynamik, og slet ikke en regularitet af ovennævnte art. Den nye og friske empiriske antydning af et ekspanderende univers, samt den efterfølgende brede accept af Hubbles lov var et meget vigtigt fremskridt for kosmologien. Dette andet kvartal af det tyvende århundrede blev en tid med store begrebsmæssige og videnskabelige forandringer, og opfattelserne af den moderne kosmologi forgrenedes og viste sig ved megen polemik af filosofisk art.

Fra omkring 1929 og op i trediverne anså man altså to forhold for at være helt basale for en teori om universet. For det første, at fordelingen af ekstragalaktiske objekter til en første approximation er lokalt homogen og isotrop. For det andet, at galakserne bevæger sig væk fra os og fra hinanden med hastigheder som er proportionale med deres indbyrdes afstande, som beskrevet ved Hubbles lov. Diskussionen af disse to forhold inden for rammerne af Friedmann og Lemaîtres relativistiske modeller, som blev populariseret af Eddington, gav det indtryk, at almen relativiteteori var nødvendig for at inkorporere disse forhold i en sammenhængende teori.

Men denne opfattelse overdrev relativitetsteoriens rolle, og Milne var i sin ret til at gøre det klart, at de anførte forhold havde en langt simplere alternativ forklaring, der ikke krævede brugen af nogen bestemt gravitationsteori.

2.2 Milne trækker gardinet fra

To måneder inden RAS-mødet i begyndelsen af 1931, hvor trakasserierne mellem Milne og Eddington udspillede sig, var der i *Nature* en usigneret anmeldelse af den amerikanske kemiker og fysiker Richard C. Tolmans artikelrække, der var udgivet under titlen "World physics and its time relations". Artiklerne behandlede problemet om eksistensen af ikke-statiske løsninger til Einsteins feltligninger. Anmeldelsen fyldte godt en halv side og skribenten kritiserede Tolmans beskrivelser af forskellige stjernefænomeneres forbindelse med universets udvidelse. Anmelderen sluttede af med at bedyre, at "hele diskussionen er imidlertid særdeles stimulerende, og vil sikkert bidrage til at fremkalde mere nøjagtige og omfattende observationer af de fjerneste stjernetåger [dvs. galakser]" [18]. Læseren bliver muligvis overrasket over, at det var vores 34-årige astrofysiker Milne, der anmeldte Tolmans artikler; men Milne refererede imidlertid selv til denne korte anmeldelse i en lang og teknisk artikel, der blev udgivet godt to år senere i *Zeitschrift für Astrophysik*³.

Milne havde med andre ord eksplisit udvist en klar interesse for kosmologi allerede i slutningen af 1930, en datering der ikke findes nævnt i anden sekundær-litteratur. Eksempelvis har George Gale og John Urani åbenbart ikke opdaget Milnes reference i det tyske tidsskrift, idet de skriver: "Yet even more remarkable is the apparent complete and total disinterest Milne had hereforeto shown for any and all cosmological topics. In his letters as well as his published works, prior to the 1932 article [20] cosmology gets no mention" [101, s.69]. Gale og Niall Shanks har heller ikke opdaget uoverensstemmelsen, idet de skriver: "He [Milne] had been totally silent in the topic before, during and after the BA meeting⁴. Milne's silence ended abruptly" [104, s.286]. Disse udsagn kan således ikke retfærdiggøres som værende passende eller gyldige. Det må dog anføres, at Milnes anmeldelse efter alt at dømme udgjorde hans eneste udgivne kosmologisk relaterede materiale inden han hengav sig til den nye disciplin i foråret 1932.

Det er således dokumenteret, at Milne allerede fra slutningen af 1930 havde kommenteret den relativistiske kosmologi, og der skulle kun gå halvandet år før hans endelige retningsskift. Selvom Milne havde læst Tolmans artikelrække og fundet den "særdeles stimulerende", havde han jo ikke formuleret sine egne kosmologiske tanker, men blot læst og kritisert Tolmans synspunkter. Milne kritiserede fx Tolmans ide om, at værdien af Hubbleparameteren, som var udledt af galaksernes rødforskydning,

³Milne skrev i en fodnote: "I have partly discussed Tolman's papers in an unsigned review in *Nature* [18]", [23, s.27].

⁴Dette møde omtales nedenfor.

kunne være forbundet med tempoet for energiudviklingen i stjerner [18]:

One is naturally tempted to make the criticism that the rate of annihilation of matter must be governed by the physics of the energy-generating process in stars, and so is surely a different physical phenomenon from the recession of the nebulae, implied by such considerations as those of stability and symmetry in the universe.

Milne mente ikke, at energiomdannelsen i stjerner kunne tilskrives årsagen til galaksernes bevægelse, og var skeptisk over for Tolmans sammenblanding af de fysiske fænomener. Hans vurdering af Tolmans ideer er således efter alt at dømme det første publicerede vidnesbyrd vi har om hans beskæftigelse med kosmologien, men det var først i foråret 1932, at hans egen originale kosmologi skulle vise sig for offentligheden.

Inden da havde han formodentlig ingen kosmologi, og han fortsatte i 1931 med at skrive forskellige teoretiske artikler om termodynamik og stjernestruktur på sit kontor i Oxford. Han tog desuden del i adskillige møder og var blandt andre inviteret til årsmødet for *British Association for the Advancement of Science* (BAAS)⁵; her skulle mødedeltagerne diskutere universets udvikling. Til trods for at Milne var omgivet af entusiastiske talsmænd for den 'nye kosmologi', berørte han overhovedet ikke kosmologiske emner i sit bidrag til diskussionen, men resumerede i stedet sine ideer om forbindelsen mellem hvide dværges udvikling og nova-fænomenet [19]. BAAS-mødet medvirkede til at etablere en accept af et ekspanderende og krumt univers blandt de fleste af mødets deltagere, og det er givet, at Milne havde fulgt kosmologiens udvikling, selvom han ikke explicit bidrog til den.

Lemaître og de Sitter præsenterede deres modeller og Lemaître fremsatte nu sin nye 'fyrværkeri'-teori. Jeans accepterede denne teori, som indledte et begrebsmæssigt skift for videnskaben, nemlig opfattelsen af, at universet kunne tænkes at have haft en begyndelse. Den kosmologiske hypotese, som Lemaître foreslog i 1931 var faktisk det første eksempel på det, der senere blev kendt som big bang kosmologi, se fx [112]. Ifølge Jeans rejste Lemaîtres model i øvrigt et aldersproblem, fordi datidens astrofysiske modeller forudså stjernealder, som var langt højere end den af Lemaître foreslæede alder for universet. Men også Eddington tog del i de store kosmologiske spørgsmål.

Eddington var en meget populær autoritet i kraft af et kosmologisk pionerarbejde og velskrevne behandlinger om videnskab og filosofi. Han var fascineret af Einsteins almene relativitetsteori, som havde overbevist ham om, at den eneste mulige måde, at studere fysikken på det mest fundamentale niveau, var ved hjælp af tensorregning. Endvidere lå det ham meget på sindet at give en forklaring på naturkonstanternes størrelser, snarere end at acceptere dem som eksperimentelle data. Eddington

⁵Mødet fandt sted den 29 september og flg. deltagere var, udover Milne, med til diskussionerne: Jeans, Lemaître, de Sitter, Eddington, Robert A. Millikan, J.C. Smuts, E.W. Barnes (biskop af Birmingham), Herbert Dingle (deltog og redigerede et supplement til *Nature* [49]), McCrea, George C. McVittie og Sir Oliver Lodge.

foreslog, at konstanter som finstrukturkonstanten og forholdet mellem protonens og elektronens masse, forholdt sig til kosmologiske størrelser, og han anså det såkaldte kosmiske tal, N , som det vigtigste i denne sammenhæng. N er antallet af protoner eller elektroner i det observerbare univers og er anslættet til værdien $N \approx 10^{79}$. Eddington mente at N var relateret til andre naturkonstanter, og hans program var et forsøg på at deducere numeriske værdier fra dimensionsløse kombinationer af naturkonstanter ved hjælp af epistemologiske overvejelser, samt at forbinde disse værdier med det kosmiske tal, se fx [114, s.220]. Eddingtons projekt var stort og ambitiøst i ønsket om at rekontruere fysikken, og som Milne talte han for deduktivisme idet han tog udgangspunkt i aprioriske principper, ud fra hvilke man ved rationel tankevirksomhed kunne deducere sig frem til videnskabelig viden om naturen.

Den moderne kosmologi var endnu ikke en særlig udbredt disciplin. Faktisk var 'populationen' i det kosmologiske samfund på verdensplan begrænset til omkring et dusin universitetsansatte og deres studerende og langt størsteparten af disse var med til efterårsmødet i BAAS, som af visse videnskabshistorikere regnes for at konstituere den moderne kosmologis fødsel⁶. Kosmologiens repræsentanter havde ingen professionel identitet og udgjorde en hybrid af forskellige, beslægtede naturvidenskabelige fagområder.

Om end Milne havde tilkendegivet sin skepsis over for Tolmans 'verdensfysik', var Milnes røst dog anonym, og alt tyder altså på, at han ikke havde udviklet nogen teoretiske alternativer til de kosmologiske hypoteser, der verserede ved BAAS-mødet samt i de videnskabelige tidsskrifter, såsom *Nature*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Zeitschrift für Astrophysik* og *Quarterly Journal of Mathematics* m.fl. Men i forsommeren 1932 udformede han kimen til sin helt nye og kontroversielle kosmologiske teori, som kom offentligt til udtryk i det første juli-nummer af *Nature*. Hans to sider korte artikel var en synopsis over en forelæsning, som han gav på Wadham College i Oxford den 7. juni. Forelæsningen angik en ny og simpel universmodel og var en direkte reaktion på en skarp debat, som i maj måned havde udspillet sig i avisens *The Times*. Dagbladet resumerede den 10. maj 1932 Jeans' Ludwig Mond-forelæsning med titlen "The new universe", og startede herved en debat i sine spalter under titlen "The universe". Forskellige angreb på, og forsvar for, den nye ekspansionsteori repræsenterede dele af befolkningens videnskabelige interesse for de nye resultater, som blev ivrigt debatteret i avisens gennem ca. halvanden måned. Også andre anerkendte fysikere deltog med indlæg, bl.a. Lord Rayleigh, Lindemann, Dingle og Lodge⁷.

Debatten opstod, da en Stephen Coleridge havde skrevet til avisredaktøren, og rettet en kraftig kritik mod de nye begreber om krumt og ekspanderende rum, fordi de var oplagt modsigende og uanskuelige forestillinger, og fordi "Jeans postulerer teorier, der utvivlsomt strider mod fornuften" [87, d.14/5]. Jeans besvarede kritikken

⁶McCrea bedyrede i et interview til George Gale, at det bestemt var rimeligt at hævde, at netop dette møde kunne tillægges en sådan betydning, [104, s.283].

⁷Se fuldstændig optegnelse over medvirkende debattører i [87].

med, at det krumme, ekspanderende rum simpelthen var et videnskabeligt faktum! Desuden havde han under sin forelæsning proklameret, at vi sikkert aldrig skal få at vide hvorfor universet udvider sig. ”Denne viden er sandsynligvis uden for vores rækkevidde for evigt” [87, d.10/5]. Disse videnskabeligt realistiske og pessimistiske udsagn var uacceptable for Milne, som følte sig provokeret og stimuleret til at tænke sagen igennem på egen hånd, og dette blev startskuddet til hans heterodokse projekt. Han beskrev fremkomsten af sine nye ideer i et brev til sin bror Geoffrey: ”Jeg blev besøgt af 10 dages inspiration”, og at ”det var som at trække gardinet fra” [104, s.286]. Hans indsigt skyldtes åbentbart noget der kunne ligne en åbenbaring.

Denne pludselige indsigt betød skabelsen af hans teoretiske alternativ til almen relativitetsteori, og som Milne videre skrev i brevet om sin nye teori [104, s.286]:

[...] it destroys at one swoop much of the recent much-advertised work of Einstein, Jeans and Eddington, gives the only satisfactory (philosophically satisfactory) picture of the universe and of the content of reality which I am acquainted with, destroys time and space as legitimate objective conceptions and brings the light of cold reasoning into the fantastic medleys of thought created by Jeans and Eddington.

Men hvad var det da, Milne havde indset? Hvad var det for en kontroversiel konkurrent som kunne besidde en sådan kraft, at den ligefrem var i stand til at udslette de fleste hævdvundne hypoteser og samtidig forsyne videnskaben med et unikt verdensbillede? Et kort og internalistisk svar på spørgsmålet går som følger. Milnes teori tilbød en matematisk og filosofisk simpel kosmologisk forklaring af samtidens empiriske resultater, en forklaring, som udsprang af fysisk enkle begyndelsesbetingelser, og som hverken fordrede et ekspanderende eller krumt rum. Det er vigtigt at skelne mellem den relativistiske kosmologis ekspansion *af* rummet og Milnes forslag om en ’ekspansion’ af galakserne *i* et uendeligt rum. Begrebet ’universets ekspansion’ havde således en dobbelt betydning alt afhængig af om den opfattedes som en udvidelse af rummet i et vacuum, eller som en bevægelse af galakserne væk fra hinanden, ud i et uendeligt, tomt euklidisk rum.

At en teori skulle være simpel havde i lang tid været en betydningsfuld egenskab for Milne, der allerede i sine foredragsnoter til CUNS-klubben skrev om teoriers simpelhed og skønhed [app.A, s.108].

I regard beauty as a word of knowledge, or rather as being the only knowledge worth having. I see no reason to suppose that the truth, nature itself, reality itself should be simple. I merely regard simplicity as being the best substitute we can get for truth, and as being the only one worth aiming at. I do not discourage ugliness or complexity because they are likely to be wrong, but because they are offensive.

Dette synspunkt er dog hverken originalt eller synderligt kontroversielt, og eksempelvis vil de fleste teoretiske fysikere i dag skrive under på denne opfattelse af betydningen af simpelhed i teorier. Denne simpelhed, der for Milne tydeligvis udgjorde

et betydningsfuldt og æstetisk tiltalende kriterium for teorivalg, viste sig overraskende i hans nye teori, og forlenede ham øjensynlig med den betragtning, at hans ideer ville reformere fysikken og ændre opfattelsen af tid og rum. Startskuddet til hans kosmologiske program, den såkaldte *Kinematiske Relativitetsteori*, blev affyret under forelæsningen på Wadham College, og resumét blev udgivet i *Nature* med titlen ”World structure and the expansion of the universe” [20]. Hans artikel affødte øjeblikkelige reaktioner, som i begyndelsen generelt var positive over for Milnes nye begreber, men som snart viste sig at skabe store meningsdivergenser med hensyn til videnskabens eksistentielle og metodologiske spørgsmål. Men også de substantielle, fysiske aspekter af den opståede teori blev en stor udfordring for videnskabens kosmologiske samfund.

2.3 Kinematisk Relativitetsteori

Milnes første udkast til sin nye kosmologiske model gjorde op med de hidtidige og samtidige spekulative teorier, som søgte at forklare spektralforskydningsfænomenet, der fortolkedes som Hubbles lov. I sin artikel lagde Milne ud med at opsummere disse relativistiske forklaringer, som blev givet af Friedmann og Lemaître. Forklaringerne antog eksistensen af en kosmisk tid og var, ifølge Milne, ikke i stand til at forklare hvorfor rummet ekspanderer og ikke kontraherer. Han anså det for at være problematisk, at den kosmiske tid var ’koblet fra rummet’, at tiden og rummet var adskillelige.

Milne nægtede at betragte tiden som en fjerde dimension, og indførte i stedet, for hver observatør, et privat, euklidisk, fladt rum og en tid der aflæses på dennes ur. Det er dog bemærkelsesværdigt, at han samtidig accepterede speciel relativitetsteori, som kan beskrives ved firedimensionale vektorer, se fx. appendix D.1. Denne enkle anskuelse om fladt rum undgik opfattelsen af tiden som den fjerde dimension, som anvendes af de relativistiske teorier, og Milne mente at tiden i disse teorier mistede sin helt fundamentale unikke og retningsbestemte forøgelse. Milne betragtede fysikkens fire-dimensionale verdenslinier som statiske og ’frosne’, og han mente den relativistiske spatialisering af temporale begivenheder fordunklede sædvanlig fysisk fortolkning. Begrebet ’rumtid’, der anvendes i konventionel relativitetsteori, var for Milne at se unødig kompliceret, og opløsningen af rumtiden i rum og tid, som fx Robertson foreslog allerede i 1929, var blot at underlægge sig unødvendig meget besvær, idet ”verdensbilledet opnås meget lettere ved at fastholde den almindelige fysikers beskrivelsesform af partikler i bevægelse” [6, s.73].

Milne anførte endvidere, at Einstein og de Sitter, kort tid forinden havde konkluderet, at det inden for de daværende teknologiske begrænsninger for observationel nøjagtighed endnu ikke var muligt at bestemme fortegnet på rummets krumning, k (se appendix C.2). Einstein og de Sitter havde sammen udgivet en artikel i 1932, hvor de skrev, at der ikke var nogen direkte observationelle beviser på en krumning af

rummet, og at det derfor var vanskeligt at udlede både et fortegn og en værdi af denne krumning ud fra observationelle data. De åbnede derfor muligheden for at ”repræsentere de observerede data uden overhovedet at tage rummets krumning med” i teorien [59, s.213]. Einstein og de Sitter udledte en ligning for systemets dynamik, som i dag kan udtrykkes ved den moderne Friedmann-ligning for skalafaktoren $a(t)$ (med $\Lambda = 0$):

$$\dot{a}(t)^2 + k = \frac{8\pi}{3}\rho a(t)^2. \quad (2.1)$$

Friedmann-ligningen relaterer skalafaktorens tidsvariation med stoftætheden og universets geometri, og modellen repræsenteredes, hos Einstein og de Sitter, ved denne ligning, hvis rummets krumning, k , sættes lig med nul.

Disse teoretiske muligheder har sandsynligvis passet Milne fint, eftersom han nu tilbød en ”meget simpel forklaring af fakta”. Denne forklaring lagde således rummets krumning og begrebet om et ekpanderende rum bag sig, og betragtede i stedet ”de observerede fjerne tågers bevægelser [som] virkelige bevægelser i euklidisk rum” [20, s.9]. Formålet med hans program var at beskrive stof og bevægelse i universet, at optælle galakser og fastlægge hastigheder, og metoden var i sit udgangspunkt kinematisk. Dynamiske begreber spillede således ingen rolle i hans teori, i hvert fald til at begynde med, og begreber som kraft, masse, impuls og energi optrådte ikke i hans ligninger. Energibegrebet blev dog senere indlemmet som et vigtigt element i argumentationen for at omdefinere afstandsbegrebet ved hjælp af lyssignaler, som vi snart skal se, men det optrådte altså ikke eksplisit i hans formler.

Gennemgangen af Milnes teoretiske program vil i det følgende undtagelsesvis være anakronistisk for til gengæld at give en sammenhængende redegørelse for indholdet af hans ideer, der naturligvis udviklede sig over mange år, og han skrev selv om opbygningen af det samlede program i sit sidste større værk med titlen *Modern Cosmology and the Christian Idea of God*⁸:

Naturally one does not begin by first stating a programme of this kind and then processing to carry it out. One constructs the programme *a posteriori*, after experience of a large number of detailed investigations. One attempts to press forward at a variety of points on the extensive front separating the empirical from the deductive, and only after a number of partial successes and failures [...] does one dare to formulate definite programmes of advance along the whole line.

⁸Bogen blev udgivet posthumt i 1952, og indeholder en deskriptiv og velstruktureret gennemgang af hans forskningsprogram. Gennemgangen af hans kinematiske relativitetsteori vil her følge formen i [6], fordi den præsenterer teorien sammenhængende og tilgængeligt. Citatet er fra [6, s.30].

2.3.1 Det kosmologiske princip

Milnes nye arbejde blev hovedsagelig skabt i Oxford i maj måned 1932, og takket være økonomisk støtte fra Rockefeller Foundation besøgte han som nævnt Einstein Instituttet i Potsdam, hvor Freundlich forsynede ham med ”sin store viden om relativitets-litteratur” [23, s.5]. I Potsdam afsluttede Milne nu en 95 sider lang, teknisk artikel til udgivelse i *Zeitschrift für Astrophysik* med samme titel som *Natureteksten*, og her gav han den første grundige gennemgang af sit nye program. Artiklen tog udgangspunkt i det *kosmologiske princip*, som visse steder forbides med Milnes navn, men Milne nævnte selv oprindelsen af princippets grundlag allerede på artiklens side 2 i ’*Zeitschrift*’. Han beskrev her fremgangsmåden for udviklingen af en ordentlig universmodel, der tog udgangspunkt i de *observerede* galaksebevægelser. Han gjorde det klart, at det var nødvendigt at introducere en observatør i modellen, før man overhovedet kunne spørge om universets materielle indhold [23, s.2]:

An observer is necessary in order to describe ”what is”. The presence of the observer necessarily differentiates out particular properties of the spatio-temporal distribution of matter and motion [...]. The world then appears to be centred round the observer wherever he be [...], provided he chooses his frame of reference so that he is at rest with respect to his immediate surroundings.

Denne løsning tilfredsstillede en betingelse, som Einstein havde postuleret i 1931, hvor han skrev: ”Alle Stellen des Universums sind gleichwertig”⁹. Einsteins princip sagde med andre ord, at alle punkter i universet på stor skala er ækvivalente. Dette betyder at universet, på stor skala, antages at være homogent og isotrop om hvert punkt, men Milne omformulerede princippet til: ”Universet ser ens ud for alle observatører”, og han præcicerede det yderligere, idet [23, s.5]

not only the laws of nature, but also the events occurring in nature, the world itself, must appear the same to all observers, wherever they be, provided their space-frames and time-scales are similarly oriented with respect to events which are the subject of observation.

Med ’verden’ mente han ikke verden til et givet øjeblik, men den totale mængde af alle begivenheder. Disse ideer døbte han ’det udvidede relativitetsprincip’, men allerede i hans første større bog *Relativity, Gravitation and World Structure* [3] ændredes navnet til ”det kosmologiske princip”, og selvom Einstein ikke tillagde princippet samme mening som Milne, refererede Milne ofte til ”Einsteins kosmologiske princip” [3, s.60].

Milne forsvarerede imidlertid sin særegne fortolkning af princippet, idet han fandt den bredt accepterede sprogbrug om ’homogenitet’ upassende og ikke tilstrækkeligt dækkende. Derfor forfægtede han udvidelsen af princippet. For Milne at se var homogenitet nært forbundet med antagelsen af en absolut, kosmisk tid, idet

⁹ Berlin Sitzungsber. d. Press. Akadamie d. Wissenschaften (1931), s.235.

den sædvanlige opfattelse af begrebet handlede om sammenligninger af tæthedener i forskellige rumpunkter. Men hvis tæthedensfordelingen ændrer sig med tiden, mente Milne at begrebets definitionen krævede, at tæthedens i to regioner måtte være ens, på samme tid; men dette indebar en verdensomspændende samtidighed for alle observatører, og dette anså han for at være yderst problematisk. Derfor valgte han altså at udvide principippet til i stedet at tale om ”tæthedshistorien” i tid og rum, som for én observatører måtte svare til tæthedshistorien i samme tid og rum, erfaret af en anden observatør.

Milne fremhævede eksplisit at hans artikel på ingen måde var en kritik af Einsteins almene relativitetsteori, selvom den kinematiske relativitetsteori undlod at gøre brug af den. Han accepterede også alle kinematiske aspekter af den specielle relativitetsteori fuldt ud, og brugte dem i stort omfang. Hvad han derimod kritiserede, var både Einsteins og de Sitters tidlige statiske løsninger af det kosmologiske problem, samt alle aktuelle ikke-statische løsninger. Kritikken var ikke formuleret i en fjendlig ånd, men ville snarere blot klarlægge hvordan kinematiske relativitetsteori forholdt sig til de eksisterende teoretiske behandlinger på det kosmologiske marked.

Det kosmologiske princips etymologi er beskrevet i bl.a. Gale og Urani [105, s.351], der fremfører, at Robertson var den første der brugte navnet ”det kosmologiske princip”. Også i Gale og Shanks [104, s.287] fremgår det af en fodnote, at navnet ”næsten sikkert” stammer fra Robertsons kritiske analyse [79] af Milnes artikel i ’Zeitschrift’. Men navnet figurerer imidlertid ikke i artiklen nogen steder, og Robertson refererede i [79] blot til principippet med den samme sprogbrug som Milne selv havde anvendt, nemlig ”det udvidede relativitetsprincip”.

Milne navngav i 1950 selv opfinderen af ’det kosmologiske princip’ [6, s.68]:

I originally deduced this model for the universe by applying a principle, used by all cosmologists, in a novel way which has led to much misunderstanding. This principle, for which my friend Erwin Finley Freundlich coined the term ’cosmological principle’, states, that models proposed for the universe should have a property which may be loosely called ’homogeneity’.

Her henviste han altså til den upassende brug af homogenitetsbegrebet, og det nævnte citat viser iøvrigt at Gale, Shanks og Urani ikke har ret i deres formodninger.

Det var ikke ukendt for Milne, at den italienske dominikaner Giordano Bruno i slutningen af det 16. århundrere allerede havde formuleret det kosmologiske princip som blot et af sine mange, på den tid, kætterske udsagn om universet. Filosoffen Bruno, der blev en emblematiske figur for den kopernikanske revolution, agiterede for et uendeligt univers befolket af uendelig mange verdener, med stjerner, hver omkredset af deres egne planeter og med en homogen fordeling af himlens stof. Milne konstaterede en vis lighed mellem opfattelsen af Brunos og sit kosmologiske princip, idet han refererede til forskellige angreb på dette. Eksempelvis skrev den engelske fysiker og videnskabsfilosof Herbert Dingle i sin første reaktion på Milnes kinematiske

relativitetsteori: "It appears, then, that the extended principle of relativity has no *a priori* claim of acceptance. We have already seen that there are no grounds of observation for adopting it" [50, s.179].

At flere fysikere anskuede Milne som en kætter, var en opfattelse hos Milne, der blot affødte hans sammenligning med Brunos heterodokse ideer [6, s.71]:

If it is a scientific heresy to use the cosmological principle in the way I originally used it, then I was in good company in using it [... The] arch heretic, Giordano Bruno also held the cosmological principle [...] he was, of course, burned at the stake in 1600.

Det kosmologiske princip har en lang forhistorie, i det mindste tilbage til det 14. århundrede. Den franske teolog og naturfilosof Nicole Oresme udtrykte allerede i midten af 1300-tallet, at det ikke er muligt med direkte sanseerfaringer at afgøre, hvorvidt vi lever med en roterende himmelkugle eller med en roterende jord. Oresme argumenterede for at al bevægelse er relativ, og han gav udtryk for ideer om universets opbygning, der i indhold minder om det kosmologiske princip.

2.3.2 Substratum: Verdens underlag

Det fysiske udgangspunkt for den simple kinematiske verdensmodel er et begrænset, kugleformet område i et uendeligt, tomt, euklidisk rum, som kort efter tiden $t = 0$ er befolket af jævnt fordelte, frie partikler, med vilkårligt fordelte hastigheder. Milne antog, at partikeltætheden var så lav, at indbyrdes kollisioner ikke ville forekomme, samt at vekselvirkningskræfter imellem partiklerne var negligible. Han sammenlignede dette kinematiske system med naturen ved at lade partiklerne repræsentere galakser, og systemet eksisterede første efter $t = 0$, som således angav den kosmogoniske begivenhed for det fysiske univers. Uden for kuglen er rummet tomt, men i løbet af nogen tid vil partikler med udadrettede hastigheder befolke stadig større volumener i rummet, og de hurtigste vil til ethvert tidspunkt t forme en ekspanderende, sfærisk grænsefront. Partikler med indadrettede hastigheder i den oprindelige kugle vil med tiden bevæge sig gennem denne og dukke op på den anden side med udadrettede hastigheder, og der vil med tiden ske en udtynding af partikeltætheden, eftersom hastighederne vil sorteres efter størrelse. Milne navngav denne verdensmodel ved den latinske betegnelse *substratum*, som kan oversættes med verdens underliggende basis, eller underlag.

Ethvert system af ikke-kolliderende partikler, der i et endeligt volumen bevæger sig med statistisk fordelte, relative hastigheder v , må generelt, med tiden t , bestå af partikler, hver med tilbagelagte, relative afstande $r = vt$. Opfatter man, som Milne gjorde, disse partikler som galakser, og fortolker man den reciproke tid, t^{-1} , som Hubbleparameteren $H(t)$, da fås Hubbles lov, $v = H(t)r$. Milne påpegede en vigtig forskel mellem sin dynamiske bevægelseslov for galakserne og den relativistiske ekspansionslov, idet han anså de simple, første ordens differentialligninger for

væsensforskellige. I Milnes teori sagde bevægelsesloven, at $\frac{dr}{dt} = \frac{r}{t}$, mens differentialligningen for det ekspanderende rum istedet var $\frac{dr}{dt} = kr$, hvor k er konstant i rum-tiden. Udsagnet om denne påståede forskel [23, s.9] synes dog ikke velbegrundet, som det også fremgår af appendix C.3, idet proportionalitetsfaktoren $k = H$, som beskrevet, netop ikke er konstant, men afhænger af skalafaktoren, som igen afhænger af tiden.

Dette system må naturligvis betragtes som en yderst simplificeret model af det fysiske univers, fordi der helt ses bort fra gravitationskraften. Hver galakse flygter bort fra de resterende galaksers tyngdefelt, og med tiden vil al indbyrdes gravitationel tiltrækning formindskes jævnt for engang at approximere en mængde af frie galakser i et åbent univers. Milne ræsonnerede, at i dette tilfælde ville de relative hastigheder blive jævne, og ved at negliger tyngdekraften var det således muligt at få indsigt i universets tilstand, med Hubbles lov som universets karakteristiske egen-skab. Det synes oplagt at spørge, hvordan Milne da forklarede kuglefrontens første udvidelsesfase tæt på tiden $t = 0$, hvor galaksernes indbyrdes gravitation må have været enorm. Dette spørgsmål blev besvaret af den kinematiske relativitetsteori på en kontroversiel måde, som det vil fremgå af kapitel 2.3.7.

Milnes axiomatiske system af fysiske og matematiske definitioner og antagelser var metoden, hvormed han opnåede viden om de fysiske love. Han tog udgangspunkt i energibegrebet, som han definerede ved mekanisk arbejde, ”med mindre energi er et udefinerbart begreb” [6, s.34]. Da mekanisk arbejde defineres ved skalarproduktet mellem kraft¹⁰ og afstand, var det derfor et helt essentielt kriterium for en ordentlig fysisk teori at kunne redegøre for begrebet ’standard meteren’, men ikke ved hjælp af stive legemer. ”For underinddelinger af en standard meter-stav kræver et inddelingsredskab og multiplikation af meterstaven fordrer transport af det stive legeme” [6, s.34]. Problemet med denne afstandsdefinition var, at Milne i denne sammenhæng anså begrebet om transport af et stift legeme for at være udefinerbart. ”Vi kan ikke sige hvad vi mener med at spørge, om et givet ’stift’ længdemål skal forblive ’uændret i længde’ når vi flytter det fra et sted til et andet; for vi har ingen længde-standard på det nye sted” [6, s.35]; vi ville altså overalt være nødt til at specificere såkaldte *standards of rest*. Desuden anså Milne ordet ’definition’ af standardlængden for at være upassende, fordi det ikke var ”en proposition med indhold. [...] En axiomatisk definition skal være en proposition som kan gøres til basis for [logiske] slutninger, fx som en del af en syllogisme” [6, s.35].

Milne foreslog derfor en anden definition, der baseredes på observerbare størrelser, nemlig lyssignaler. Han introducerede begrebet om ’observatøren’, som han identificerede med en partikel. Hver partikel svarede altså til en hypotetisk observatør, der hver var forsynet med sit eget ur [3, s.25]. Observatøren antages at have en bevidsthed om temporale begivenheder, om før og efter. Den mest fundamentale viden om naturen var for Milne en basal, individuel intuition om før og efter, om

¹⁰Det skal bemærkes at Milne selv brugte ordet ’kraft’ [6, s.34], om end hans teori som udgangspunkt var kinematisk.

tidens gang, og det var på dette grundlag man måtte etablere en meningsfuld afstandsdefinition, og derved, gennem det mekaniske arbejde, nå til en beskrivelse af energibegrebet. Observatøren var dog ikke nødvendigvis explicit bevidst om begrebet 'tid', som noget der går, men snarere havde observatøren evnen til at erfare, hvorvidt to begivenheder følger efter hinanden eller er samtidige. Denne understregning af tidserfaringens helt basale og intuitive karakter er en parallel til den franske filosof Henri Bergsons tidsbegreb om absolut og dynamisk tid, om tidsoplevelser som den mest fundamentale basis for alle andre oplevelser¹¹.

Milne refererede flere steder til Whitehead og Russell i sin argumentation for en abstraktion af begivenhedsbegrebet til en kontinuert følge af punktbegivenheder, der hver især ikke har nogen varighed eller temporal udstrækning. Disse punktbegivenheder eller øjeblikke i observatørens erfaring udgør et "velordnet, overalt tæt, lineært kontinuum", en tidslinie, som specielt kan korreleres med de reelle tal [6, s.37]. Med hensyn til observatørens tidserfaring af to på hinanden følgende begivenheder, fremsatte Milne en korrelationsform, hvor der til hvert øjeblik, der erfares af oberservatøren, svarer et reelt tal med den egenskab, at hvis t_1 og t_2 er to reelle tal svarende til to punktbegivenheder E_1 og E_2 , da er t_1 mindre hhv. større end t_2 , hvis E_1 sker før hhv. efter E_2 , og $t_1 = t_2$ hvis E_1 og E_2 er samtidige. Han repræsenterede denne korrelationsform ved et *vilkårligt graderet ur*. Ethvert virkeligt ur eksemplificerer denne definition, og er forsynet med sin specielle gradering. Graderingen af ure var et vigtigt element i Milnes projekt, eftersom metoden ledte til en ny og original tidskonvention, der skelner mellem en global tid for universets evolution og en lokal tid for 'vor fysiks' naturlove. Grunden til at Milne anså brugen af ure for at være mere fundamental end brugen af længdeskalaer var, at uret er forbundet med begivenhederne 'to tider på samme sted', mens længdeskalaens rumkoordinater vedrører 'to steder på samme tid'. Eftersom den specielle relativitetsteori foreskriver, at to observatører generelt ikke kan opnå konsensus om samtidighed af begivenheder med forskellige rumkoordinater, var det altså mere elementært at lade ure og tidsstagninger udgøre teoriens 'skelet', så den blot behøvede at tage udgangspunkt i "eksistensen af et ego" [6, s.46].

Opgaven var imidlertid at undersøge hvilken gradering, der kunne identificeres med fysikkens 'jævnt strømmende tid', men dette begreb var forbundet med visse vanskeligheder [6, s.37-38]:

It hardly needs to be mentioned that the concept of uniform time is no self-evident one. [...] A definition of uniform time frequently attempted is to say that it is the time measured by any 'uniformly periodic' phenomenon, such as

¹¹Det er dog vigtigt at pointere, at Milnes og Bergsons tidsopfattelser var helt forskellige derved, at Bergson behandlede to forskellige tider, nemlig 'dynamisk' tid (*durée*) eller sindets tid, som eksisterer uafhængigt af en 'statisk' tid (*temps*), en spatialiseret tid, der er begrebsmæssigt kvantificeret. Se fx min behandling af Bergsons tidsbegreb i [127]. Milne derimod anvendte, som vi skal se, de to tider, 'dynamisk' tid, som var 'fysikkens' lokale tid, og 'kinematisk' tid, som var universets globale tid.

the rotation of the earth, or the vibration of a pendulum or the oscillation of a quartz crystal. [...] We cannot distinguish between what we may be disposed to call a strictly periodic phenomenon and a pseudo-periodic phenomenon in which the period slowly changes. We have no test of uniformity by this route.

Milne mente således ikke, det på nogen måde var muligt at afgøre om et periodisk fænomen virkelig er periodisk eller om perioden kan være tidsafhængig, og dette kunne forklares ved at alle periodiske fænomeners svingningstider fx aftog med universets alder med et meget lille bidrag. Han satte derfor spørgsmålstegn ved, om fysiske konstanter, så som jordens inertimoment, gravitationskraften ved jordens overflade eller elasticiteten i quartz, virkelig er konstante, eller om også disse kunne være tidsafhængige, og søgte derfor et kriterium for at afgøre om naturens mange konstanter virkelig er konstanter eller parametre. Han sammenlignede problematikken med relativiteten af menneskets individuelle og subjektive tidserfaringer [6, s.38]:

But it is notorious that we human beings, at different ages and in different circumstances, attach very different apparent rates to the flow of time, so that there is no hope of agreeing that one particular mode of psychological graduation is uniform. Thus it is imperative to conduct our analysis for as long as possible with the consideration of arbitrary graduated clocks.

Forskellen på den psykiske tid og den tid, fysikeren arbejder med, var også væsentlig for Bergson. Milne havde, som beskrevet, allerede i 1922 læst Bergsons filosofi og gav den en sympatisk kritik.

2.3.3 Lyssignalering

Næste skridt var derfor antagelsen, at to forskellige observatører A og B graderer deres 'tidslige erfaringer' efter hver deres vilkårlige tidsinddeling, samt at observatørerne står i et symmetrisk forhold til hinanden, eller at de to observatører er indbyrdes *ækvivalente*. Afstand er endnu ikke defineret i teorisystemet, og dermed heller ikke bevægelse, men sidstnævnte antagelse handler imidlertid implicit om indbyrdes bevægelse. Ud fra disse præmisser spurgte Milne: "er det muligt at arrangere en situation hvor graderingen af B s ur svarer til graderingen af A s ur, så man kan sige, at A og B er kongruente?" [6, s.39]. Denne situation kræver naturligvis at observatørerne kan kommunikere med hinanden, og dette er helt nødvendigt for overhovedet at kunne tale om sammenligning af ure. Kommunikation kan ske ved afsendelse af lyssignaler imellem A og B , og Milne simplificerede situationen ved blot at forestille sig, at observatørerne kan *se* hinandens ure. Lad nu A udsende et lysglint mod B , og notere tre tidsaflæsninger: Aflæsningen af sit eget ur da hun sender signalet, t_1 ; aflæsningen af B s ur første gang A ser det oplyst ved lysglimtet, \tilde{t}_2 ; aflæsningen t_3 af sit eget ur, da hun ser lyssignalet oplyse B s ur. Disse aflæsninger

er hypotetiske, og vil reelt aldrig finde sted, og Milne understregede at ovennævnte tidsaflæsninger er såkaldte ”acts of perception”, som han beskrev som ”de simpleste og mest elementære man kan forestille sig”¹². Milne antog endvidere at $t_3 > t_1$, hvilket er ensbetydende med en endelig lyshastighed, i overensstemmelse med den specielle relativitetsteoris ene postulat om lyshastighedens konstans.

Milne konkluderede, ved hjælp at det genreflekterede signal (der jo gav anledning til aflæsningen af t_3 og \tilde{t}_2), at med mindre B s ur på en veldefineret måde er graderet *på samme måde* som A s ur, da er det logiske forhold mellem \tilde{t}_2 og t_1 ikke numerisk ækvivalent med forholdet mellem t_3 og \tilde{t}_2 . Hvis nu A gentager sit eksperiment vilkårligt ofte, og hun tegner en graf med \tilde{t}_2 som funktion af t_1 , og en anden med t_3 som funktion af \tilde{t}_2 , da vil disse kurver generelt *ikke* være ens. Nu kan A forsøge sig med forskellige regraderingsfunktioner $f(\tilde{t}_2)$ indtil $(f(\tilde{t}_2), t_1)$ -grafen overlapper med $(t_3, f(\tilde{t}_2))$ -grafen. A s regradering af B s ur har gjort urene kongruente, og hun kan derefter dikttere en regel for regraderingen af B s ur, så det bliver en kopi af A s, og dette er sket over afstand mellem observatørerne uden at de på noget tidspunkt har været i fysisk kontakt.

Milne indførte nu koordinater, så observatørerne kunne fastlægge deres indbyrdes radiale afstand. Med de indførte tider, kan det vises at A vil angive tidspunktet t_2 for lyssignalets ankomst ved B som gennemsnittet

$$t_2 = \frac{1}{2}(t_3 + t_1),$$

målt med A s ur, i overensstemmelse med speciel relativitetsteori. Afstanden r_2 mellem A og B , ved samme begivenhed, må være en afstandsfunktion $\eta_2(t_3 - t_1)$, som er et (positivt) konstant multiplum af sit argument, tidsforskellen. Milne valgte konstanten $c/2$, så afstanden bliver

$$r_2 = \eta_2(t_3 - t_1) = \frac{c}{2}(t_3 - t_1),$$

hvor c er en vilkårlig konstant. Vil A nu beregne middelhastigheden u af lyssignalet, som hun sendte til B , må hun dividere lyssignalets tilbagelagte afstand, r_2 , med tidsdifferencen $t_2 - t_1$, dvs. [3, s.39]

$$u = \frac{r_2}{t_2 - t_1} = c.$$

Det ses let, at den ækvivalente observatør, B , ville finde frem til det samme resultat, under de anførte betingelser, og den indførte konstant c må altså betegne lyshastigheden! I det meste litteratur, efter Milnes behandling fra 1935 af lyssignaleringsteknikken (el. ’radarteknikken’), blev udtrykkene for t_2 og r_2 givet som oplagte definitioner (se fx [93, s.115]).

¹²Se [6, s.40] og [4, s.17].

Det var vigtigt for Milne at pointere, at indførelsen af lysets konstante hastighed blot var en konvention. At det var en konvention er givet, idet påstanden var et resultat dels af *valget* af en konstant afstandsfunktion, $\eta_2(t_3 - t_1)$, dels ved *definitionen*, at ækvivalente observatører konstruerer koordinater på samme måde. Denne konventionelle opfattelse af lysets hastighed var imidlertid hverken ny eller ukendt. Under formuleringen af sin specielle relativitetsteori talte Einstein også om lysets hastighed som en konvention [122, s.155]. Forskellen mellem Milne og Einsteins behandlinger lå snarere i synet på arten af observationer, der talte som de mest grundlæggende. Milne foretrak at tale om transformationer mellem observatører, og ikke om koordinattransformationer, som er grundlaget for almen relativitetsteori. Han anførte at Einsteins relativitetsteori begynder med koordinater som en mulig måde at beskrive begivenheder, der dernæst oversættes til de mulige observationer, som de medfører. Milne mente derimod at man bør ”begynde med observationer, og alle anvendte koordinater vil så være konstruktioner, udført af relevante observatører, eller i principippet udført af dem” [3, s.22].

Milne fremhævede endvidere, at også entiteterne tid og afstand, ”som vi skal kalde koordinater, er rent konventionelle konstruktioner, og giver kun mening i forhold til en bestemt form for urgradering” [6, s.42], og Milne viste, at de tids- og afstandsmål, der i fysiske laboratorier baseres på standardmeteren, faktisk falder sammen med Milnes koordinatkonventioner, når blot graderingsformen reduceres til almindelige ures tidsinddeling.

Milne gik frem på en logisk og stringent måde. Han byggede teorien op stykkevis og forsynede den med belysende eksempler hvor det syntes passende. Han udledte delkonklusioner og resumerede præmisser og konsekvenser, for derfra at springe videre til nye definitioner og resultater, og hans deduktivive fremgangsmåde var bemærkelsesværdig. Meget få gange refererede han til andre empiriske resultater end Hubble og Humasons observationsdata, resten var stort set teori. Det næste nødvendige spørgsmål der dukkede op i tankerækken vedrørte vilkårligheden af graderingen af to relativt bevægede partiklers ure. Han søgte svaret på, hvordan man skulle fjerne denne vilkårlighed, og hvordan observatører kunne forankre deres tidstagninger i bestemte tidsskalaer. For at finde svaret, var det ifølge Milne nødvendigt at konstruere en dynamik, som partiklerne ville adlyde som følge af de vilkårlige ure, og derigennem foreslå en regradering, som kunne bringe den konstruerede dynamik i overensstemmelse med klassisk dynamik.

2.3.4 Den kinematiske ækvivalens

Udgangspunktet for den omtalte dynamik var en fri partikel i det tomme rum, og her viste sig en forbindelse til kosmologien, eftersom partiklen kun ville være fri i en vis forstand, idet den ville udsættes for den gravitationelle tiltrækning hidrørende fra alt andet stof i universet. Milnes program var altså, først at betragte ”en hel hær af kongruente ure, overalt i rummet”, og dernæst ”opstille ’naturlige’ referencesystemer

overalt” [6, s.48]. Fordelingen af disse systemer skulle imidlertid adlyde det kosmiske princip, så der ikke ville være nogen foretrukne lokaliteter i universet. Først når dette arbejde var gjort, ville det være muligt at opskrive en bevægelsesligning for den frie partikel, og dette involverede metoder, som gav hans teori tilnavnet ’hydrodynamisk kosmologi’ [3, s.76].

I stedet for kun at betragte to observatører, udvidede han systemet, og introducerede en uendelig mængde af relativt bevægede observatører $A_0, A_1, \dots, A_n, \dots$, for dernæst at undersøge betingelserne for at forsyne hver af disse observatører med ure, som ikke blot er kongruente med A_0 s ur, men også indbyrdes, parvis kongruente. Han definerede i denne sammenhæng begrebet *en ækvivalens*, som ”den kinematiske entitet, der består af en hær af tidstagere forsynet med kongruente ure” [6, s.51]. Milne sammenlignede ækvivalensen med den euklidiske plangeometris unikke, todimensionale plan. ”Der er kun een plan, som er baggrunden, scenen, på hvilken læresætningerne er gyldige. Tilsvarende er ækvivalensen unik” [6, s.55]. Ækvivalensen kan opfattes som en mængde af ure, der angiver den ’samme tid’, selvom urene generelt ikke nødvendigvis er ’enige’ i hinandens tidsinddelinger; urene står derimod i et symmetrisk forhold til hinanden, som Milne formulerede det.

Milne mente, hans ækvivalens var en perfekt repræsentant for det unikke univers, og han kaldte den et ”kinematisk korpus af relationer” [6, s.55], som besad den vigtige egenskab, at ved en passende valgt graderingsregel (for alle medlemmer af ækvivalensen) kan den transformeres til enhver anden given ækvivalens. Eksempelvis, anførte han, kan ækvivalensen for de jævne relative bevægelser konverteres til en relativ, stationær ækvivalens, ved en bestemt logaritmisk regraderingsregel. Det var dette specielle eksempel, der blev afgørende for Milnes distinktion mellem den globale ’universtid’ og en lokal ’fysisk’, dagligdags tidsskalering. Det skal bemærkes, at regraderingsreglerne konventionelt kunne vælges vilkårligt, og den nævnte transformation til en stationær ækvivalens var blot én mulighed af mange.

Det matematiske middel, som han brugte til udførelsen af disse regraderinger mellem observatører, repræsenteredes ved relationer mellem såkaldte ’signalfunktioner’, som hans student Gerald J.Whitrow kaldte dem [134, kap.5], og de beskriver B s observationer af A s ur og omvendt. De matematiske relationer, der skulle udtrykke alle observatørernes ækvivalenser og urenes indbyrdes kongruens, repræsenteredes altså ved signalfunktioner, $\theta_{pq}(t)$, som angiver lyssignalet mellem observatørerne A_p og A_q . Tiden $\tilde{t}_q = \theta_{pq}(t_p)$ er altså signalets ankomsttidspunkt til A_q (aflæst på A_q s ur), hvor signalet forlod A_p til tiden t_p (aflæst på A_p s ur). Whitrow introducerede i samarbejde med Milne den gruppeteoretiske *genererende funktion* af tiden, $\psi(t)$, og viste at signalfunktionens relationer er kommutatorrelationer, der kan opløses vha. $\psi(t)$, dvs.

$$\theta_{pq}(t) = \psi \alpha_{pq} \psi^{-1}(t),$$

hvor ψ kan opfattes som en operator. Tallet α_{pq} er et reelt, positivt tal, der er karakteristisk for observatørerne A_p og A_q , og som desuden opfylder den transitive

relation $\alpha_{pq}\alpha_{qr} = \alpha_{pr}$ ¹³.

Det var vigtigt for Milne at bevare en vis grad af generalitet så langt som muligt i sine teoretiske argumenter, inden han behandlede eksempler af speciel interesse. Et specialtilfælde var ækvivalensen af partikelobservatørerne A og B , når deres relative bevægelse i x -retningen sker med jævn hastighed v . Milne viste [4, s.30-33], at i dette tilfælde opleves B s ur at gå langsomt, set fra A , og A s ur ser tilsvarende ud til at gå langsomt fra B s synspunkt. I dette eksempel er det funktionen $\psi(t) = t$, der genererer den jævne bevægelses-ækvivalens, idet vi først ser, at $\psi^{-1}(t) = t$, og derfor er

$$\theta_{AB}(t) = \psi(\alpha_{AB}t) = \alpha_{AB}t.$$

Ved simpel algebra lykkedes det Milne at beregne α_{AB} til

$$\alpha_{AB} = \left(\frac{1 + V_{AB}/c}{1 - V_{AB}/c} \right),$$

hvor V_{AB} er en konstant med dimensionerne ms^{-1} , og ved hjælp af α_{AB} udledte han den etablerede tidstransformation [3, s.41-42]

$$t' = \frac{t - V_{AB}x/c^2}{\sqrt{1 - V_{AB}^2/c^2}} \quad (= \gamma(t - vx/c^2)).$$

Det er bemærkelsesværdigt at effekten således er helt i overensstemmelse med tidskoordinaters Lorentztransformation i speciel relativitetsteori, når konstanten V_{AB} identificeres med den konstante, relative hastighed v , mellem to inertialsystemer (se appendix D.1, (D.1)).

Denne ækvivalens karakteriseres ved (1) jævn relativ hastighed, og (2) sammenfald af alle partiklerne til tiden $t = 0$, og man kan sige om dennes egenskaber, at det er tiden, eller tidsgraderingerne, der 'styrer' rummet og al bevægelse deri. Milne anførte, at hvis ikke universet kunne repræsenteres ved en sådan ækvivalens, da ville det ikke være rationelt, og da kunne det ikke beskrives konsistent. Ækvivalensen var således den teoretiske basis for den kinematiske relativitetsteori, fra hvilken universets generelle bevægelsestilstande kunne reduceres til substratets jævne, relative bevægelse, på trods af galaksernes gravitationelle tiltrækning. Om denne fundationale forskel på de relativistiske forklaringer og Milnes alternativ skrev Milne [23, s.10]:

A fundamental difference between explanations of the current "expanding space" type and the kinematic explanation, is that the former attribute the observed expansion to gravitational influences, whilst the latter views the expansion as occurring *in spite of* gravitational influences. The preference for the kinematical explanation is immediate on grounds of simplicity.

¹³Whitrow var den første der udviklede 'signalfunktions-metoden' i 1933 [92]; siden videreudvikledes metoden i samarbejde med Milne. Se en grundig gennemgang af metoden i [64, kap.3] samt [134, s.250].

Milne betegnede naturligt tiden i ækvivalensen ved 'den kinematiske tid', t , og det er i denne tid, universets partikler bevæger sig væk fra hinanden med jævn hastighed, siden skabelsen, der fandt sted til tiden $t = 0$. Men denne ækvivalens kunne ifølge Milne ikke være karakteristisk for 'hverdagens fysik', idet partikler på mindre, eller lokal, skala ikke fjerner sig fra hinanden med jævne hastigheder. Her er rumlige translationer og absolut samtidighed helt almindelige og ubestridelige begreber.

Milne valgte derfor at betragte et andet eksempel, en anden regradering, repræsenteret ved den konventionelt fastsatte funktion $\psi(t) = t_0 \log(t/t_0)$, hvor t_0 er en konstant med tidsdimensioner. Han viste at funktionen $\psi(t)$ genererer en ækvivalens med konstante relative afstande (dvs. $v = 0$) samt en absolut samtidighed¹⁴. Den inverse genererende funktion er nu $\psi^{-1}(t) = t_0 \exp(t/t_0)$, og dermed er signalfunktionen¹⁵ $\theta_{12}(t) = t + t_0 \log \alpha_{12}$, og han udledte altså heraf, at ingen observatører bevæger sig indbyrdes ($v = 0$), samt at $t' = t$, dvs. der er en absolut samtidighed blandt alle ækvivalensens ure. Alle urene er altså ikke alene kongruente, men de er også 'enige' om tidens inddeling.

Nu er det ikke muligt i praksis at konstruere alle disse uendeligt mange graderede ure, eftersom vi ikke kan signalere med fjerne galakser, men Milnes vigtige pointe var, at selve antagelsen af partikernes jævne, relative bevægelse er *ækvivalent* med valget af en bestemt ur-gradering.

2.3.5 De to tidsskalaer

Inden for Milnes system af kinematiske ækvivalenser er det altså muligt at finde urgraderinger, så ækvivalensen kan beskrives som bestående af partikler i jævn, relativ bevægelse under stadig flugt fra et fælles begyndelsespunkt. På den anden side er det samtidig muligt at finde en urgradering, så den samme ækvivalens tilsvareladende består af relativt stationære partikler. Milne fastslog derfor, at vi kan bruge en ækvivalens til at isolere to forskellige tidsmål, t og τ , hvorved det jævnt ekspanderende substratum (i t -tid) kan beskrives som statisk (i τ -tid). Han fremsatte da den mulighed, at netop τ -tiden kan identificeres med "newtonsk tid, fysikkens tid", eftersom "den klassiske dynamiks 'jævne' tid tillader ændringer af skalering og begyndelsespunkt uden at påvirke formen af dynamikkens ligninger" [4, s.36]. Dette så han som et velrettet fingerpeg mod τ -tiden, den 'dynamiske tid', som svaret på den almindelige fysisk tidsmål.

Den dynamiske tid er imidlertid afhængig af t , idet konstanten t_0 optræder i den genererende funktion $\psi(\tau) \equiv t_0 \log t/t_0$, mens den kinematiske tid på den anden side har den simple genererende funktion $\psi(t) = t$, hvor t_0 altså ikke indgår, og Milne argumenterede derfor, at universets globale t -tid var mere fundamental end τ -tiden. Han indførte en tidsskalering, på baggrund af $\psi(\tau)$, som relaterede τ og t , hvor t_0 blev fortolket som 'universets alder', og dette begreb gav kun mening fordi Milne

¹⁴Se også [33, s.298].

¹⁵ $\theta_{pq}(t) = \psi(\alpha_{pq} \psi^{-1}(t)) = t_0 \log (\alpha_{pq} t_0 e^{t/t_0} / t_0) = t_0 \log ((e^t)^{1/t_0}) + t_0 \log \alpha_{pq} = t + t_0 \log \alpha_{pq}$.

mente at t -ækvivalensen ”besidder en naturlig tidsoprindelse, $t = 0$ ” [4, s.37]:

$$\tau = t_0 \log t/t_0 + t_0. \quad (2.2)$$

Ved universets ’skabelse’, $t = 0$, ses det øjeblikkelig, at $\tau = -\infty$, hvilket betyder at den kosmogoniske begivenhed er utilnærmelig på den dynamiske τ -skala. Ydermere er skaleringsformlen (2.2) så bekvemt indrettet, at hvis t_0 som nævnt angiver universets alder, da vil de to skalaer til ethvert tidspunkt $t = t_0$, ethvert ’nu’, være komplet uskelnelige, da $\tau = t_0 = t$. Milnes univers kan således på den ene side klassificeres som et big bang univers ($t = 0$) og på den anden side ikke ($\tau = -\infty$). Her skal big bang univers blot forstås som et univers med en begyndelse, idet selve begivenheden $t = 0$ for Milne ikke havde nogen videnskabelig relevans. Skabelsen var ikke et videnskabeligt spørgsmål.

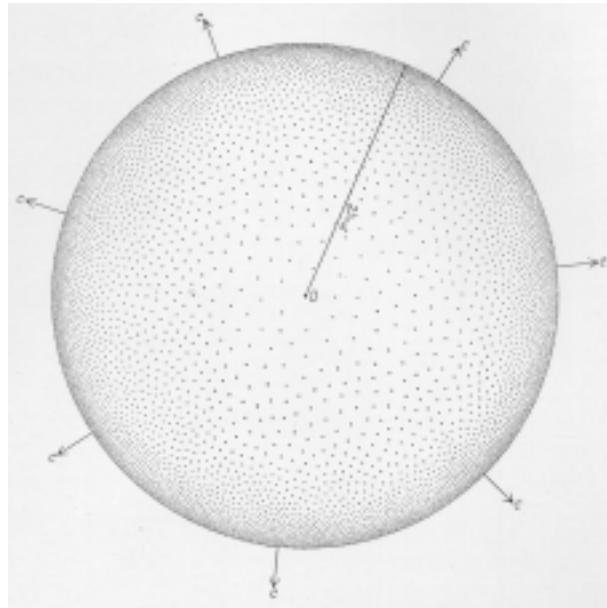
Fremgangsmåden, hvorpå Milne afgjorde betydningen af t_0 , krævede imidlertid bestemmelsen af bevægelsesligningen for den ’frie partikel’ i substratets kinematiske t -tidsmål; men inden han kom så vidt, indførte han en Lorentzinvariant funktion som måtte opfylde det kosmologiske princip, og dette var næste punkt på hans dagsorden.

Milne betragtede populationen af bevægede partikelobservatører A_0, A_1, A_2, \dots . I forhold til A_0 vil hver partikel-observatør have sin egen karakteristiske hastighed, og Milne forestillede sig A_0 notere sig alle observerede hastigheder. I forhold til A_1 må alle de omgivende partikler ligeledes have en bestemt hastighedsfordeling som A_1 også kunne notere sig, og så fremdeles. Det kosmologiske princip siger nu, at der ikke må være noget foretrukket henførelsessystem blandt alle partiklerne, hvilket svarer til den betingelse, at A_0 s noterede hastighedsfordeling er identisk med A_1 s, og A_1 s med A_2 s osv.: Dette må altså gælde for alle referencesystemer. Lad nu O og O' være to partikelobservatører, der bevæger sig med den indbyrdes relative og jævne hastighed $\vec{v} = (v, 0, 0)$. Lad endvidere O angive hastigheden $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ for en vilkårlig given partikel i systemet, og lad O' angive hastigheden $\vec{u}' = (u'_x, u'_y, u'_z)$ for den samme partikel. Hastigheden \vec{u}' er da givet ved den specielle relativitetsteoris velkendte Lorentztransformation af hastigheder, som opnås ved tidsdifferentiering af firevektoren $(t', x', y', z') = (t', \vec{r}')$ (se appendix D.1, (D.1)). Milne identificerede de hastighedsbilleder, som erfares af O og O' , og han udledte en generel ligning for fordelingen af partiklernes hastigheder ([3, s.349-350]):

$$ndu_x du_y du_z = \frac{Bdu_x du_y du_z}{c^3(1 - \vec{u}^2/c^2)^2},$$

hvor n er antallet af partikler med hastighedskomponenter mellem \vec{u} og $\vec{u} + d\vec{u}$, og B er en konstant. Milne argumenterede, at for tilstrækkelig store t -værdier ville der gælde $\vec{u} \approx \vec{r}/t$ og derved fandt han tæthedsfunktionen [3, s.88]

$$\rho(t, \vec{r}) = \frac{Bt}{c^3(t^2 - \vec{r}^2/c^2)^2}. \quad (2.3)$$



Figur 2.1: Milnes grafiske repræsentation af substratet, som altid erfarer af O .

I henhold til Milne, udtaler denne tæthed sig om universets tilstand fra øjeblikket efter den singulære begivenhed $t = 0$, og han fornægtede i denne sammenhæng Lemaîtres forslag om eksistensen af et 'superradioaktivt' atom¹⁶ før $t = 0$, som eksploderede til $t = 0$, og han skrev endvidere om 'begyndelsen': [6, s.58]

We can form no idea of an actual event occurring at $t = 0$; we can make propositions in principle only *after* the event $t = 0$. As for why the event happened, we can only say that had no such event happened, we should not be here to discuss it.

Det ses straks, at tætheden er uendelig stor for ($|\vec{r}| \equiv$) $r = ct$, og Milne beskrev netop substratet som bestående af uendligt mange partikler fordelt med en tæthed i origo af størrelsen $\rho_0 \equiv \rho(t, \vec{0}) = B(ct)^{-3}$ og til en uendelig tæthed på substratets rand. At antallet af galakser i Milnes substratum skulle være uendeligt kan synes paradoksalt, idet Olbers paradox siger, at himlen af denne grund burde udstråle en uendelig lysstyrke. Milne beregnede imidlertid den tilsvareladende lysstyrke for jævnt bevægede galakser, og ved hjælp af den specielle relativitetsteoris formel for frekvensforskydning af lys samt sin tæthedsfunktion, nåede han frem til det resultat, at den samlede, tilsvareladende lysstyrke fra de uendeligt mange galakser vil antage en endelig værdi [3, note 7, s.354-357].

Det var vigtigt for Milne at pointere, at dette substratum ikke udgør et eksanderende rum, begrænset af en kugle med radius $r = ct$, men at rummet er uendeligt

¹⁶Se en videnskabshistorisk behandling af *the primeval atom* i [112].

og euklidisk, at galakserne har bevæget sig væk fra hinanden siden skabelsen og at et ydre billede af universet, som figur 2.1 fra [3, plate 1], i Milnes terminologi ikke er muligt at konstruere, idet alle observatører vil se universet fra punktet O med sig selv i centrum; det kan kun beskrives indefra. Substratet er en såkaldt åben mængde, i den matematiske forstand, at ingen punkter vil kunne befinde sig *på* randen $r = ct$, men de hurtigste partikler er vilkårligt tæt på denne. Milne gjorde det klart, at ”tiden er meget tidligere for en fjern partikel” [6, s.67], og at universet vil have samme fordeling set fra en partikel, der tilsyneladende befinder sig meget tæt på $r = ct$ (set fra O). Den eneste forskel vil blot være, at denne fjerne grænsepartikel vil finde en lavere aldersangivelse for universet. Enhver observatør der skulle ønske at rejse mod denne fjerne egn vil imidlertid aldrig komme nærmere denne grænse, fordi universets galakser vil have bredt sig ydermere, når først hun ’når frem’, og universet vil igen, for observatøren, vise sig at kunne repræsenteres ved diagrammet i figur 2.1 [6, s.67]. Med andre ord, konstaterede Milne, er den utilnærmelige grænsefront ved $r = ct$ repræsentant for skabelsen [6, s.76]:

But this point-singularity repeats itself at each point of the existing sphere $r = ct$. At each such point there is also a singularity, and the miracle of creation can be considered as re-enacting itself [...], we can never see or make any propositions about the frontier itself. That is to say, we can never witness the re-enactment of creation.

Vi vender tilbage til Milnes opfattelse af universets skabelse i kapitel 3.2.

Den statistiske tæthedsfordeling har altså følgende række af bemærkelsesværdige egenskaber. Den opfylder den hydrodynamiske kontinuitetsligning som sikrer, at ingen partikler skabes eller forsvinder, og den foreskriver en udtynding af partikernes tæthed som tiden går. Den giver forskriften for en positiv tæthedændring væk fra observatøren, og grænsen er for altid utilgængelig. Endelig giver den et ”fuldstændig egocentrisk” univers, hvor enhver partikel altid vil være centrum i den sfæriske symmetri, som omgiver observatøren. Men Milne fremførte at disse ”paradoksale egenskaber” ved tæthedsfunktionen alle blot var konsekvenser af Lorentztransformationerne.

2.3.6 Dynamik og den frie partikel

Funktionen $\rho(t, \vec{r})$ er selv Lorentz invariant, og er altså fremkommet via betragninger om det kosmologiske princip, som $\rho(t, \vec{r})$ naturligvis opfylder. Som Milne gang på gang understregede, kan partikelobservatørernes kongruente ure altså graderes, så de repræsenterer ’fundamentale’ observatører i jævne, relative bevægelser. Det var nødvendigt at sammenligne disse graderede ure med ’hverdagens ure’, eller med ”den tidsskala som Newton anvendte: dvs. tidsskalaen i hvilken en ’fri partikel’ bevæger sig med jævn hastighed i hvad der kaldes et ’Galilei-system’” [6, s.78]. ”Siden tidsbestemmelser i newtonsk tid falder sammen med tidsbestemmelser for

ækvivalente observatører i umiddelbar nærhed af observatørerne, vil de resultater, vi opnår, om ikke andet blive en bevægelsesligning for den 'frie partikel' ” [3, s.73]. Resultatet skulle blive en bevægelsesligning for den 'frie partikel' som Milne deducerede uden nogetsteds at anvende empiriske love.

Den frie partikel uden klassiske kraftpåvirkninger vil i henhold til Newtons første lov, inertiens lov, enten forblive i relativ hvile eller fortsætte sin jævne, relative bevægelse, afhængig af begyndelsessituationen. Men Milne så sig nødsaget til at udvide det idealiserede begreb 'fri partikel' til sit substratum, eller grundlaget for universet, af realistiske hensyn. Dette var nødvendigt fordi han insisterede på, ikke at negliger alle universets gravitationskræfter, end ikke i princippet [6, s.79]:

We therefore enlarge the concept of the free particle to mean a particle projected from an arbitrary position at an arbitrary epoch with an arbitrary velocity, in the smoothed-out cosmos we call the substratum under any 'forces' which this substratum may exert on it.

Milne anså ikke det newtoniske henførelsessystem for at være specifikt veldefineret, udover at være et inertialsystem med den definerede egenskab, at en fri partikels hastighed i forhold til inertialsystemet er jævn. Man kan sige, at Milne antog denne definition for at være 'cirkulær' i den forstand, at udsagnet 'partiklen' bevæger sig med jævn hastighed relativt til et inertialsystem', så at sige lader præmissen udgøre konsekvensen, eftersom denne partikelbevægelse kun er mulig hvis partiklen i forvejen bevæger sig som beskrevet! Ellers ville henførelsessystemet jo ikke være et veldefineret inertialsystem. Denne hævdede cirkulære definition fik Milne til at omdefinere begrebet 'inertialsystem'. Det skulle nu forstås som et henførelsessystem, der svarer til de karakteristiske, jævnt bevægede tilstande for substratets partikler, og partikelobservatøren, O , udgjorde et sådant henførelsessystem.

Milne lod nu O angive O' -partiklens koordinater ved (t, \vec{r}) , hvor O' stadig bevæger sig med hastigheden v relativt til O , men nu repræsenterer O' den frie partikel. Han søgte da den afledte af hastigheden mht. den dynamiske tid, $d\vec{v}/dt$, som på baggrund af Lorentz- og hastighedstransformationen lod sig udtrykke ved hjælp af en kombination af forskelligt definerede invariante og kovariante funktioner (se appendix D.2). Disse var alle eksplisit funktioner af t , \vec{r} og \vec{v} . Det er i flere sekundærkilder uklart, hvorledes Milne egentlig nåede frem til sin bevægelsesligning for den frie partikel¹⁷, og siden den udgør det kinematiske grundlag for resten af hans teori, og for ham selv udgjorde et af den kinematiske relativitetsteoris højdepunkter, er den tekniske udledning [4, s.62-67], der fører til bevægelsesligningen, gennemgået i appendix D, hvor Milnes notation er blevet omsat til moderne fire-vektor form. Dette er imidlertid ikke gjort i 'Milnes ånd', idet han som nævnt forkastede anskuelsen af tiden som en fjerde dimension.

¹⁷Se [111, s.75], [133, s.412] og [122, s.163].

Resultatet af den kinematiske udledning var følgende anden ordens differential-ligning (D.16)

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{Y}{X} (\vec{r} - \vec{v}t) G(\xi). \quad (2.4)$$

Her er

$$\xi = \frac{Z^2}{XY}, \quad Y = 1 - \frac{\vec{v}^2}{c^2}, \quad X = t^2 - \frac{\vec{r}^2}{c^2}, \quad Z = t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{c^2}.$$

X og ξ er invariante funktioner, mens Y og Z er kovariante, og G er en vilkårlig, dimensionsløs funktion af ξ . Bemærk at Y er givet ved den specielle relativitetsteoris kendte gammafaktor, $Y = \gamma^{-2}$. Det må understreges, jvf. appendix D.2, at Milne ikke deducerede det forhold, at ligningen var en anden-ordens differentialligning, men at dette var en antagelse i udledningen.

Det ses umiddelbart, at hvis man sætter v lig med substratets jævne kosmiske bevægelse i ligning (2.4), dvs. $\vec{v} = \vec{r}/t$, da bliver accelerationen $d\vec{v}/dt$ lig med nul. En fri partikel P , der adlyder denne ligning, og som sættes fri fra en fundamental partikel O (dvs. en partikel-observatør der følger galaksernes jævne bevægelse), vil nu forblive i relativ hvile, under forudsætningen at P og O til at begynde med er i relativ hvile.

Partiklens hastighed vil altså forblive $\vec{v} = \vec{r}/t$, og Milne antog dette for at være et overbevisende argument for, at substratet nu ikke blot er et kinematisk system med foreskrevne bevægelser, men også et dynamisk system, et naturligt system. Fundamental-partiklerne kunne nemlig blot substitueres med den frie partikel, hvis naturlige bevægelse er den jævne, relative bevægelse, som alle partikler antagesvis var forsynet med. Hver fundamental-observatør ser altså i dette system sig selv som hele substratets centrum, og af symmetriårsager vil denne altid forblive i hvile i sit henførelsessystem.

I det generelle tilfælde, hvor den frie partikel er i bevægelse i forhold til O , er bevægelsen i dette system fuldstændig beskrevet ved (2.4) pånær funktionen $G(\xi)$. Undtagelsen skyldes, fremførte Milne, at det definerede substratum er analogt med en ikke-turbulent væske, som beskrives ved hydrodynamisk teori, hvor hastigheden overalt er den samme til et givet tidspunkt. Milne fandt det i denne sammenhæng nødvendigt at generalisere det betragtede partikelsystem til et statistisk system, der kunne beskrives ved en rumlig hastighedsfordeling til ethvert tidspunkt t . Milne betragtede nu sværme af frie partikler, som dels skulle opfylde det kosmologiske princip, men som også måtte opfylde endnu en betingelse, som gjorde systemet sammenligneligt med Boltzmanns kinetiske gasteori.

Betingelsen gik ud på, at der i hvert punkt, til tiden t , hører en hastighedsfordeling, og partiklernes accelerationer \vec{a} , måtte endvidere kunne afhænge eksplisit af både tid, position og hastighed, dvs. $\vec{a} = \vec{a}(t, \vec{r}, \vec{v})$. Under disse betingelser udledte Milne en fordelingsfunktion $f(t, \vec{r}, \vec{v})$ for de frie partikler [4, s.127-131]

$$f(t, \vec{r}, \vec{v}) = \frac{\psi(\xi)}{c^6 X^{3/2} Y^{5/2}},$$

hvor $\psi(\xi)$ var en anden vilkårlig funktion, der var karakteristisk for bestemte statistiske systemer; og forskellige ψ 'er svarede til systemer med forskellige strukturer. Milne forbandte fordelingsfunktionen $f(t, \vec{r}, \vec{v})$ med $d\vec{v}/dt$ idet han viste, at $G(\xi)$ og $\psi(\xi)$ er relateret til hinanden ved udtrykket [4, s.133]

$$G(\xi) = -1 - \frac{C}{(\xi - 1)^{3/2}\psi(\xi)},$$

hvor C er en konstant. Indsættes dette i (2.4) fås

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -(\vec{r} - \vec{v}t)\frac{Y}{X} - (\vec{r} - \vec{v}t)\frac{CY}{X\psi(\xi)(\xi - 1)^{3/2}}.$$

Fortolkningen af denne bevægelsesligning var nu, at første led i udtrykket skyldtes den gravitationelle effekt af substratet alene, idet ledet er uafhængigt af funktionen $\psi(\xi)$. Det andet led skyldtes derfor gravitationelle effekter forårsaget af de frie partiklers statistiske fordeling, idet fordelingsfunktionens $\psi(\xi)$ netop indgår i ledet. Begge led skulle altså forstås som accelerationskomponenter, og Milnes lidt uklare argumentation sluttede derfor, at for et substratum måtte $G(\xi)$ være en konstant, og denne satte han til $G(\xi) = -1$ [4, s.134]. Milne løste differentialligningen (2.4) med $G(\xi) = -1$ for en fri partikel, og han fandt følgende egenskaber for systemet: Når den kinematiske tid nærmer sig 'skabelsen', nærmer partikelhastigheden sig substratets begyndelseshastighed, $\vec{v} \rightarrow \vec{v}_0$ og radiusvektor går mod nul, $\vec{r} \rightarrow \vec{0}$. Når tiden går mod uendelig, konvergerer partiklens fart mod lyssets, $|\vec{v}| \rightarrow c$. Det skal bemærkes, at denne analytiske løsning også foreskrev en retningsændring af \vec{v} over tidsintervallet $0 \leq t < \infty$ hvor $|\vec{v}_0| \leq |\vec{v}| < |\vec{v}_\infty| = c$ og $\vec{v}_\infty \nparallel \vec{v}_0$ [29, s.48-52]. Milne kommenterede ikke retningsændringen yderligere, idet han tydeligvis ikke lagde stor vægt på denne analytiske løsning.

Hvad der var af større kvalitativ betydning var forholdet mellem partiklens kinematiske beskrivelser i de to forskellige ækvivalenser, t - og τ -systemerne. Skaleringssigningen (2.2) er ensbetydende med $d\tau/t_0 = dt/t$, og t_0 er tidspunktet hvor $\tau = t$. Hvis nu begivenheden (t, \vec{r}) i t -skalaen beskrives som $(\tau, \vec{\pi})$ på τ -skalaen, da gælder der for lyssignalerne $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$ og $\tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow \tau_3$, at (sammenlign med kap. 2.3.3)

$$\begin{aligned} |\vec{r}| &= \frac{c}{2}(t_3 - t_1) & t &= \frac{1}{2}(t_3 + t_1) \\ |\vec{\pi}| &= \frac{c}{2}(\tau_3 - \tau_1) & \tau &= \frac{1}{2}(\tau_3 + \tau_1), \end{aligned}$$

og for små afstande $|\vec{r}|$ i forhold til ct gælder approximativt

$$|\vec{r}| = \frac{dt}{d\tau}|\vec{\pi}| = \frac{t}{t_0}|\vec{\pi}|,$$

dvs. $\vec{r} = t\vec{\pi}/t_0$. $\vec{\pi}$ er altså partiklens position i den relativt stationære ækvivalens. Nu kan hastigheden omskrives til

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\vec{\pi}}{t_0} + \frac{t}{t_0} \frac{d\vec{\pi}}{dt} = \frac{\vec{\pi}}{t_0} + \frac{d\vec{\pi}}{d\tau} = \frac{\vec{r}}{t} + \frac{d\vec{\pi}}{d\tau},$$

dvs. $\vec{v} - \vec{r}/t = d\vec{\pi}/d\tau$. Med $G(\xi) = -1$ og $|\vec{v}| \ll c$ samt $|\vec{r}| \ll ct$ reduceres ligning (2.4) til

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\vec{r} - \vec{v}t}{t^2}, \quad (2.5)$$

eller $\frac{d}{dt}(\vec{v} - \vec{r}/t) = \vec{0}$. For den relativt stationære ækvivalens gælder der derfor approximativt¹⁸

$$\frac{d^2\vec{\pi}}{d\tau^2} = \vec{0}.$$

Resultatet er altså, anførte Milne, Newtons anden lov for en fri partikel i tomt rum, og han konkluderede derfor [4, s.75]:

It follows at once that τ is the time-variable of Newtonian physics. This is a most important result. It shows that in the Newtonian scale of time the fundamental particles, which correspond to the nuclei of the galaxies, are to be considered as at rest. It shows also, since τ is a public time, the same (for a given event) for all fundamental observers, that Newtonian time gives an absolute simultaneity throughout the universe.

Milnes konklusion var endvidere, at bevægelsesligningen stemmer helt overens med de tidligere udledte implikationer af tæthedsfunktionens egenskaber i substratet, og dette altså kun når $G(\xi)$ sættes lig med -1 . Men hvordan skulle den dimensionsløse funktion ξ nu forstås? Den indgår ikke i bevægelsesligningen for den frie partikel når denne er frigivet i substratet, uden hensyntagen til frie partiklers bevægelse. Milne fandt ved en simpel beregning, at funktionen ξ var nært forbundet med massebegrebet.

2.3.7 Inertiel masse og gravitationskonstanten

Funktionen $\xi^{1/2}$ viste sig at være betydningsfuld for Milne, som følge af en enkel betragtning. Milne fandt at den afledede af $\xi^{1/2} = Z/\sqrt{XY}$ mht. den kinematiske tid er nul, og han *definerede* partiklens inertIELLE masse M ved integrationskonstanten til denne simple differentiale ligning, ved $M = m\xi^{1/2}$, hvor m er en karakteristisk størrelse for den pågældende partikel. Massen var med andre ord givet ved [4, s.71]

$$M = \gamma m \frac{t - \vec{r} \cdot \vec{v}/c^2}{\sqrt{t^2 - \vec{r}^2/c^2}}.$$

¹⁸Der gælder $\frac{d}{dt} \left(\frac{d\vec{\pi}}{d\tau} \right) = \frac{t_0}{t} \frac{d^2\vec{\pi}}{d\tau^2} = 0$, og $t_0, t \neq 0$.

For en fundamentalpartikel i origo ($\vec{r} = \vec{0}$ og $\vec{v} = \vec{0}$) var $M = m$ altså dennes karakteristiske massekonstant, og for en fundamentalpartikel med den relative, konstante hastighed $\vec{v}_0 = \vec{r}/t$ fås igen $M = m$ ($\vec{v} = \vec{v}_0$). Endelig opnåede Milne den relativistiske massetilvækstformel for en partikel i origo med en *vilkårlig* hastighed \vec{v} , nemlig $M = \gamma m$. Forskellen på den specielle relativitetsteoris formel for massetilvækst og Milnes formelt identiske udtryk er imidlertid, at i den relativistiske dynamik anses alle fjerne partiklers masser for at vokse, når deres hastigheder nærmer sig lysets fart, mens fundamentalpartikler, i Milnes system, har den særegne egenskab at have samme masse.

Visse af Newtons konstanter viste sig i Milnes system snarere at være parametre, der afhænger af universets alder, af substratets kinematiske tid. Tidstransformationen (2.2) har så at sige transformeret accelerationen væk i ligning (2.5), og eftersom vektoren $\vec{r} - \vec{v}t$ forbinder en fri partikel P med fundamentalobservatøren O , fandt Milne det bekvemt at omdefinere denne vektor ($\vec{r}' \equiv \vec{r} - \vec{v}t$), så ligning (2.5) reduceres til følgende velkendte ligning for lineær acceleration ($|\vec{v}| \ll c$, $|\vec{r}'| \ll ct$)

$$\frac{d\vec{v}'}{dt} = -\frac{\vec{r}'}{t^2}. \quad (2.6)$$

Vi sætter nu $\vec{r}' = \vec{r}$ og $\vec{v}' = \vec{v}$ for at forenkle notationen. Milne sammenlignede relationen (2.6) med den newtonske tyngdeacceleration $\vec{g}(\vec{r})$ ved P , forårsaget af den del af substratet der ligger inden for kuglen $K(O, |\vec{r}|)$:

$$\vec{g}(\vec{r}) = -\frac{GM}{|\vec{r}|^3}\vec{r}, \quad (2.7)$$

hvor G angiver gravitationskonstanten og M er massen inden for kuglen, med $r \equiv |\vec{r}|$:

$$M = \frac{4\pi}{3}r^3\rho(t, \vec{r})m.$$

Her indgår tæthedsfunktionen $\rho(t, \vec{r})$ samt hver partikels karakteristiske massekonstant m . Da r er antaget at være lille, indsættes $\rho(t, \vec{r})$'s grænseværdi ρ_0 i udtrykket for massen

$$M = \frac{4\pi}{3}r^3\frac{mB}{t^3c^3},$$

og ved identificeringen $\vec{g}(\vec{r}) = d\vec{v}/dt$ får vi af (2.6) og (2.7)

$$\frac{\vec{r}}{t^2} = \frac{G}{r^3} \left(\frac{4\pi}{3}r^3\frac{mB}{t^3c^3} \right) \vec{r},$$

og G isoleres nemt til udtrykket

$$G = G(t) = \frac{c^3t}{\frac{4\pi}{3}mB}. \quad (2.8)$$

I t -ækvivalensen skulle gravitationskonstanten altså i stedet være proportional med universets alder, og G skulle altså være en parameter frem for en konstant! Milne gav nævneren i (2.8) den simple fysiske fortolkning, at massen af alt synligt stof i universet, dvs. den tilsyneladende masse M_0 af kuglen $K(O, ct)$, netop måtte antage værdien

$$M_0 = \frac{4\pi}{3}(ct)^3\rho_0 m = \frac{4\pi}{3}mB,$$

og gravitationsparameteren $G(t)$ blev derfor noteret som [4, s.77]

$$G(t) = \frac{c^3 t}{M_0}. \quad (2.9)$$

Massen M_0 er beregnet under antagelse af, at universet er jævnt befolket med partikler, hvilket kun er tilfældet når substratet måles med τ -tiden. Milne pointerede, i overensstemmelse med de tidligere deducerede resultater, at M_0 derfor kun var en *tilsyneladende* masse, målt af fysikere i τ -ækvivalensen, men at universets totale masse stadig var uendeligt stor i t -ækvivalensen.

Milne sammenlignede den numeriske værdi af den tilsyneladende masse med værdien af den masse som var forudsagt af almen relativitetsteori; og med datidens værdi af Hubble-parameteren, der svarede til et univers der var 2×10^9 år ($= 6,3 \times 10^{16}$ s) gammelt¹⁹, beregnede Milne universets tilsyneladende masse til at være $M_0 = 2,55 \times 10^{52}$ kg. Sammenligner man eksempelvis denne masseværdi med Eddingtons massetal, der var beregnet på baggrund af hans kosmiske tal, $N = 10^{79}$ protoner eller elektroner, da fås universets masse til næsten samme størrelse, hvis man vel at mærke vælger protonmassen som udgangspunkt: $M_{Edd} = 10^{79} \times 1.67 \times 10^{-27}$ kg = $1,7 \times 10^{52}$ kg, dvs. $M_{Edd} \approx \frac{2}{3}M_0$, se evt. [57]. Milnes teoretiske resultat vedrørende universets masse var således ikke ude af trit med andre alternative teorier i hans samtid, og han pointerede, at G er en konstant i det relativt stationære substratum, selvom gravitationskonstantens numeriske værdi afhænger af universets dynamiske alder, som altså var mulig at finde frem til ved hjælp af Hubbles lov. Det skal bemærkes, at den hævdede forøgelse af gravitationskonstanten fra $G(t=0) = 0$ til $G(t_0) = 6.67^{-11} Nm^2 kg^{-2}$ svarer til den relative forøgelse $\Delta G/G \approx 5 \times 10^{-10} Nm^2 kg^{-2}$ pr. år (med datidens værdier); altså en lille og dengang umålelig ændring af G .

Det var nu muligt at besvare spørgsmålet om gravitationsforholdene kort efter $t = 0$, da afstandene mellem galakserne var ganske små. Substratets ekspanderende kuglefront ville nu ikke nedbremses, som man måske skulle tro, fordi 'gravitationskonstanten' var forsvindende, og en klassisk gravitationsberegning, med denne værdi for $G(t)$, gav blot det resultat, at galakserne ikke ville vekselvirke med hinanden. Som afstandene forøgedes med tiden, voksede værdien af $G(t)$, og Milne argumenterede derfor, at galakserne da ville da være så fjernt fra hinanden, at gravitationen kunne negligeres.

¹⁹Det må understreges at dette er den beregnede Hubble-tid, og ikke universets alder, der fx vil være mindre end Hubble-tiden for Einstein-de Sitter modellen, se [113, s.73-79]

Milne forsøgte også, i 1938 og senere, at udvide sin teori til at omfatte klassisk elektrodynamik, og han nåede frem til tidsskalaens effekt på Plancks' konstant \hbar , der ligesom gravitationskonstanten viste sig at være proportional med den kinematiske tid, t ²⁰. Milne fremførte på et noget usikkert grundlag, at rødforskydningen, som i den kinematiske tid skulle fortolkes som en klassisk Dopplereffekt, kunne transformeres til τ -tiden, i hvilken rødforskydningens årsag jo ikke kunne være galaksebevægelse, eftersom alle fundamentalpartikler her er i relativ hvile. Her skyldtes rødforskydningen \hbar 's afhængighed af tiden, idet frekvensen som følge heraf måtte være omvendt proportional med den kinematiske tid. Den modtagede bølgelængde λ ved O , ville derfor være større end den afsendte bølgelængde λ' ved O' , og O ville således måle rødforskydningen $z = (\lambda - \lambda')/\lambda$ ²¹. Milnes forsøg på at udlede elektrodynamikken ved hjælp af sin kosmofysik var kort sagt utilfredsstillende, fordi det ikke lykkedes for ham at forene sine resultater med Maxwells ligninger. Han mente dog at kunne udlede Coulombs lov samt Biot-Savarts lov. Han forsøgte endvidere at indlemme sine to tidsskalaer i Maxwells ligninger, men resultatet var ikke af kollegernes store interesse.

Milne anså det for uundgåeligt, at tidsskalaen for stråling måtte være forskellig fra tidsskalaen for dynamik og gravitation. Han fandt at strålingsfænomeners tidsskala var den kinematiske, mens gravitationens dynamiske τ -skala beskrev klassisk mekanik. Milne forsøgte allerede i 1938 at udvikle en teori for 'rationel elektrodynamik' og han gav da også sit bud på en rationel tilgang til kernefysikken. Det fremgår af hans konklusion, ved I.I.I.C.s Warszawa-konference i sommeren 1938²², at hans resultater var temmelig begrænsede i deres beskrivelsesområde sammenlignet med datidens gængse kvantemekanik [34, s.219]:

The above may be criticized as ignoring wave-mechanics, the uncertainty principle, electron-spin, etc. But it is clear that there should exist some elementary treatment on the same footing as Bohr's original orbit-theory. Unable to present wave-mechanics, electron-spin, etc. rationally to myself, I have had to attempt to understand matters in my own way; The result is a partial, but to me satisfying, reconstruction of certain portions of physics on a rational basis, a reconstruction to which each equation is a proposition with a content.

²⁰Om end denne idé var heterodoks var den ikke enestående. Allerede i 1935 blev det foreslået af englænderne B. Chalmers og K.A. Chalmers, at der kunne gøres rede for Hubbles lov uden at for tolke rødforskydningen som en Dopplereffekt, men ved en tidsafhængig \hbar [46, s.445]. Også Samuel Sambursky fremlagde i 1937 det forslag, at Plancks konstant var proportional med $\exp(-Ht)$, se [113, s.33].

²¹Milne udgav i 1938 en artikelserie om elektromagnetismens ligninger [35], og under krigen udgav han endvidere en artikelserie om sin rationelle elektrodynamik [38]. Se evt. også [6, s.140].

²²Ved konferencen for International Institute of Intelligence Co-operation deltog Milne ikke selv, men hans tekst blev præsenteret af vennen og kollegaen Charles G. Darwin, som iøvrigt afsluttede oplægget med at konstatere, at han ikke var enig i Milnes konklusioner.

Milne fortsatte, som nævnt, med at udgive artikler om denne rationelle elektrodynamiske teori op til midt under krigen, og kort efter krigens afslutning besvarede han i 1945 den engelske fysiker William Wilsons seriøse kritik af teorien. Wilson beundrede Milnes sammenhængende teori, men fandt det vanskeligt at acceptere dens resultater. Han konkluderede i sin kritik af teorien, at den eneste løsning til Milnes bevægelsesligning (2.4) var $d\vec{v}/dt = \vec{0}$, og at dette ”fjernede fundamentet for hans gravitationsteori og rationelle elektrodynamik” [94, s.249]. Wilsons sympatiske kritik af Milnes elektrodynamik hørte til sjældenhederne, eftersom de færreste videnskabsfolk tog denne del af teorien alvorligt. Årsagen var, som citeret af Milne selv, at teorien heller ikke formåede at gøre rede for bølgemekanik, Werner Heisenbergs usikkerhedsrelation eller elektronens spin.

2.4 De første reaktioner

I moderne kosmologisk sammenhæng optræder Milnes navn i dag kun i forbindelse med hans jævnt ekspanderende model, som et specialetfælde af relativistisk kosmologi. Internationalt blev Milnes nye teori glemt cirka tyve år efter den blev ’født’, men der gik lidt længere tid i England, fordi teorien til en vis grad inspirerede til udviklingen af den senere *steady state* teori, som også har sin oprindelse i England. Ikke desto mindre anså mange engelske videnskabsfolk den kinematiske teori som et lovende alternativ fra 1932 og op i 40’erne. I denne periode blev der alt i alt udgivet omkring 70 videnskabelige artikler i relation til Milnes teori, og dette beviser at teoriens position var fremherskende i perioden. Specielt Milnes medarbejdere McCrea og Whitrow var aktivt med i udviklingen af teorien, men også andre englændere tog del i arbejdet, bl.a. McVittie, William A. Kermack, inderen Vishnu V. Narlikar og Martin Johnson [64]. I USA var Robertson også involveret i teoriens udvikling, men dette var snarere i form af en seriøs kritik af modellen, samt i kraft af hans plan om at vise, at teoriens fundament bundede i relativistisk kosmologi.

Læsere af *Nordisk Astronomisk Tidsskrift* kunne i 1933 læse Bengt Strömgrens præsentation af Milnes teori [85]. Strömgren havde nogle måneder forinden haft besøg af Milne i København, og Strömgren gav her en populær fremstilling af Hubbles resultater og datidens observationsteknik. Han sluttede artiken af med en redegørelse for de rivaliserende kosmologiske teorier i begyndelsen af 30’erne, som alle hovedsagelig var baseret på Hubbles ene empiriske lov. Strömgren resumerede teorierne af Einstein og de Sitter, Friedmann, Eddington og Lemaître, og han behandlede specielt Milnes teori, der var helt ny og ukendt i Danmark.

Hubble sendte et brev til Milne i foråret 1933 fra Mount Wilson Observatoriet i Californien, i hvilket han gjorde det klart, at afstandestimatorne stadig var for usikre til at kunne udtales sig om en præcis hastighed-afstand-linearitet for store afstande. Han skrev endvidere om sin interesse for Milnes artikel [23] om verdens struktur [145, Hubble → Milne]:

Your paper is very widely discussed and we are holding seminars on the subject [...]. I will not venture comments until the implications are comfortably straightened out in my head. Some results shortly to be published, however, suggestss that the density function increases with distance, as you expect.

De første offentlige reaktioner på Milnes nye teori om 'verdens struktur' i 1933-nummeret af 'Zeitschrift' stod at læse i det efterfølgende nummer af tidsskriftet, hvor Dingle indledningsvis vurderede artiklen som "exceedingly ingenious" ([50, s.167] og [113, s.69-71]). Han sammenlignede teorien med den relativistiske ekspansionsteori, og undersøgte om teorierne kunne testes observationelt. Han foreslog forskellige muligheder for empirisk verifikation eller forkastelse af Milnes teori, men indrømmede at ingen af metoderne reelt ville kunne føres ud i praksis. Endelig angreb han, som tidligere nævnt, Milnes 'udvidede relativitetsprincip', som han betragtede som uacceptabelt a priori, og at dette kosmologiske princip var langt mere begrænset "end man skullle forvente af en teori om verdens struktur". Han mente at en fuldstændig afvisning af princippet kunne begrundes ved hjælp af empirien, og skrev endvidere om princippet [50, s.167]:

There is no observational evidence in this favour other than that which led to its formulation, and [...] its fundamental view-point is inconsistent with the general principles of scientific thought. Milne's objections to the expanding space theory [...] are shown to be inadmissible.

Dingle refererede i citatets begyndelse sandsynligvis til Hubbles observationelle resultater. Dingle anså imidlertid princippets aprioriske aspekter for at være det vigtigste spørgsmål at behandle. Han kritiserede antagelsen om, at universet kunne repræsenteres ved en slags *conceptual emptiness* i hvilken begivenheder fandt sted som følge af visse love (han henviste her til det tomme rum, som indeholdt det unikke substratum, [50, s.170]). At karakteren af denne tomhed var vilkårlig, under forudsætning af at observatørernes referencesystemer underlagdes passende urgraderinger, var for Dingle at se helt legitimt, men kun inden for Milnes teoretiske system. Problemet lå blot i systemets egne hovedantigelser, og Dingle klassificerede Milnes teori som en reminiscens af pre-einsteinske videnskaber.

Dingle understregede i sin kritik de epistemologiske og metodologiske afgivelser i Milnes arbejde, og konstaterede at Milnes epistemologi stod i direkte modsætning til relativitetsteoriens naturerkendelse, som Dingle anså for at være en bekræftelse af Newtons princip om induktiv generalisation fra iagttagede naturfænomener. Med hensyn til Milnes metodologi skrev han ekplicit, "it would seem that the general course of Milne's theory is at variance with the fundamental principles of scientific method" [50, s.178].

Også Robertson reagerede i samme nummer af *Zeitschrift*, men hans budskab var af en noget anden karakter [79]. Robertson udlagde den nye teori som blot at være funderet i en tese, der var helt ækvivalent med den relativistiske kosmologis-

postulater. Den kinematiske relativitetsteori var nemlig intimt forbundet med relativistisk kosmologi på to bestemte punkter. For det første var Milnes kosmologiske princip oplagt ækvivalent med den sidstnævnte teoris antagelse om jævnt fordelt stof i et krumt rum; for det andet påpegede Robertson at Milnes kinematiske model kunne fortolkes som et specialtilfælde af relativitetsteoriens dynamiske, kosmologiske modeller med en konstant krumning, specielt med $k = 0$.

Robertson og Dingle havde inden udgivelsen af deres artikler, sendt kopier til Milne, så han fik mulighed for at besvare deres kritik i samme nummer. Her påpegede han den afgørende forskel på Robertsons homogenitetsantagelse og sin egen "equivalence of world-views". Han besvarede både Robertsons og Dingles angreb og anførte, at hans teori ikke var i modstrid med relativistisk kosmologi, men stillede dog spørgsmålet: "Hvem tror på, at dele af universet kan blive kausalt og rumligt adskilt?"²³. Han fastholdt hermed sin modvilje mod den relativistiske kosmologis spatialisering af tiden.

Med hensyn til Dingles kritik, anså Milne det som formålslost at besvare den i detalje, eftersom Dingle angiveligt havde "misforstået meningen med, og fornuftens i min artikel" [ibid.]. Milne kritiserede dernæst Dingles "fjendtlige" angreb, og han undrede sig over hvordan Dingle ville forklare sit standpunkt, der både var pro og kontra relativistisk kosmologi på samme tid! Denne påstand forsvarede Milne med, at Dingles angreb mod det 'udvidede relativistiske princip', i lyset af blandt andre Robertsons arbejder, derved måtte være et angreb på relativistisk kosmologi, hvilket jo netop var den teori, Dingle selv så indædt forsvarede.

De efterfølgende år fortsatte med at byde på reaktioner *à la* Dingles hhv. Robertsons, som kan siges at repræsentere to typiske filosofiske hhv. fysiske standpunkter i kritikken af Milnes program. Specielt voksede Dingles fjendtlighed over for det filosofiske fundament for Milnes rationalistiske teori i årene der kom, og nåede sit klimaks i 1937. Vi vil vende tilbage til kontroversen fra 1937 i kapitel 3.

2.4.1 Milne-McCrea modellen

Ideen om et ekspanderende rum var, som beskrevet, uden fysisk indhold for Milne, om end han anså fænomenet som værende matematisk interessant. Milne viste i 1934 [25], at dynamikken for den senere så berømte relativistiske Einstein-de Sitter model for et fladt ekspanderende rum, lige så vel kunne beskrives ved Newtons elementære gravitationsteori i et euklidisk og statisk rum med en absolut tid. Han viste med andre ord, at Einstein-de Sitter modellens ligning, der beskrev en partikel med faste koordinater, var *formelt* identisk med Newtons bevægelsesligning for afstanden til en massiv partikel fra en observatør i et klassisk inertialsystem.

²³Citatet er fra [24, s.184]. Med 'kausal' mente Milne sandsynligvis blot 'tidslig', om end ordet leder tanken hen på begrebet begivenhedshorisont, som en årsag til kausal adskillelse. Milnes universmodel havde en horisont i den forstand, at universets 'skabelse' ($t = 0$) var "usynlig" på kuglefrontens rand [27, s.35].

Milnes ide var at universet, i det newtonske system, kunne repræsenteres ved en 'kosmisk kugle' med radius r , der udvidede sig i et uendeligt rum, ikke helt ulig hans substratum. Stoftætheden ρ inden for kuglen var jævnt fordelt og bestod af partikler, der alle var i frit fald i det totale, klassiske gravitationsfelt, med udadrettede hastigheder, v . Han lod $M(r)$ betegne kuglens masse inden for radius r , og antog, at alt stoffet uden for kuglen ikke havde nogen indflydelse på bevægelsen af partikler inden for r . Han betragtede dernæst det specielle tilfælde hvor partiklen netop antager den såkaldte undslippelseshastighed, ved hvilken partiklens newtonske, kinetiske energi er lige så stor som den negative potentielle energi, dvs. $\frac{1}{2}v^2 = GM(r)/r$, hvor G er den klassiske gravitationskonstant.

I forlængelse af sin artikel [25] behandlede Milne i samarbejde med McCrea²⁴ en generalisering af denne universmodel [26], og de påpegede i artiklen at bevægelsesligningen repræsenterede den egenskab, at systemets totale energi forbliver konstant hvis en passende konstant K lægges til ligningen

$$\dot{r}^2 + K = G \left(\frac{8\pi}{3} \rho r^3 \right) \frac{1}{r}. \quad (2.10)$$

Værdien af K bestemmer nu den kosmiske kugles opførsel. Er $K < 0$ vil partiklen have en 'hyperbolisk' radialhastighed og er $K > 0$ vil hastigheden være 'elliptisk'. Har K netop værden 0 vil v være 'parabolisk'. Alle partikler uden for kuglen vil tilhøre det første tilfælde ($K < 0$), og vil forsvinde for altid, mens partikler inden for den kosmiske kugle vil falde tilbage til centrum med elliptiske hastigheder. Konstanten K var altså et udtryk for systemets totale energi. De sammenlignede ligningen (2.10) med Einstein og de Sitters ligning for dynamikken i det flade eksanderende rum²⁵, repræsenteret ved Friedmann-ligningen (2.1), og fandt at ligningerne var ens hvis krumningen k identificeredes med K og radius sattes lig med skalafaktoren samt hvis den newtonske tæthed ρ identificeredes med den relativistiske energitæthed, $\rho = T^{00}$.

Ækvivalensen mellem relativistisk kosmologi og den beskrevne newtonske tilgang forekommer i dag ofte i introducerende kosmologiske lærebøger, og det fremgår for det meste, at den newtonske tilgang ikke er dybdeborende, men at metoden om ikke anden kan fungere som et mnemoteknisk hjælpemiddel. Denne neo-newtonske kosmologi, der havde gyldighed inden for det newtonske beskrivelsesområde, anvendte altså hverken speciel eller almen relativitetsteori, men gjorde alene brug af klassisk gravitationsteori²⁶. Ækvivalensen var udelukkende af formel art; den symbolske repræsentation af newtonsk kosmologi var kun formelt identisk med den symbolske

²⁴Den irske astronom McCrea blev Milnes nære ven og kollega, og McCrea beskrev sin, og sine kollegers, tid ved Cambridge i 20'ernes "gyldne år" for kvantemekanikken [119].

²⁵Metrikken var altså $d\tau^2 = dt^2 - a(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2)$.

²⁶Begrebet 'neo-newtonsk' kosmologi anvendes fx i [122, s.176], som giver en teknisk gennemgang af Milne-McCrea modellen. Filosofiske aspekter af den 'påståede' ækvivalens behandles i [109], hvor problemet om teoriers underbestemthed diskuteres.

repræsentation af den relativistiske kosmologi. Milne-McCrea modellen antog implicit det kosmologiske princip for stoffets fordeling, og meningen med fremlæggelsen af denne klassiske deterministiske løsningsmodel var ifølge Milne at give et forståeligt indblik i den relativistiske kosmologi [3, s.299]:

Great insight into the cosmological problem is obtained by constructing a solution by the methods of classical mechanics [...]. This will be found to convey an easily intellegible idea of the *dynamical* nature of the phenomenon of the expanding universe. Further it will be found greatly to facilitate the mathematical discussion of the dynamical relativistic solutions, by suggesting appropriate mathematical procedures and by attaching physical meanings to certain of the symbols occuring in the dynamical relativistic solutions whilst indicating at the same time what symbols are devoid of physical content.

For Milne at se kastede den newtonske analyse nyt lys på den almene relativitets-teoris ”tunge og uhåndgribelige matematiske udstyr”, så som feltligningernes tensorer og beregning af Christoffelsymboler, og han konstaterede at metodernes klare parallelle måtte stikke dybt i relativitetsteoriens og dynamikkens fundamenter, samt at denne formodning måtte undersøges nærmere [3, 317]:

In some way which requires deeper investigations, the simple Newtonian calculus gets to the same destination with incomparably less labour. The present position awaits the insight of an investigator who will tell us why the Newtonian analysis reproduces the results of general relativity [...].

Denne opfordring blev fulgt op i 1941 af den tyske astronom Otto Heckmann og hans kolleger i Hamburg. Heckmann undersøgte betingelserne for formel ækvivalens mellem newtonsk mekanik og relativitetsteorien, og han konkluderede at den eneste firedimensionelle metrik, der muliggør en formel identifikation af teoriernes ligninger, er en metrik med konstant krumning [71]. Heckmann gav iøvrigt i sin bog *Theorien der Kosmologie* [72] en stort set uændret fremstilling af den neo-newtonske kosmologi; men da bogen udkom i Tyskland under krigen var den relativt ukendt i England. Udeover denne tyske fremstilling var der ikke mange reaktioner på Milne-McCrea modellen og først i 1954 kritiserede den amerikanske fysiker David Layzer teorien [65]. Hans kritik gik på påstanden om, at newtonsk mekanik på selvkonsistent vis kunne anvendes på en jævn, *ubegrænset* stoffordeling. Han viste at et system (uden strålingstryk) af jævnt fordelte, gravitationelle partikler havde de samme dynamiske egenskaber, hvis systemet havde en ubegrænset, jævn stoffordeling, som hvis det var indlejret i et tomt rum. Layzers konklusion var derfor, at den klassiske mekaniske metode ikke var selvkonsistent, se fx [122, s.180-185]. McCrea modificerede det efterfølgende år sin position på baggrund af Layzers kritik, og antog nu systemets udstrækning for at være vilkårligt stor, sammenlignet med observationers endelige rækkevidde. Han anså dermed ikke forskellen mellem et vilkårligt stort system og et ubegrænset system for at have nogen væsentlig betydning.

2.4.2 Robertson-Walker metrikken

Takket være Robertson, Walker, Tolman, McCrea, McVittie og andre, blev den teoretiske kosmologis struktur etableret i begyndelsen af 30'erne. Dette skyldtes til dels Milnes kraftige angreb på de evolutionære universmodeller, der var baseret på den almen relativitetsteori. Visse elementer af Milnes teori fik afgørende videnskabelig betydning for den model vi idag kalder den kosmologiske standard model, nemlig hans kosmologiske princip sammen med systemet af indbyrdes kommunikerende partikelobservatører. Resultatet blev den kendte Robertson-Walker metrik.

De to geometriske hypoteser om universet, som Robertson allerede havde fremlagt i 1929 blev i 1935 udsat for væsentlige generaliseringer, der resulterede i formaliseringen af Robertson-Walker metrikken²⁷. Første udlæg kom fra Walker [89] og uafhængigt heraf dukkede Robertsons artikel op nogle måneder senere [80]. Deres metoder mindede bemærkelseværdigt meget om hinanden, på trods af en fundamental forskel. De lagde begge ud med Milnes kosmologiske princip, og gjorde begge brug af metoder der lignede Milnes, idet de også anvendte idealiserede systemer af bevægede partikelobservatører, hver forsynet med sit individuelle ur. Alle observatører antoges ligeledes at erfare hver deres individuelle placering som værende universets centrum, en antagelse som Walker kaldte 'symmetri-princippet'.

Walkers udledning af metrikken for denne universmodel var direkte inspireret af Milne, som han iøvrigt afslutningsvis takkede for kritiske diskussioner af artiklen [89]. Walker var tydeligt under indflydelse af Milne, som også motiverede ham til sit arbejde med kinematisk relativitetsteori. Robertson udviklede metrikken med en ganske anden motivation, idet han med de samme ovennævnte ingredienser viste, at den fremkomne metrik var af en 'form', som var baseret på relativistisk kosmologi, og at alle metrikkens elementer kan fortolkes ligesom de fortolkes i almen relativitetsteori²⁸. Robertson var meget skeptisk over for Milnes hypotetiske tilgang til kosmologien, og han konkluderede i sin artikelrække at hans, Robertsons, undersøgelser styrkede den almen relativitetsteoris postulater. Han konstaterede endvidere, at Milnes kinematisk-statistiske teori ikke kunne betragtes som fuldstændig. Robertson skrev at hans resultater ikke kunne afdøves på grundlag af kinematisk relativitetsteori, og at han var mere tilfreds med at lade teorien om universet være baseret på empiri [80, s.271]. Med andre ord var han skeptisk over for Milnes rationalistiske metode til frembringelse af udsagn om universet. Metrikken, der i dag bærer navnene Robertson og Walker, udledes i kosmologiske lærebøger hovedsagelig efter Walkers recept [89]. Metrikkens to hovedantagelser er dels en absolut kosmisk tid, der er ortogonal med det tredimensionelle og krumme rum, dels det kosmologiske princip, der i formaliseret form udtrykkes ved egentidens rotationsinvarians.

²⁷Se (C.3) i appendix C.2.

²⁸Også McVittie undersøgte en generaliseret form af kinematisk relativitetsteori, og under krigen blev en hed diskussion mellem McVittie, Walker og Milne udgivet i *The Observatory*. Vi vil vende tilbage til diskussionen i kapitel 3.1.2.

Walker fik året forinden udgivet en artikel, hvor han på opfordring af Milne viste, at det kinematiske system kunne udtrykkes ved et mindste-virkningsprincip [90]. Han hævdede også at kunne vise, at Milnes kinematiske teori ikke kunne være ækvivalent med noget kinematisk system, der udsprang af almen relativitetsteori. Walker mente altså ikke at den kinematiske relativitetsteori kunne være et specialtilfælde af, eller blot forenelig med almen relativitetsteori, som det eksempelvis hævdtes af Helge Kragh i [111, s.79].

Det er bemærkelsesværdigt, at Robertson indtil 1933 kun havde beskæftiget sig med den relativistiske kosmologis substantielle problemer og fysiske begreber. Men siden behandlingen af Milne, i sin kritik i *Zeitschrift*s 1933-nummer, blev de filosofiske perspektiver prioriteret højere, og han fokuserede i højere grad på de operationalistiske aspekter i en kosmologisk teori, nemlig hvad en observatør måtte forventes at kunne iagttagte. Robertson havde anmeldt Milnes *Relativity, Gravitation and World Structure* i *Astrophysical Journal* i 1935, og noget kunne tyde på at Robertson lod sig inspirere af Milnes operationalistiske fremgangsmåde²⁹.

Både Walker og Robertson bedyrede, at deres udledninger af metrikken skete uafhængigt af hinanden, og det er evident, at begge udledninger, på hver sin måde, var forbundet til Milnes system, der var baseret på det operationalistiske grundlag, som jeg har beskrevet i gennemgangen af den kinematiske relativitetsteori.

2.4.3 Diracs hypotese om 'store tal'

Den kendte, engelske fysiker Paul Adrien Maurice Dirac formulerede i 1937 en spekulativ kosmologi, der gik godt i tråd med teorierne af Eddington og Milne. Dirac havde i 1925 haft Milne som vejleder i et semester i Cambridge, og kendte både til hans og Eddingtons teorier, men han havde ikke beskæftiget sig med astronomi siden denne periode. 30'ernes stærke tendens til at lægge vægt på aprioriske principper i engelsk astronomi og kosmologi, som fremhævede rationalistiske og deduktive videnskabelige metoder, opmuntrede formodentlig Dirac til at udgive sine nye kosmologiske teorier³⁰. Disse numerologiske teorier kan sammenlignes med pythagoræiske principper om, at numeriske forhold og regulariteter i naturen er manifestationer af naturlovenes immanente orden. Dirac udformede, som Eddington, en teori der præsenterede forskellige konstanter, som angiveligt var fundamentale i naturen [55]. Hans såkaldte *Large Number Hypothesis* inkluderede forskellige store tal, som fx $\mu \approx 10^{78}$, som i størrelsesordenen er sammenligneligt med Eddingtons kosmiske tal, N , se fx [111, s.89-98]. Et andet 'stort tal' var konstanten $\gamma = e^2/(GmM) \approx 7 \times 10^{38}$,

²⁹Gale og Urani giver en videnskabshistorisk behandling af de filosofiske aspekter af Milnes kosmologi i [101], specielt omtales Robertson Walker metrikkens forbindelse til Milne på side 71-72.

³⁰Dirac refererede eksplisit til Milne i en kort artikel i *Nature* [55], idet han om sin egen teori skrev: "This is to some extend equivalent to Milnes cosmology [30]. Following Milne, we may introduce a new time variable $\tau = \log t$, and arrange for the laws of mechanics to take their usual form referred to this new time".

og hans hypotese var, at store tal som γ og μ var numerisk givet ved potenser af universets alder³¹, t, t^2, \dots

Hypotesen medførte at 'konstanterne', fx γ og μ , var proportionale med tiden, og eksempelvis var $\gamma = \gamma(t) = kt$, hvor $k \approx 1$ var konstant. Han postulerede, at siden atomkonstanterne e , m og M ikke afhænger af tiden, måtte gravitationskonstanten være omvendt proportional med universets alder til enhver tid, dvs. $G \propto t^{-1}$. De færreste fysikere og astronomer betragtede Diracs kosmologi som særlig plausibel. I 1938 fremførte han [56], at uoverensstemmelsen mellem almen relativitetsteori, der antog en konstant værdi af G , og de modstridende konsekvenser af hypotesen om de store tal, muligvis kunne forenes ved at antage to forskellige metrikker, en for astronomiske fænomener og en for atomare fænomener, ligesom i Milnes kinematiske relativitetsteori. Tidsafhængigheden af G var ligeledes et aspekt af Diracs model, som mindede om Milnes teori, om end selve tidsvariationen var lige modsat Milnes direkte proportionalitet, $G \propto t$.

En af de få fysikere der tog Diracs ideer op i slutningen af 30'erne var den tyske fysiker Pascual Jordan. Ligesom Dirac havde han deltaget i grundlæggelsen af kvantemekanikken i midten af 20'erne, men blev nu interesseret i kosmologi. Jordan tilhørte ikke gruppen af britiske rationalister, men var derimod indædt positivist [113, s.71]. Han fremførte, at der intet apriorisk var ved hans numerologiske tankegang, der var direkte inspireret af Dirac, og han ville etablere en kosmologi på basis af rene empiriske fakta! Han kaldte ovenikøbet sin teori for 'empirisk kosmologi'. Jordans teori tillod et stort antal mulige kosmologiske modeller, hvoraf både Milnes og Diracs modeller var teoretiske muligheder, blandt mange andre.

2.5 Resumé og kritik af Milnes kosmofysik

Efter den tekniske gennemgang af den kinematiske relativitetsteori må det være passende at resumere teoriens vigtigste grundtræk. Milne udvidede det kosmologiske princip fra betingelser om universets homogenitet og isotropi til princippet om et univers, hvor alle dets begivenheder på stor skala er ens for alle observatører. Udgangspunktet for hans kinematik var en samling ikke-vekselvirkende fundamentalpartikler, der, som tiden går, automatisk vil udgøre et partikelsystem beskrevet ved Hubbles lov. Partikelobservatørernes intuition om lokale begivenheders successive tidsordning samt partiklernes indbyrdes symmetriske bevægelsesforhold ledte til Lorentztransformationen via signalfunktions-metoden. Hastigheden af de kommunikerede lyssignaler identificeredes med lysets fart, som pr. konvention var konstant. Tiden, og dermed afstande, var ligeledes konventionel i den forstand, at den kun gav mening i forhold til bestemte former for urgradering. Denne urgradering var grundlaget for Milnes to tidsskalaer, som repræsenterede henholdsvis den relativt

³¹Dengang var universets Hubble-alder som nævnt bestemt til $t_0 = 1,8 \times 10^9$ år $\approx 2 \times 10^{39}$, udtrykt i atomare tidsenheder.

ekspanderende og den relativt stationære ækvivalens.

Tidsskalaens funktion var at bringe overensstemmelse mellem kinematikken og den klassiske dynamik; og de hertil svarende tider, t - og τ - tiden, beskrev to ækvivalente systemer, det fundamentale substratum med en endelig alder, $t = t_0$, og det stationære newtonske, med en tilsvarende uendelig alder for universet. Milnes statistiske behandling af fundamentalpartiklerne resulterede i en verdensmodel, som er illustreret i figur 2.1, og tidsskaleringen transformerede dette kinematiske partikel-system til et dynamisk system, i hvilket gravitationskonstanten måtte være afhængig af den fundamentale kinematiske tid. Udledningen af massebegrebet skete ved en simpel integration, hvor integrationskonstanten fortolkedes som en typisk masse af fundamentalpartiklen. Formlen for den relativistiske massetilvækst var et specialtilfælde af Milnes masseformel, men de var alligevel ikke sammenlignelige, eftersom alle fundamentalpartikler i Milnes system havde samme masse, i skarp kontrast til speciel relativitetsteori. Det skal fremhæves, at Milne ikke opfattede gravitationskraften som andet end en ligning for to partikler under tilstedeværelsen af hinanden [39, s.363]

We see at once the connection between the first law of motion and the law of gravitation; the latter is the next stage of development of the former - the development from one particle to two. It is irrelevant to assume gravitation to be due to any "influence" between the particles; gravitation is the statement of how the pair of particles must move in order to be self-consistently observed by all observers in the universe.

Milnes gravitationsbegreb var altså fundamtalt forskelligt fra klassisk potentialteori. I universets globale tidsskala var der ingen gravitation, og fundamentalpartiklerne bevægede sig uden indbyrdes vekselvirkninger, mens gravitationen så at sige opstod i 'stive' referencesystemer på den lokale skala. Dette anså han som et naturligt resultat af det 'stive' substratoms modstræbelser mod galaksernes naturlige, jævne ekspansion ud i et uendeligt rum.

Efter den synoptiske redegørelse for Milnes teori vil det nu være på sine plads at gennemgå Milnes kosmofysik i et historisk og kronologisk lys. Milnes første udkast til sine ideer i *Nature* [20] gav som beskrevet en "simpelere forklaring" på universets ekspansion, end relativistisk kosmologi kunne tilbyde. Hermed mente han hovedsagelig Einstein-de Sitter modellen, som kort tid forinden var blevet offentliggjort. Milne udbyggede snart sin teori, og udviklede og skærpede sine løsninger og sin argumentation. Han navngav hurtigt sin teori 'kinematisk relativitetsteori' på basis af dennes sparsomme grundlag, der udgjordes af det kosmologiske princip, lyssignalering mellem partikelobservatører og lysets konstante hastighed [23]. Han krævede ingen brug af masse, impuls, energi eller kraft [3, s.6], og han mente at hele teorien kunne udledes på baggrund af det euklidiske rum. Han og McCrea påviste i 1934 demonstrativt, at også "Newton kunne have fundet frem til Einstein-de Sitter universet uden problemer" [25]. I 1935 udkom *Relativity, Gravitation and*

World Structure [3], som var en meget systematisk fremstilling af hans hidtidige og seneste udviklede synspunkter. Her gav han nye og grundige sammenligninger af relativistisk kosmologi og den kinematiske relativitetsteori, og det var i denne bog, han for første gang foreslog muligheden for en tidsafhængig gravitationskonstant, en egenskab som også Dirac senere anså for at være plausibel.

Med sin bogudgivelse var Milne ganske forberedt på negative reaktioner, og han var allerede inden udgivelsen klar over, på hvilke punkter hans teori ville forårsage uenighed. I et brev til Chandrasekhar i september 1934 beskrev han den forventede reaktion [149, Milne → Chandrasekhar]:

I got my book off, but have not had any proofs yet. Unless the book is wholly ignored as the work of a "crank", it is bound to arouse hostile criticism. I shall be told that I do not understand the theory of relativity and that my work fails because it has no experimental basis. The latter however is the whole point.

Det var den generelle holdning blandt de fleste fysikere, at Milne med sin kinematiske model negligerede gravitationen, og Milne kunne ikke blot overhøre denne kritik af sin fundamentale teori. I 1936 kundgjorde han så, at det var muligt at behandle accelerationen af den frie partikel på kosmisk skala i et jævnt 'udsmurt' univers [29], og han bedyrede samme år, at teorien redegjorde for lokal gravitation [28]. Han deducerede da gravitationskonstantens tidsafhængighed og udledte i 1937 afstandskvadratloven på Lorentzinvariant form. I dette år, hvor kontroversen mellem empiristerne og 'deduktivisterne' tog sin begyndelse, bestræbte Milne sig på at vise, at alle hans tidligere indsatser kunne omsættes til newtonsk form ved den blotte regradering af observatørernes ure [32]. Det var altså først i 1937, hans to tids-skalaer for de væsensforskellige ækvivalenser blev indført.

En medvirkende årsag til at Milnes dualistiske tidsbegreb fik en hvis betydning i det videnskabelige samfund var en provisorisk forklaring på et problem, der verserede i slutningen af 30'erne og i 40'erne³².

Man havde via observationer af stjerner og kuglehobe fundet, at visse af disse himmelobjekters aldre ikke stemte overens med den alder, t_0 , man på baggrund af relativistiske beregninger og vha. observerede galakseafstande tillagde universet. Datidens målemetoder viste at disse himmelobjekter var ældre end universet. I 1935 blev problemet om universets alder diskuteret ved et RAS-møde [68], og selvom Jeans ved hjælp af statistiske overvejelser havde anslået galaksernes aldre til 1 billion år, så mente de fleste mødedeltagere at alt tydede på en værdi på omkring 4 milliarder år. Milne afsluttede mødediskussionen med at proklamere sin enighed i angivelsen af en alder af denne størrelsesorden. Til sammenligning er den etablerede værdi i dag bestemt til $13,4 \pm 1,6$ milliarder år.

At stjerner kunne være ældre end universet var naturligvis absurd, og Milnes tidstransformation gav nu et bud på en løsning på problemet. Stjernernes alder

³²Aldersproblematikken behandles i [113], s. 73-79 og s. 291-285.

var nemlig fastsat ved hjælp af metoder, mente Milne, der sorterede under den dynamiske tidsskala, og da universets alder her var uendelig, kunne hver stjerne eller kuglehob antage en vilkårlig, endelig alder uden det førte til nogen uoverensstemmelser. Problemet var således et pseudoproblem, set fra Milne og hans allieredes synsvinkel, og dette kan have medvirket til en vis interesse for kinematisk relativitetsteori, i det mindste i England. I en social sammenhæng kan man sige at problemet blev løst i 50'erne, da man fandt ud af, at afstandene, man hidtil havde tillagt de fjerne galakser, var alt for små, og med Hubbles lov *in mente* ses det, at dette måtte resultere i fastsættelsen af en højere værdi af t_0 ³³.

Med hensyn til fortolkningen af de to indførte tider forekommer det uklart, hvordan Hubbles lov skal placeres inden for Milnes teori. Hvis τ måler den 'newtonske dagligdags' fysik, hvordan skal Hubbles lov da fortolkes? Vi måler $zc = H(t)r$, dvs. at vi, ifølge Milnes terminologi, måler den kinematiske tid $t = H^{-1}(t)$. Det synes derfor uklart hvordan de to konventionelle tidsskalaer kan tænkes at separere det klassisk dynamiske og det kinematiske domæne i praksis. Hvis Hubbles lov realistisk skal opfattes som et udsagn om galaksernes bevægelse, og hvis vi samtidig med vores dynamiske tidsmål τ ikke er i stand til at måle en endelig alder for universet, da synes det uforståeligt, at vi alligevel, i Milnes terminologi, så at sige erfarer et 'glimt' fra det fundationale og utilgængelige ekspanderende substratum. Det var altså en smule uklart, hvilke processer der fulgte t -tiden, og hvilke der fulgte τ -tiden i Milnes praksis. Dette var imidlertid ikke synderlig vigtigt for ham, eftersom disse tider blot var få ud af mange mulige tider; det var blot et spørgsmål om konvention, se evt. [64, s.99]. Milne fandt ikke nogen generelt kriterium for valget mellem tidsskalaerne, men han og McCrea argumenterede for at t - og τ -tiderne havde specielt attraktive egenskaber som adskilte dem fra andre teoretiske muligheder. Som vi senere skal se, udvælgede Milne senere den kinematiske tid som værende 'mere fundamental' end τ -tiden.

De empiriske forudsætninger for Milnes program var Hubbles påvisning af en korrelation mellem galaksernes rødforskydning og deres afstand. Ellers bestod den kinematiske relativitetsteori i alt væsentligt af hypoteser og deduktioner. Det afgørende skridt i Milnes teori var udledningen af bevægelsesligningen for en fri partikel i et ekspanderende substratum; men selvom det syntes naturligt for Milne at antage (2.4) for at være en anden ordens differentialligning, så var dette en antagelse, og ikke en deduktion. Endvidere var partiklens masse ligeledes en definition, ikke en deduktion. Med hensyn til den inertielle masse, var det eneste han deducerede, at $\xi^{1/2}$ er konstant for en fri partikel. Dette gjorde han ved, til substratet, at tilføje et statistisk system der adlød det kosmologiske princip, for dernæst at lade førstnævnte system forsvinde.

Fra 1937 gjorde Milne sin store indsats for at vise, at den kinematiske teori også kunne behandle elektromagnetiske fænomener. Dette skete angiveligt som en

³³Senere er lignende problemer med aldersbestemmelse af universet dukket op, og så sent som i 1994 bestemte astronomer visse stjerners aldre til at være højere end denne Hubble-alder.

reaktion på omgivelsernes kritik af teoriens begrænsede beskrivelsesområde, og Milne resumerede i et brev til Chandrasekhar i 1940 sin indignation over omgivelsernes 'evindelige afvisning' af kinematisk relativitetsteori [149, Milne → Chandrasekhar, s.4]:

It is curious that kinematic relativity makes such hostility. First people criticized it because it blandly forms a solution for world expansion in flat space and because it was supposed to ignore gravitation; Then when I showed it was sound gravitationally they criticized it because it was only a kinematics and not dynamics; then I did this; and then they said it cannot deal with "local" gravitation; then I did this and they said that it could not deal with electrodynamics; now I have done a step at that and someone told me that it will not work the quantum.

Milne nærede dyb respekt for Einstein og de Sitter, og selvom han ikke fandt den relativistiske kosmologi fysisk tilfredsstillende, beundrede han som nævnt Einsteins almene relativitetsteori. Men han anså ikke Einsteins gravitationslov for at være en uundgæelig implikation af den begrebsmæssige basis, som var givet ved beskrivelsen af naturfænomener på baggrund af den relativistiske metrik. På den anden side regnede Einstein ikke Milnes kinematiske model for at være teoretisk velfunderet, og udtalte sig i 1949, i en afvisende tone, kort om Milnes teorier [84, s.684]:

Concerning Milne's ingenious reflections, I can only say that I find their theoretical basis too narrow. From my point of view one cannot arrive, by way of theory, at any at least somewhat reliable results in the field of cosmology if one makes no use of the principle of general relativity.

Disse fire linier udgjorde det eneste, Einstein nævnte om Milnes teori i sin længere redegørelse for datidens kosmologi, og det kan retfærdigvis hævdes, at Einstein stort set ignorerede teorien.

I Chandrasekhars bog [99], der blandt andet indeholder en beskrivelse af sin ven Milnes betydning for astronomien i århundredets andet kvartal, citerer han et brev, han modtog fra Milne under krigen. Her gav Milne udtryk for sin opfattelse af den kinematiske teoris revolutionære karakter³⁴:

I do not know whether I have ever opened my heart to you on that theory. I only know that the texture of the argumentation in it is something utterly and surprisingly different from usual mathematical physics, and that when it comes to be recognized, it will be regarded as revolutionary. It is not usual to crack up one's own work in this way; but it is all very near my heart, and though I know it is rather despised by many people like H.P. Robertson, I feel certain that some day it will be understood.

³⁴Citatet er refereret af Chandrasekhar i [149]. Milne sendte brevet til Chandrasekhar d. 6. juli 1943.

Selvom Milnes påstand om at have tilvejebragt et nyt grundlag for fysikken ikke kan opretholdes, konstituerede hans arbejde et originalt bidrag til kosmologiens udvikling i 30'erne, og hans program påkaldte sig betragtelig opmæksamhed på den tid. Den største betydning af teorien var ifølge Whitrow [133], at Milnes arbejde gav et alternativ til alle datidens verdensmodeller, der havde den almene relativitetsteori som fundament, og det viste, at det jævnt ekspanderende univers var en teoretisk fysisk mulighed. Denne påstand er givet vis rimelig, hvis man nøjes med at betragte teoriens betydning internalistisk, men som vi skal se i næste kapitel, fik Milnes kinematiske relativitetsteori også stor betydning i kraft af sit filosofiske grundlag.

Kapitel 3

Aspekter af Milnes kosmofysik

Den engelske astrofysiker og videnskabsfilosof Herbert Dingle havde allerede kritiseret Milnes teorier i 1933, men hans holdning til de rationalistiske træk i blandt andre Milnes, Eddingtons og Diracs teorier viste sig med fuld styrke, da Dingle i 1937 rettede et tordnende angreb mod denne tankegang. I en tre sider lang artikel i *Nature* angreb han den rationalistiske epistemologi, som disse forskere talte for. Specielt tog han stærkt afstand fra Milnes projekt, og udtrykte i følelsesladede vendinger sin modstand over for den deduktive metodologi, som han mente fordærvede den ordentlige naturvidenskabelige metode, der, ifølge Dingle, eksemplificeres ved Galilei. Dingle havde sprunget en bombe under det lille engelske kosmologiske samfund, og den hede kontrovers der kom til at udspille sig de næste par år, blev som følge heraf årsag til overvejelser af fundamental karakter om kosmologien som videnskab. Kontroversen døede så småt ud i september 1939, da Anden Verdenskrig gav de engelske videnskabsfolk andet at tænke på. Efter en analyse af kontroversen og Milnes filosofiske betydning for kosmologien vil jeg behandle hans heterodokse ideer om en nødvendig forbindelse mellem teologi og videnskab, og kapitlet vil runde af med en kort biografisk fortælling om Milnes seneste år.

3.1 Den kosmologiske kontrovers

Som allerede beskrevet florerede de rationalistiske teorier i 30'ernes England, mens man internationalt foretrak at ignorere den rationalistiske tendens. Engelsk viden-skab og filosofi var almindeligvis kendt for at være repræsenteret ved den opfattelse, at erkendelse hidrører fra sanseerfaringer, men i denne periode var der tendenser i radikal modstrid med den traditionelle nationalånd¹.

Milnes og Eddingtons idealistiske systemer kan ses som en fortsættelse af en anti-empirisk tradition i engelsk filosofi, som blandt andet blev fremført af matematikeren

¹Kontroversen behandles med forskellige indfaldsvinkler i en lang række sekundærkilder. Jeg har hovedsagelig brugt de følgende: [95], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [109], [110], [111], [113], [114], [121], [122], [130] og [135].

og filosoffen Whitehead, hvis matematiske værker Milne havde læst med interesse i starten af 20'erne. Whitehead havde forsøgt at give et forenet billede af virkeligheden, hvor der ikke eksisterede nogen kløft mellem natur og menneske, mellem viden og værdi [111, s.71]. Han foreslog sin egen generelle relativitetsteori, i hvilken han ved hjælp af sin filosofi mente at kunne deducere kosmologiske konsekvenser. Hans stil kan således relateres til senere idealistiske tanker i 30'erne, og selvom Whitehead og andre ligesindede filosoffer mistede den brede respekt på denne tid, kan traditionen siges at være blevet optaget af blandt andre Eddington og Milne, som nu blot overførte tankegangen til det teoretiske studium af universet.

Milne fik i 1934 udgivet en artikel i tidsskriftet *Philosophy* [27], hvor han gav en kort redegørelse for sine filosofiske standpunkter². Han gav her en synoptisk forklaring af de to modsætninger i den videnskabelige metode, den deduktive og den induktive, og han gjorde det her indledningsvis klart, hvem der blandt andre havde inspireret ham til sin artikel [27, s.19]:

Professor Whitehead, Sir Arthur Eddington, and Sir James Jeans have given to the world brilliant accounts of the present position of physics in relation to mathematics and philosophy. What I have to say bears to their writings, the humble relation of an example to a piece of book-work, or of an application of a theorem to the theorem itself.

Milne forklarede at den deduktive metode ”starter med begreber”, mens den induktive metode ”starter med observationer”, og sammenlignede disse begrebers rolle med den rolle, elementer i geometriske axiomer spiller. Han citerede Bertrand Russell i et humoristisk udlæg af sin opfattelse af matematikerens rolle i videnskaben, som tegner en linie tolv år tilbage til hans tale i CUNS-klubben: ”Matematikere ved ikke hvad de taler om og de er ligeglade; de bekymrer sig ikke om det fordi bekymring ville være irrelevant” [27, s.20]. Der er også klare paralleller mellem denne tekst og tiltrædelsesforelæsningen ved Oxford Universitet i 1929, specielt med hensyn til hans sammenligning af metoderne i axiomatisk geometri og teoretisk fysik. Det er altså evident, at Milnes filosofiske ideer så dagens lys i hans teorier før 1930'erne.

I sin videnskabsfilosofiske artikel gav Milne udtryk for sin beundring af både Heisenbergs og Einsteins metoder, som Milne mente var operationalistiske i deres fundament, om end han ikke brugte dette ord. Milne fremførte hvordan Einstein i 1905 havde anvendt metoden på samtidighedsbegrebet, eftersom han havde insisteret på observatørens essentielle subjektive status. Han fortsatte med at eksemplificere, at Heisenberg i 1925 havde introduceret begrebet ’observerbare størrelser’ som et nødvendigt begreb i sin matrix-mekanik, og Milne sammenfattede fremgangsmåden med mærkatet ”Einstein-Heisenberg metoden”³. Han argumenterede for, at selvom Einstein-Heisenberg metoden var ny for 1900-tallets fysik, var den ikke ny for filosofien, og han henviste til klassiske, britiske empirister som John Locke og

²Milne leverede allerede i oktober 1933 denne tekst til British Institute of Philosophy.

³”Einstein-Heisenberg policy”, [25, s.21].

David Hume, men også til de moderne logikere Whitehead og Russell, der sikrede den ”frygtløse udryddelse af ting der ikke kan observeres” [25, s.22].

Milnes fremhævelse af den videnskabelige metode, der ”fremsatte hypoteser”⁴, for derfra at deducere resultater rationelt, var et klart udtryk for en hypotetisk-deduktiv metodologi, i Karl Poppers terminologi⁵. Først efter udledningen af logiske konsekvenser fra præmisserne, kunne fysikeren håbe på overensstemmelser med observationerne⁶.

Det må understreges at observationer, som nævnt, trods alt var vigtige for Milne, eftersom de kunne tilbagevise et deduceret resultat, som derved kunne forkastes; men som Kragh anfører, ignorerede hverken Eddington eller Milne observationel evidens, hvis det støttede deres synspunkter [111, s.71]. Milne insisterede også på den operationalistiske basis for sin teori, men den var i en vis forstand principiel, idet den erfarende observatør var placeret på de hypotetiske fundamentalpartikler, som i praksis aldrig ville have mulighed for at kommunikere med hinanden, alene som følge af deres intergalaktiske afstande. Den filosofiske mærkat ’hypotetisk deduktiv’, som jeg anvender her, er dog ikke helt legitim i sig selv, og Milne og hans allieredes filosofiske position kaldes eksempelvis ”rationalistisk empirisme” i [111, s.108], på trods af den paradoksale ordlyd.

3.1.1 Dingles angreb

I 1937 havde Dingle udgivet en bog med titlen *Through Science to Philosophy* [51], hvor han forfægtede den traditionelle empirisme, og han var derfor sandsynligvis ekstra modtagelig over for filosofiske ’trusler’ fra tidens rationalistiske fortalere som Eddington, Milne og Dirac, hvis teorier i det følgende betegnes ’kosmofysik’. Dingle rettede sine kanoner ind mod den rationalistiske lejr da han samme år fik den korte *Nature*-artikel med titlen ”Modern Aristotelianism” udgivet [52].

Dingle lagde ud med to citater. Det første var en udvalgt passage fra Royal Societys første stiftelseserklæring i 1662⁷, hvoraf det fremgik, at stifternes efterfølgere havde det mål at studere med henblik på at promovere viden om ”natural Things and useful Arts by Experiments” [52, s.784]. Det andet citat var fra en af Milnes artikler fra 1937, i hvilken han skrev: ”It is, in fact, possible to *derive* the laws of dynamics rationally [...] without recourse to experience” [30, s.329]. Det første citat tjente som en løftet pegefingør over for rationalisterne, og kritikken af disse udgjorde en videnskabspolitisk kommentar til tendenser i Englands universitære forhold. Det

⁴Se s.25, nederst.

⁵Den østrigske filosof Karl R. Poppers ’kritiske rationalisme’ blev først bredere kendt i England i 1959. Popper nævnte ikke kosmologi i sine filosofiske værker, men havde dog en interesse for feltet [113, s.246]. I 1940 analyserede han videnskabelige forklaringer på den galaktiske rødforskydning ved effekter, der var forskellige fra Doppler-effekten, og hans korte artikel i *Nature* [76, s.69-70] var faktisk eksplisit inspireret af Milnes system af forskellige tidsskalaer.

⁶Se fx Gale og Uranis behandling i [101, s.68].

⁷To år efter grundlæggelsen af Royal Society.

andet citat eksemplificerede fundamentet for denne tendens ved Milnes rationalistiske og deduktive position.

Dingles primære angrebsmål var Milnes generelle filosofiske standpunkter, og specielt Milnes kosmologiske princip, som Dingle allerede havde kritiseret i 1933. Diracs korte artikel om naturkonstanter [55] var tilsyneladende dråben der fik Dingles bæger til at flyde over, og han skrev: "This [Milne's] combination of the paralysis of the reason with intoxication of the fancy is shown, if possible, even more strongly on Prof. P.A.M. Dirac's letter in NATURE [...] in which he, too, appears as a victim of the great 'Universe' mania" [52, s.786].

Dingle beskyldte kosmofysikerne for at fordærve den gode naturvidenskabelige metode, som blev repræsenteret ved Galilei. Spørgsmålet drejede sig ganske enkelt om, hvorvidt videnskabens grundlag skulle være "observationer eller opfindelser", og Dingle advarede kraftigt imod kosmofysikkens metoder [ibid.]:

Milne and Dirac [...] plunge headlong into an ocean of "principles" of their own making [...]. Instead of the induction of principles from phenomena we are given a pseudo-science of invertebrate cosmology, and invited to commit suicide to avoid the need of dying.

Demarkationskriteriet for videnskabelighed var således bestemt ved den anvendte metodologi, og Dingle klassificerede følgelig kosmofysikken som værende pseudovidenskab.

Årsagen til artiklens titel var Dingles opfattelse af de kosmofysiske teorier som værende atavistiske, i den forstand, at de konstituerede et tilbageslag i den videnskabelige udvikling, en tilbagevenden til aristotelismen med en apriorisk viden om kosmos. Hans udvalgte eksempel synes dog overordentlig uheldigt, da Aristoteles hovedsagelig er kendt som en empiriker, og Descartes ville umiddelbart have været en mere eksemplarisk figur i denne sammenhæng, om end han ikke går nær så langt tilbage i historien.

Med hensyn til Royal Society grundlæggelsesideal, satte Dingle det etablerede videnskabelige samfund direkte op imod Milnes metoder. Han understregede sin modstand over for de store økonomiske midler, der blev postet i denne pseudovidenskab, herunder Milne, der "opfandt sit eget univers", som var "serafisk frit for den mindste observationelle besmittelse" [52, s.785]:

This creation is defined by the "Cosmological Principle", which selects out of all conceivable bodies those which, if they had observers on them, would restrict the behaviour of such observers to a certain mutual conformability. Verbal respects is paid to old-fashioned prejudices by the admission that there *is* an actual universe of which this is only a selected part, and, etiquette having thus been observed, hundreds of pages and thousands of pounds are being spent on calculation of the properties of this "selection" by a growing army of "research" workers.

Med andre ord anså Dingle denne ”forskning” for at være spild af penge, og afslutningsvis gik han i clinch med universitetsinstitutionernes ledende organer i sin rabiate beklagelse af den videnskabspolitiske tilstand i landet [52, s. 786]:

Nor are we dealing with a mere skin disease which time itself will heal. Such ailments are familiar enough; every age has its delusions and every cause its traitors. But the danger here is radical. Our leaders themselves are bemused, so that every treachery can pass unnoticed and even think itself fidelity. It is the noblest minds that are o'erthrown, the expectancy and rose of the State which was lately so fair and in which there is now something so rotten that the very council of elect can violate its charter and think it is doing science service.

Dingles indvendinger var formuleret i et umådeholdent sprog som sjældent ses i offentlig debat mellem fysikere, og reaktionen var derefter. En måned senere opsamlede redaktørerne af *Nature* den eskalerede filosofiske ’trafik’ i et specielt tillæg med titlen ”Physical Science and Philosophy” [74], som blev indledt af Milnes svar på tiltale [31]. Herefter fulgte reaktionerne fra flertallet af prominente britiske viden-skabsfolk, som stort set delte sig i to lejre, og Dingle afsluttede med et svar på disse mangeartede reaktioner [53].

3.1.2 Angrebets reaktioner

I sit svar fastholdt Milne, at hans teori hvilede på Einsteins operationalistiske princip, eller Einstein-Heisenberg metoden, og han henviste til blandt andre Robertson og Walker, der ligesom han selv anvendte dette princip⁸. Den kinematiske relativitetsteoris projekt var, fremhævede Milne, at rekonstruere fysikken, og derved gøre den tilgængelig for en bredere skare. Han understregede at ingen var mere overraskede end han selv over de vide konsekvenser af teoriens simple forudsætninger, og han sluttede svaret af med at anklage den anlagte kritik for at være autoritær [31, s.999]:

The work was first criticized as being solely kinematical. Now that it has been developed so as to construct a dynamics and account of gravitation, critics appear to resent the fact that laws of dynamics come out as deductions. The individual investigator must be left in peace to state his own problems and solve them by his own methods, and criticism of these on the ground that they go beyond Renaissance is merely a form of authoritarianism.

Som det fremgår af tabel 3.1 var Milnes allierede overrepræsenterede i den britiske diskussion i tillægget, men dette er forklarligt, da de angrebne synspunkter måtte forsvarer, mens Dingles position jo allerede var præsenteret i ”Modern Aristotelianism”. Eddington forsvarerede den aprioriske metode og konkluderede, at en stor del

⁸Se [74, s.997] og [111, s.99].

H. Dingle	E.A. Milne
G.D. Hicks	Sir A. Eddington, P.A.M. Dirac
L.N.G. Filon	G.J. Whitrow, W.H. McCrea
H. Jeffreys	J.B.S. Haldane, R. Campbell
W. Peddie	R.A. Sampson, H.S. Hatfield
C.G. Darwin, W. McEntegart	

Tabel 3.1: De medvirkende i *Natures* tillæg.

af de fysiske teorier, efter hans erfaring, ikke repæsenterede viden om et objektivt univers. Han udtrykte iøvrigt en ”stor tilfredsstillelse ved at have chokeret en reaktionær [’galileianer’]” [74, s.1000].

Dirac anførte, at der kun var én brugbar metode, nemlig en passende balance mellem observationer og deduktioner, men herefter formulerede han sin argumentation for det *hypotetiske* forhold mellem universets alder og de ’store tal’.

H.S. Hatfield udtrykte sin bekymring for udsagn som Dingles, idet ”A science kept strictly to facts and formulae by ‘pale Galileians’ would recruit very few geniuses, fewer rank-and-file workers, and - fewer endowments!” [74, s.1009]. Dingles metode ville med andre ord resultere i færre pengebevillinger. Selvom Hatfield ikke eksplisit fremlagde sin filosofiske position, gav han her udtryk for et videnskabs-politisk standpunkt, som modsvarede Dingles angreb mod det urimelige spild af penge på den kosmofysiske forskning.

Den engelske, marxistiske biolog, John B.S. Haldane⁹, der støttede Milnes projekt, fandt det uheldigt, at videnskabsfolk som biologer og geologer sandsynligvis ville føle en vis sympati for Dingles metodologiske argumenter, fordi Milnes kosmologi ”grundlæggende vil påvirke deres videnskaber” [74, s.1003]. Dette forklarede han ved sin fortolkning af Milnes kinematiske tid som kemiens og bioligens endelige tidsskala, mens den dynamiske og uendelige tidsskala hørte til fysiske fænomener, som fx jordens rotation. Haldanes interesse var et eksempel på den disciplinære udbredelse af Milnes arbejde, uover teoretisk fysik og kosmologi. Interessen hos Haldane lå i teoriens historiske natur, og fordi den gav et billede af et univers, der udviklede sig fra en singularitet¹⁰.

Også ’Trinity-fysikeren’ R. Campbell og astronomen Ralph Allen Sampson tilsluttede sig i denne specielle debat Milnes position, og sidstnævnte mente at finde problemets kerne i et epistemologisk problem om teoriladethed, idet han pragmatisk konstaterede følgende [74, s.1007]:

⁹John Burdon Sanderson Haldane blev fortaler for kommunismen sidst i 30’erne og indmeldte sig i 1942 i *the Communist Party* i England, se [124, s.1].

¹⁰Se [61] og [113, s.64].

To confine oneself to what is observable, seems to mean confining oneself to mere verification of experience. For before it is experienced, a prediction is of no value, and after it is experienced, the theory that has led us to look in the right place, must be replaced by the experiments made. Expectation, in fine, depends on theory.

McCrea påpegede, at Dingles indvendinger ”tilsyneladende selv var, hvad han [Dingle] ville kalde aristoteliske, snarere end galileiske” [74, s.1002], og han understregede endvidere, at overensstemmelse med observationer var det vigtigste aspekt af deducerede resultater. Endelig forsvarede også Whitrow sin rationalistiske lejr, og stempledte Dingles filosofi som værende anti-intellektuel.

Blandt deduktivisternes opponenter var den teoretiske fysiker Louis N.G. Filon, der nøgternt indrømmede, at på trods af uenigheder i visse af Dingles påstande, fandt han det rimeligt at ”protestere mod den moderne fysiks tendens til at gå frem fra abstrakte og universelle apriori matematiske teorier”. Han opponerede imod, at ”visse videnskabsmænd tilsyneladende tænker, at de kan løse alle naturens problemer ved hjælp af en altomfattende matematisk intuition” [74, s.1006]. Dette citat udtrykker kontroversens omdrejningspunkt, eftersom Dingle, der med sine allierede regnede observation og induktion for at være den korrekte naturvidenskabelige metode, som foreskrevedes af engelsk tradition, derfor anså deduktivismen for blot at repræsentere psykologiske fænomener frem for egentlig fysik. Filon skrev fx om dem, at ”hvad de virkelig gør, er ikke at forklare naturen, men at udforske mulighederne i menneskets sind” [ibid.].

Også fysikerne W. Peddie og Harold Jeffreys, og filosoffen G.D. Hicks, sigtede mod kosmofysikerne, men Jeffreys var den eneste hengivne empiriker, der eksplisit bakkede Dingles angreb op. Han mente, at problemets ophav lå i deduktivisternes fremhævelse af matematikkens enestående dyd, og han fremhævede derved sit eget utilitaristiske syn på matematikkens funktion [74, s.1005]:

Instead of being regarded as what it is, a tool for dealing with arguments too complicated to be presented without it, it has become emotionalized to such an extent, that many people think that nothing but mathematics has any meaning,

og han henviste herefter til Russells eksemplariske citat om matematikeren, der ikke ved hvad han taler om.

Cambridge-fysikeren Darwin, der havde lagt det teoretiske grundlag for Milne-Fowler ligningen, foretrak en mere induktiv-empirisk tilgang end fx Dirac, men forsvarede alligevel sin kollega imod Dingles voldsomme angreb [74, s.1008]:

Coming down to the details of the controversy, Dr. Dingle seems to want to hamper speculation by forbidding all but the most pedestrian forms of inductive reasoning [...]. If Dirac is not to be allowed to conjecture the age of the

earth from certain curious numerical coincidences, then Maxwell committed quite as great a crime in conjecturing that the velocity of light was the same thing as the ratio of the electric and magnetic units. It is absurd to maintain that such guesses are illegitimate.

På den anden side understregede Darwin samtidig, at visse af kosmofysikernes synspunkter om at naturen er ”indeholdt i vore hjerner” var et yderst uvigtigt udsagn, ligegyldigt om det skulle være sandt eller ej, og Darwin mente iøvrigt, at debatten var frugtesløs og meningsløs. Endelig fremlagde W. McEntegart Dingles sprogbrug med hensyn til aristotelismen som historisk ukorrekt, men valgte ikke eksplisit side i den filosofiske debat.

Dingle besvarede de forskellige angreb i tillæggets afslutning, og gjorde det klart, at det ikke specielt var teorierne af Milne, Eddington eller Dirac, der bekymrede ham, men at det i højere grad var de videnskabspolitiske og kulturelle standarder, der var på spil. Ikke desto mindre fremhævede han endnu engang Milnes pseudovidenskab [53, s.1011-1012]:

I have no objection to theorems existing in their own right, any more than to the Choral Symphony existing in its own right, but I should very much like to know by what right Prof. Milne steals a march of Beethoven by publishing his creations in scientific journals. [...] he does not want to know about the external world; definitions are all that matter.

Milnes teorier var altså fantasiens værk, og burde forblive der, fremfor at blive udbredt via videnskabelige tidsskrifter. Darwins påstand om at Dingle hæmmede al spekulation blev besvaret eksplisit ved følgende biologiske metafor [53, s.1012]:

I cited Prof. Dirac's letter not as a source of infection but as an example of the bacteria that can flourish in the poisoned atmosphere; in a pure environment it would not have come to birth, and we should still have the old, incomparable Dirac.

Men Dingle opponerede stærkere imod Darwins ligegyldige holdning til studiet af videnskabens udvikling, og Dingles videnskabspolitiske advarsel til aristotelismens autoritarisme afsluttede denne første akt af kontroversen [53, s.1012]:

The criterion from distinguishing sense from nonsense has to a large extent been lost: our minds are ready to tolerate any statement, no matter how ridiculous it obviously is, if only it comes from a man of repute and is accompanied by an array of symbols of Clarendon type. If this state of mind exists among the *élite* of science, what will be the state of mind of a public taught to measure the value of an idea in terms of its incomprehensibility and to scorn the old science because it could be understood? The times are not so auspicious that we can rest comfortably in a mental atmosphere in which

the ideas fittest to survive are not those which stand in the most rational relation to experience, but those which can don the most impressive garb of pseudo-profoundity. There is evidence enough on the Continent of the effects of doctrines derived "rationally without recourse to experience". To purify the air seems to me an urgent necessity: I wish it were in other and better hands.

Det videnskabelige demarkationskriterium var, for Dingle at se, næsten forsvundet, og hans udsagn må læses i forhold til befolkningens svigtende værdsættelse af videnskaben i denne periode. Han frygtede den mulighed, at kosmofysikerne ville få monopol på videnskaben, hvilket er ganske forståeligt, når det udvalgte citat læses med henblik på Sovjetunionens videnskabspolitik.

Som det indiceres af Kragh [111, s.101] kunne Dingles reference til kontinentale doktriner hentyde til sovjetisk scientisme, der i England repræsenteredes af blandt andre Haldane og den engelske, marxistiske videnskabshistoriker John Desmond Bernal. Han skrev i 1939 bogen *The Social Function of Science*, hvor han i første kapitel gav en karakteristik af de anti-videnskabelige følelser i 30'ernes England, og han skrev først om ophavet til den stadigt stigende mysticisme [44, s.2]:

Not only have the material results of science been objected to, but the value of scientific thought itself has been called in question. Anti-intellectualism began to appear as the result of the impending difficulties of the social system towards the end of the nineteenth century, and found expression in the philosophies of Sorel¹¹ and Bergson.

Bernal redegjorde for, hvordan instinkt og intuition dengang blev vurderet som værende vigtigere end fornuften: "This mysticism and abandonment of rational thought is not only a sign of popular or political disquiet. It penetrates far into the structure of science itself", og han fortsatte [44, s.3]:

Scientific theories, particularly those metaphysical and mystical theories which touch on the universe at large or the nature of life, which had been laughed out of court in the eighteenth and nineteenth centuries, are attempting to win their way back into scientific acceptance.

Bernal var, sammen med blandt andre Haldane tilhænger af den videnskabelige marxisme. Denne ideologi agiterede for et samfund bestående af en ledende videnskabelig elite, og talte for højere lønninger, bedre faciliteter og frihed for videnskabsfolk til at udforske hvad *de* fandt vigtigst, og disse forbedringer afhæng af en videnskabeligt veluddannet offentlighed [124, s.4].

Bernals anti-mysticisme og hans indirekte angreb på kosmofysikken¹² er således en kritik af en helt anden karakter end Dingles, som direkte udtrykte sin anti-rationalisme, og Milne repræsenterede således både mysticisme og rationalisme,

¹¹Bernal refererede her til den franske socialistiske aktivist og filosof Georges Sorel.

¹²"theories [...] which touch on the universe at large".

afhængig af kritikeren. Det er imidlertid ikke muligt at rationalisere de mange forskellige lag af datidens politiske, nationale og videnskabelige følelser, og det er nok en umulig opgave at forsøge at forklare bevæggrundene for de forskellige meninger.

Bernal henviste mere eksplisit til kosmofysikkens repræsentanter i sin diskussion af ”videnskaben som ren tanke” [44, s.4]:

Through the work of Jeans, Eddington, Whitehead and Haldane [...], a new scientific mythical religion is being built up [...]. There is no doubt that this apologetic use of science is one of its social functions in present society, but it cannot provide justification of science as such [...].

Han var altså blandt andet skeptisk over for sin partipolitiske fælle Haldane, når det gjaldt de spekulative tanker om universet.

Nogle måneder efter specialtillægget i *Nature* noterede Haldane i samme tidsskrift, at Dingles angreb på Milne var sammenligneligt med den sovjetiske Trofim P. Lysenkos angreb på en gruppe genetikere [62]. Genetikerne havde ifølge Lysenko udvist anti-darwinistiske tendenser i deres teorier om visse afgrøders ikke-degenererede og stabile eksistens gennem flere århundreder. I et land, hvor darwinismen konstituerede den ideologiske basis for officiel filosofi, som fortolket af Friedrich Engels og Lenin, blev disse genetikere således anset som statsfjendske. Haldane beklagede Lysenkoaffæren, hvis følgerne af hændelsen blev en begrænsning i genetikernes arbejde, og bedyrede samtidig sit marxisistiske ønske om videnskabelig frihed.

Dingle afviste måneden efter Haldanes anklage blankt, og kundgjorde samtidig sin enighed i vigtigheden af den frie tanke, men at han ville ønske, Milne ville ”holde op med at opfinde systemer og fortælle os hvad Gud ikke kan gøre, og ville vende tilbage til de problemer i astrofysik, som han er så særdeles begavet til at løse” [54, s.590], og han fortsatte i sin rabiate stil: ”Hvis professor Milne ville eliminere ord som tid, tåge, univers, ... fra sine artikler, og substituere med x,y,z,..., ville jeg ikke længere forsøge at begrænse hans aktiviteter [mere] end surrealisterne” [ibid.].

I USA havde specielt Tolman markeret en mere tolerant position, idet han ikke mente, de to modstående metoder nødvendigvis behøvede at være disjunkte. Han accepterede de to metoder til konstruktion af teorier, og skrev allerede i 1932: ”But we must not let this just admiration [for Galilei] blind us to the power and skill of those other theoretical physicists who obtain the suggestion for physical principles from the inner workings of the mind [88, s.373]. Tolmans accept af begge metodernes gyldighed blev, som det fremgår, ikke udvist i det europæiske samfund¹³.

Artikler om kosmologiens metode florerede i de følgende år i blandt andet *Nature* og *The Observatory*, og man diskuterede kosmologiens epistemologiske og metodologiske grundlag. Efter krigens udbrud daledes antallet af sådanne artikler, men fx McVittie kritiserede i november 1940 de ”kinematiske relativisters” påstand om

¹³I året 1930-1931 tilbragte Dingle et år hos Tolman ved Cal Tech i USA, men han optog tydeligvis ikke Tolmans filosofiske tolerance i denne sammenhæng, se [104, s.285].

teoriens rent deduktive konstruktion. McVittie havde oprindeligt vist en vis sympati for Milnes teori, men nu angreb han teoriens filosofiske fundament. Han kritiserede Milnes konventionalistiske definition af lyshastigheden samt, at den frie partikels acceleration i substratet skulle være afhængig af tid, position og hastighed. Denne påstand var for McVittie at se det samme som at postulere en naturlov, i modstrid med Milnes teori, der ikke skulle gøre brug af naturlove, men blot af observerbare størrelser, og han afsluttede sin kritik som følger [66, s.280-281]:

It is eventually borne in on the puzzled reader that Milne and Walker are not trying to understand Nature but rather are telling Nature what she ought to be. If Nature is recalcitrant and refuses to fall in with their pattern so much the worse for her.

Milnes reaktion på disse påstande fremgår af et brev til Chandrasekhar¹⁴:

Have you read MacVittie [*sic*] in the Observatory for November? Such stupidity is amazing - he has not the foggest [*sic*] concept by what is meant by a kinematical argument; and his article contains flagrant falsehoods. I intend to be pretty tart in the reply.

Hans svar blev da også formuleret i en, for ham temmelig ukarakteristisk hård tone, og retorikken grænsede til det arrogante i *The Observatory*: "I am surprised that Dr. McVittie's failing to take such elementary points. [...] If he cannot follow our more technical papers, he should not criticize the same material in semi-popular writings" [36, s.13].

Også Walker besvarede kritikken, men i en mere forsonlig tone, og forsvarede den deduktive metode: "With us [Walker, Milne] observations are used only to check predictions, and appeal to experience is made not at the end but at the beginning when we form our common-sense postulates" [36, s.23].

Herpå indicerede McVittie i sit noget skuffede og forargedte svar, at Milne og Walker gjorde brug af autoritære argumenter, hvilket man ikke kan fortænke ham i [36, s.25]:

In their replys Milne and Walker use a similar method against me. Milne, with thinly veiled sarcasm, suggests that I am a dull-witted reactionary sort of fellow, with a taste for making "mis-statements". Walker, with more subtlety, call my criticisms [...] a "collection of dislikes". The implication is clear: kinematical relativity is above criticism and therefore a would-be critic can only be actuated by stupidity or ill-temper or both.

Denne *ad hominem* diskussion blev den sidste af en sådan følelsesladet karakter i forbindelse med Milnes kosmologi.

¹⁴Brevet, der er dateret 27. november 1940, refereres af Chandrasekhar i [149].

Omkring begyndelsen af 1945 forsøgte Haldane at deducere et omfattende, evolutionært verdensbillede ved hjælp af Milnes teori, om end han indrømmede at det var yderst spekulativt. Haldane skjulte ikke, at hans forkærlighed for kinematisk relativitetsteori var ideologisk rodfæstet, idet Haldane så den som en måde at undgå valget mellem de traditionelle kosmologier, der beskrevedes enten med en begyndelse eller som et uendelig gammelt univers. Til den første universmodel spurgte han: ”Hvorfor er det [universet] ikke blevet skabt bedre?”, og til den anden type, ”hvorfor er det ikke blevet bedre i løbet af evigheden?” [63]. Som Kragh anfører, var dette et rimeligt spørgsmål at stille for en europæer i januar 1945 [113, s.65]. Men med Milnes teoriændredes naturlovene sig med tiden, og for Haldane var dette med til at give livet lysere fremtidsudsigter, og Milne støttede Haldanes kosmiske tanker helhjertet.

Den såkaldte Haldane-Milne hypotese [113, s.65] gik ud på, at universets skabelse ved $t = 0$ var en singularitet, et system uden udstrækning, med bølgelængden 0, og derfor med en uendelig energi. Hypotesen blev fremsat uden at nævne Lemaître, som iøvrigt stillede sig meget tvivlende over for hele ideen. Han argumenterede for, at alle fysiske fænomener var så intimt forbundne, at det var umuligt at separere dem i to forskellige tidskategorier. For ham grænsede Milnes teori til det rene nonsens [113, s.66].

Milnes teori blev citeret mindre og mindre op gennem 40’erne, og den spekulative kosmofysik fyldte stadig mindre i den offentlige videnskabsdebat. Hjernerne der konstituerede det kosmologiske samfund kunne ikke drive udviklingen af de kosmologiske teorier uden nye empiriske data, og de færreste videnskaber var ligeså data-udsultede som kosmologien.

3.1.3 Steady-state teorien

I december 1948 arrangerede McCrea en præsentation af en ny teori, der var formuleret af tre videnskabsmænd, den engelske astronom Fred Hoyle, og de to unge østrigsk-engelske fysikere Hermann Bondi og Thomas Gold. Præsentationen fandt sted ved et RAS-møde i Edinburgh, og til stede var den britiske matematiker Edmund T. Whittaker, Milne, Freundlich, fysikeren Max Born og formanden Greaves [69]. Teorien foreslog det ”perfekte kosmologiske princip”, som antog, at universets storskalastruktur var både rumlig homogen og isotrop, samt den samme tit enhver tid; universet var i en *steady state* [69, s.214].

Hoyle betonede en vigtig forskel mellem Gold og Bondis synspunkter og sine egne, idet han indførte det perfekte kosmologiske princip som en konsekvens af introduktionen af en skabelses-tensor, $C_{\mu\nu}$, i feltligningerne¹⁵, mens de indførte principippet af mere filosofiske grunde, som et kriterium, der ifølge Hoyle blev pålagt universet af ”æstetiske årsager” [69, s.216], og Hoyle viste, at den nye ligning let kunne løses for

¹⁵Feltligningerne fik altså udseendet $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + C_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}$, [69, s.216] og [113, kap.4].

en jævn massefordeling i universet. Ifølge denne teori var energien ikke bevaret¹⁶ og universet var hjemsted for en kontinuert skabelse af stof.

Born var skeptisk over for teorien, Whittaker beundrede hele det nye arbejde, og Freundlich ytrede ikke sin holdning under mødet. Milne var også skeptisk, og spurgte Bondi og Gold, hvorfor de ville påføre problemet ”endnu et dogme”, når nu hans egen kinematiske relativitetsteori allerede gav en tilfredsstillende forklaring på universets kinematik og dynamik.

Det er nok unødvendigt at anføre, at de tre pionerer var under indirekte påvirkning af datidens eksisterende teorier, men at påstå, at steady-state teorien var en direkte konsekvens af den kinematiske relativitetsteori er en overdrivelse. Gale og Urani [105], der behandler forbindelserne mellem Milne og Bondi, konkluderer at den kosmologiske kontrovers ”formede kursen for efterfølgende kosmologisk tankegang via sin indflydelse på form og indhold af Bondis steady-state teori” [105, s.373], og dette må anses for at være en rimelig påstand. I slutningen af 40’erne var Milne næsten alene om at forsvere sin kinematiske relativitetsteori, og steady-state fysikerne accepterede ikke Milnes kosmologi, som de betegnede som kunstig og umulig at verificere eksperimentelt [113, s.177]. Bondi roste imidlertid kinematisk relativitets-teori for dens metodologiske kvaliteter, selvom han ikke mente, den gav en gyldig beskrivelse af universet [ibid.]. Det var dels teoriens deduktive struktur der appellerede til Bondi (og i nogen grad Gold), dels at den insisterede på, ikke at tilhøre en gren af almen relativitetsteori. Hoyle derimod accepterede ikke den kinematiske model, hverken videnskabeligt eller metodologisk.

Den kosmologiske kontrovers, som jeg har behandlet i det foregående, gav anledning til at diskutere spørgsmål om kosmologiens demarkationskriterier, og den brogede skare af fysikere, matematikere, astronomer og astrofysikere, der debatterede den moderne kosmologis grundlag, har formodentlig skærpet deres filosofiske bevidsthed om kosmologien som videnskab; men hvilke konsekvenser fik kontroversen ellers? Gale og Urani [101] peger på Robertson-Walker metrikken, som et udkomme af kontroversen. De hævder, at der ikke kan være nogen tvivl om, at den metodologiske drivkraft i Robertsons arbejde blev givet af Milne [101, s.72]. Som jeg beskrev i kapitel 2.4.2 var Robertson imidlertid meget skeptisk over for Milnes metodologi, og Gale og Uranis udsagn må forkastes, med mindre den nævnte ’drivkraft’ ikke skal forstås som en positiv påvirkning, men en provokerende årsag til Robertsons modreaktion. Robertson lod sig imidlertid inspirere af Milnes operationalisme i udledningen af metrikken, men dette vedrører ikke nødvendigvis metodologien. I stedet vedrører dette det videnskabeligt eksistentielle spørgsmål om, hvad det er for fysiske entiteter, teorien beskriver, i dette tilfælde observerbare størrelser.

Som Milnes teori udviklede sig fra slutningen af 30’erne og ind i 40’erne, blev det stadig klarere at religion var en vigtig del af hans kosmologi. Haldane-Milne

¹⁶Dette gjaldt, idet den kovariante afledede ikke er nul, eftersom $T^{\mu\nu}{}_{;\nu} = C^{\mu\nu}{}_{;\nu}$, se [122, s.215]. Dette er dog et noget teknisk punkt som jeg af tidsmæssige årsager ikke vil komme nærmere ind på her. Hoyle mente fx ikke at teorien brød energibevarelsen.

hypotesen udtalte sig også om 'skabelsen', og da Milne, som nævnt, var en hengiven kristen, fandt han det nødvendigt at forbinde videnskab og tro, og han indlemmede sine noget uortodokse teologiske tanker i sin teori om et rationelt univers, der blev til, takket være en rationel skaber.

3.2 Religiøse aspekter af Milnes kosmofysik

Ved et symposion i Bruxelles i 1947 blev Milnes teori diskuteret, efter gennemgangen af to artikler. Den ene artikel var Milnes redegørelse for sin kinematiske relativitetsteori, i hvilken han flere gange fremførte, at teorien reflekterede Guds tanker og handlinger. Den anden tekst var Dingles diskussion af fysikkens tidsbegreb, men da Dingle ikke var til stede ved symposiet, blev hans bidrag ikke diskuteret i nævneværdig udstrækning. Blandt deltagerne var den tysk-schweiziske matematiker Herman Weyl, Lemaître og Milne.

Milne brugte et ualmindeligt theologisk argument til at vise, at det skabte univers måtte være uendeligt, og at skabelsen havde fundet sted i en punkt-singularitet: "To put it badly, creation of a system of finite extent at one time is a logical impossibility; something beyond the power of God himself. Thus however unnatural may seem the idea of creation at a point" [41, s.10]. Eksempelvis var Einsteins model en logisk umulighed, idet den postulerede et endeligt rum. Endvidere påpegede Milne, at hvis den biologiske evolution skete ved indtræffende mutationer, måtte universet være uendeligt, eftersom der ellers blot ville kunne "praktiseres et endeligt antal evolutionære eksperimenter", hvilket ville være ensbetydende med at "komme guddommen i en spændetrøje" [41, s.11]. Ifølge Milnes tankegang, var skabelsen af et uendeligt univers et udtryk for Guds manifestation af sin almagt, og han afsluttede sin rapport med endnu engang at understrege sin tro: "The system cries out that it was made by God outside time and space" [41, s.25].

Ved diskussionen vendte Lemaître sig imod den kinematiske model, som han fandt både vilkårlig og kunstig, men han kommenterede ikke Milnes religiøse budskab¹⁷. Det gjorde derimod Weyl, som anførte følgende passus [41, s.64-65]:

It seems to me highly objectionable to infer *creation by a divine power* from the fact that in terms of one of these parameters, t , there is an absolute beginning of time $t = 0$ - unless one shows on physical grounds that this parameter t is the natural measure of time in such a strong sense as, e.g. the Kelvin thermodynamical scale [...] is the natural scale of temperature.

På den anden side var der jo ingen begyndelse i den dynamiske τ -skala.

¹⁷Lemaître, der jo både var præst og videnskabsmand, havde ikke meget respekt for dem, der for tolkede Bibelen bogstaveligt, som en videnskabelig tekst. I modsætning til Milne mente Lemaître, at astronomi og teologi var to separate områder, der ikke skulle blandes sammen, se [113, s.48].

Milne gav, som nævnt, en sidste, omfattende redegørelse for sin kinematiske relativitetsteori i sit manuskript til *the Cadbury Lectures*, som han færdiggjorde bare ti dage inden sin pludselige død den 21. september 1950¹⁸. Temaet i foredragsrækken var, som titlen beskrev, moderne kosmologi og dens betydning for den kristne gudsidié. På tekstens første side klargjorde han sin religiøse position med hensyn til Guds rolle som skaber. Gud havde, i sin rolle som skaber af alt stof, dannet det synlige univers, men han havde også skabt naturlovene, og Milne stillede spørgsmålet, om disse love var almagtens befalinger, eller om Gud selv var begrænset af disse ”naturlenes egen natur” [6, s.1].

Derpå formulerede Milne sine filosofiske standpunkter, og angav sin opfattelse af en vigtig forskel mellem fysik og filosofi: ”Fysikken er mere dogmatisk end filosofi” [6, s.6]. Denne opfattelse havde ændret sig hos Milne i løbet af udviklingen af hans teori, og det fremgik klart, at han anså sig selv som et offer for dogmatismen. Han henviste til fraser som ”den accepterede teori...” og ”i modsætning til accepteret teori...”, som ofte fandt sted i ortodoks fysiklitteratur, og han konstaterede, at det ikke var klart, *hvem* det var der accepterede teorierne. Han foreslog at erstatte den dogmatiske generation af ”tænkere” med den ideelle ”sammensatte tænker”, som var ”konservativ, når han bliver angrebet, men revolutionær når han overlades til sig selv”. Om han var reaktionær bekymrede ham iøvrigt ikke, så længe han kunne være ”fuldstændig ærlig”, men også ”en smule fanatisk og ivrig efter at forsøre sig” [6, s.7]. Endvidere mente Milne, at den teoretiske fysiker måtte have ”mod til at holde sig til sine teorier [...] på trods af angreb fra laboratoriet”.

At Milne til en vis grad så sig selv i denne rolle for en ideel forsker, nævnte han ikke eksplisit, men som det er fremgået af min undersøgelse af kosmofysikkens effekt blandt kollegerne, sammenholdt med Milnes egen opfattelse af sin teori, er det ikke utænkeligt, at han identificerede sig med denne ”sammensatte tænker” - hvem ville ikke gøre det? På den anden side udviste han en behørig ydmyghed i bogens indledende bemærkninger om teorien: ”As with Touchstone, they may be poor work, but they are my own” [6, s.9].

Fristelsen til at bruge kosmologien i videnskabelige argumenter for kristendommen, i dennes mange afskygninger, var ikke enestående for Milne. Også Whittaker foreslog et moderniseret thomistisk gudsbevis baseret på den nye kosmologi, se [113, s.252]. Thomas Aquinas udviklede i højskolastikken en theologisk syntese af kristendom og aristotelisme, som kort fortalt argumenterede for, at erkendelsen begynder med sanseindtryk, og at vi med naturlig fornuft kan erkende mange af universets principper, blandt andet begrundelser for at hævde, at universet er skabt af et højere væsen. Med andre ord er der en glidende overgang mellem fornuft og åbenbaring, eller tro¹⁹.

¹⁸Whitrow redigerede Milnes bog *Modern Cosmology and the Christian Idea of God* [6], og han skrev i forordet: ”[The lectures] may be regarded as the scientific testament of one of the most original natural philosophers of our time”.

¹⁹Aquinas (1226-1274) havde flere gudsbeviser, herunder den såkaldte kosmologiske variant, hvis

Med hensyn til den nye steady-state teori, var Milne ikke kun skeptisk af viden-skabelige årsager. Steady-state teorien var også religiøst utilfredsstillende for Milne. Dette var en ikke-epistemisk faktor, der som nævnt betød stadig mere for ham, og han afviste i 1950 denne ”seneste mode med kontinuert skabelse” med føleseladede argumenter imod, at ”skabelsens forunderlige mirakel skulle forklares ved en sporadisk dannelse af hydrogenatomer ud af intet” [6, s.77]. Milne anførte, at det ikke var et verdensbillede, der formæde at få ham til at værdsætte Gud, og dette var altså endnu en grund til at afvise teorien²⁰.

Milne kritiserede også Lemaîtres teori, der foreslog skabelsen som en eksplasion af et superatom, og Milne åbnede muligheden for begrænsninger i Guds almægtighed ved hjælp af fysiske argumenter. Det totale impulsmoment er nul i en fysisk eksplasion, og det var for Milne at se umuligt at forene den ”transcendentale skabelseakt” med et sådant totalt impulsmoment, eftersom dette enten ville betyde eksistensen af endnu en uforklarlig konstant, ’universets impulsmoment’, eller muligheden for et referencesystem med et impulsmoment lig med nul, ”and even Omnipotence could not fix such a frame” [6, s.58]. Med hensyn til den transcendentale singularitet, der repræsenteredes ved hvert punkt på randen af kuglen $K(O, ct)$, ville det for altid være umuligt at erfare denne hændelse i Milnes system: ”God is unobserved and unwitnessed, even in principle” [ibid.], og det var Milnes vigtige forehavende at gøre det klart, at det var nødvendigt at medtage Gud i kosmologiske teorier: ”But investigations who leave out God, the *raison d'être* of the universe, find themselves lamentably handicapped in dealing with cosmological questions” [6, s.62].

Ikke kun umuligheden af det skabte univers med en foretrakken retning udgjorde en begrænsning i Guds almagt; også en foretrakken bevægelse var uden for Guds skaberkraft. I sin beskrivelse af gravitationen i sit dynamiske system bedyrede han endvidere en begrænsning hos skaberen, som fulgte af den ”uundgåelige konsekvens” af ligningerne. Der var ikke nogen tvivl om, at tyngdekraftens afstandsafhængighed hverken gik som $r^{-(2-\epsilon)}$ eller $r^{-(2+\epsilon)}$, hvor ϵ var en vilkårligt lille tal. At ϵ netop var lig med nul var et indiskutabelt faktum [6, s.85]:

It is just $1/r^2$ and no other - in a suitable frame of reference. God is not free to design the law of gravitation as He pleases, any more than He is free to let the sum of the angles of a plane triangle add up to something different from 180° . With God all things are not possible.

Når Milne omtalte skabelsen, kunne hans overbevisning tyde på et deistisk verdenssyn. Dette var imidlertid ikke tilfældet, idet Milnes overvejelser om evolutions-teoriens ”uendelige antal af mutationer” i sig selv var en indikation af Guds stadige intervention i historien [6, s.153]:

essens er, at når verden eksisterer, må der også findes en Gud og skaber af verden. For en kort oversigt over klassiske gudsbeviser, se [115, s.161-164].

²⁰Som det fremgår af *Cosmology and Controversy* [113, s.252-253], var de tre steady-state pionerer ateister og enten fjendtlige eller ligegyldige over for organiseret religion.

God, that is to say, did not wind up the world and leave it to itself; He created the universe, and therewith also endowed it with the only law of inorganic nature consistent with its content [...]. That is of the essence of Christianity, that God actually intervenes in History.

Citat er dog absolut ikke originalt, og var fx blot en gentagelse af Newtons argumenter. Dette ledte ham ind på kristendommens bevis for Guds intervention i historien, Jesus Kristus [ibid.]:

God's most notable intervention in the actual historical process, according to the Christian outlook, was the Incarnation. Was this a unique event, or has it been re-enacted on each of a countless number of planets? The Christian would recoil in horror from such a conclusion. We cannot imagine the Son of God suffering vicariously on each of a myriad of planets.

Milne gav udtryk for, at spørgsmålet om hvorvidt Guds legemliggørelse kun havde fundet sted på jorden var vanskeligt og interessant. Især set i lyset af den nye radioastronomi, som i slutningen af 40'erne var i en begyndelsesfase, men som imidlertid ikke blev betragtet som kosmologisk relevant før i midten af 50'erne²¹. Han skrev om denne nye astronomiske detektionsteknik [6, s.152]:

[...]; everyone has heard of the new subject of radio-astronomy, which has discovered the reception by ourselves of radio signals apparently issuing from sources in the Milky Way. It is not outside the bounds of possibility that these are genuine signals from intelligent beings on other 'planets', and that in principle, in the unending future vistas of time, communication may be set up with these distant beings. People already talk of the space-ships of the future, of rocket-propelled projectiles, of 'flying saucers' from Mars.

Med disse nye muligheder foreslog Milne en særpræget løsning på problemet om legemliggørelsens enestående status i kristendommen, idet han fortsatte [6, s.154]:

[...] there is no prima facie impossibility in the expectation that first of all the whole solar system, secondly our own group of galaxies, may by inter-communication become one system. In that case there should be no difficulty in the uniqueness of the historical event of the Incarnation. For knowledge of it would be capable of being transmitted by signals to other planets and the re-enactment of the tragedy of the crucifixion in other planets would be unnecessary.

Med 'unødvendigt' mente han sandsynligvis, at den interplanetariske kommunikation gjorde det unødvendigt for Gud at statuere flere sådanne tragiske eksempler

²¹Allerede i 1950 detekterede engelske astronomer radiobølgeudsendelser fra Andromedagalaksen, den første identificering af en ekstragalaktisk radiokilde, se [113, s.306].

for befolkningen på andre planeter. Denne videnskabelig-kristne hybrid var overordentlig heterodoks i form af dette bud på en principiel løsning af et yderst hypotetisk og filosofisk problem.

Milne sluttede sine *Cadbury Lectures* af med at bedyre sin mistillid til alle andre kosmologiske teorier [6, s.160]:

I have admittedly chosen chiefly to discuss my own brand of cosmology, because I have no faith in other theories of cosmology. [...] I was brought up as a mathematical physicist; I was also brought up as a member of the Church of England. And though I have had my periods of agnosticism²², I have always recovered from them. I do most fervently believe that this universe was created by Almighty God.

Milnes teologiske ideer synes ikke umiddelbart særlig gennemtænkte eller blot konsistente. Samtidig med at han erklærede Gud for almægtig og protesterede mod at ”komme guddommen i spændetrøje” (s.88), erklærede han at Gud *kun* kan have skabt et uendeligt univers af Milnes type; og han argumenterede for begrænsningerne i Guds almægtighed - ”even Omnipotence could not fix such a frame” (s.90). I det hele taget var Milne ivrig efter at begrænse Skaberens muligheder; med alle de begrænsninger, hvad bliver der da tilbage af Guds almagt, jvf. citatet overfor?

I 1951 henvendte pave Pius XII sig til den videnskabelige samfund med et overraskende budskab. Paven var interesseret i mange videnskaber, herunder astronomi, og han ønskede at fremstille de seneste videnskabelige resultaters støtte af kirkens doktriner i en tale til det pavelige videnskabsakademi. Den 28. november gav han en redegørelse for kosmologiens støtte af begrebet om Skaber. Han godkendte big-bang modellen og udtrykte, at de moderne kosmologiske modeller, med rimelig overbevisning gav et bevis for en transcendental skaber [113, s.256]: ”Everything seems to indicate that the material universe had in finite times a mighty beginning” [96, s.145].

Paven var fascineret af teorier om et ekspanderende univers, og var specielt påvirket af Jeans²³, Milne og Whittaker [113, s.256]. Lemaître var, ikke overraskende, utilfreds med pavens udtalelser, fordi han sammenblandede teologi og videnskab, og fordi big-bang modellen jo stadig blot var en hypotese. Sammen med direktøren for Vatikanets observatorium lykkedes det ham at overbevise paven om, at de påståede tætte forbindelser mellem videnskab og teologi hverken var til gavn for videnskaben eller for kirken, og paven lod aldrig siden moderne kosmologi støtte kirkens doktriner [113, s.258].

²²I sine kronologiske, autobiografiske notater [147], hvor han med stikord gennemgik sin karrieres højdepunkter, figurerede ordet ”Agnosticism” eksempelvis som overskrift for perioden 1919-1925.

²³Se [113, s.42 & s.60].

3.2.1 Vurdering af Milnes teori

Man kan sige at Milnes teori levede med ham, og siden hans død i 1950 har den ikke i særlig høj grad optaget videnskabsfolk i moderne kosmologi. Dog var der til en vis grad en filosofisk baseret forbindelse til Bondis udlæggelse af steady-state teorien. Det synes oplagt at spørge, hvorfor Milnes teori løb ud i sandet. For det første gav teorien ingen videnskabelige forudsigelser. Ej heller formåede den at redegøre for fænomener, som den almene relativitetsteori kunne forklare. Relativistisk afbøjning af lys og Merkurs perihelbevægelse var eksempelvis fænomener, som ikke var indeholdt i beskrivelsesdomænet for kinematisk relativitetsteori, så selvom Milnes teori kunne give en kinematisk forklaring på den etablerede Hubble-lov, kunne den ikke forsyne videnskaben med forudsigelser af nogen art.

Den kinematiske relativitetsteori kunne ikke reproducere de afgørende tests og verifikationer af almen relativitetsteori, og Milne skrev i sit sidste værk, om verifikationerne af Einsteins gravitationsteori, at ”disse mikroskopiske effekter” (som fx lysets afbøjning!) næppe burde være nødvendige for at bekræfte en ”storartet teori” som almen relativitetsteori [6, s.9]. Han indrømmede, at den kinematiske teori ikke kunne redegøre for disse ”niggling effects” på en utvetydig måde, men samtidig fastholdt han, at teorien, ligesom almen relativitetsteori, havde ”forudsagt dynamikkens og gravitationens grundtræk” [ibid.]. Faktisk argumenterede han, i en fodnote, imod den almene relativitetsteoris ”påståede” overensstemmelse med datidens observationer af Merkurs perihelbevægelse [6, s.19]:

As an example of remoter consequences not believed to be verified, I may mention that I have conversed with highly trained dynamical astronomers who are by no means convinced that the advance in the perihelion of Mercury is so well determined that the effect predicted by the ‘general’ theory of relativity can be said to be confirmed by observation.

Men hans egen teori tilbød ingen alternative forklaringsforslag. I klassisk videnskabsteoretisk terminologi kan Milnes arbejder siges at have haft alle kvalifikationer for et potentielt paradigme. Milnes radikale tanker var i substans og metode originale i hans samtid, og han agerede som en slags selvudnævnt reformator af fysikken. Som Allen J. Harder hypotetisk skriver, kan man sige, at ”hvis Milnes teori havde sejret, ville han være betragtet som en revolutionær” [106, s.352], og dette er nok ikke en urimelig påstand, specielt når man betænker Milnes høje videnskabelige anseelse.

Jeg kan af pladsmæssige årsager ikke gå ind på en detaljeret beskrivelse af, hvordan Milnes teori blev vurderet i 1950’erne, men må nøjes med at fremhæve et par hovedtræk. Mens der stadig var en vis, også positiv, interesse for hans arbejder i England, blev Milnes kosmologi på det nærmeste ignoreret i USA, hvor indstillingen til kosmologi var radikalt forskellig fra den, Milne og andre engelske kosmofysikere repræsenterede.

Blandt de fremtrædende engelske relativister og kosmologer i 1950’erne var William Bonner, der var skeptisk både over for steady-state teorien og teorier af big-

bang typen. Han beskrev i 1955 Milnes teori således: "Valuable though it is as an epistemological study, Milne's theory is unsatisfactory as a substitute for general relativity" [45, s.22], idet han blandt andet bemærkede, at den ikke var i stand til at gengive Merkurs bane omkring solen. For Bonner lå værdien af teorien ikke på et videnskabeligt, men på et filosofisk niveau: "Its value has been to show how important the study of measurement can be, and to suggest that the laws of the universe may be more dependent on our way of observing it than we usually think" [ibid.].

På det europæiske fastland blev Milne i 50'erne typisk nævnt i lærebøger og oversigter i kosmologi, men kun ret kort og ofte i afsnit om "heterodokse kosmologier", gerne sammen med steady-state modellen og Diracs og Jordans teorier baseret på en tidsafhængig gravitationskonstant. Dette var således tilfældet med den franske astronom Paul Couderc, der konkluderede følgende om Milnes teori om universet [48, s.22]:

Taken as a whole, this cosmology presents us overtly with characteristics which are specifically idealist: the communicability of results among observers straight away exceeds what is demanded by the external world; Milne did not hesitate to say that his work not only accounted for the immortality of the Universe, but also led to its first cause, to the divine Creator, and to the miracle of the creation. That the theory is productive of mirages is instanced by the fact that J.B.S. Haldane, the eminent biologist and Marxist, has found in it the quintessence of dialectical materialism, believing it possible to extract astounding consequences from it, both in biology and in geology.

Vurderinger af noget lignende art kan findes flere andre steder i den astronomiske litteratur. En anden fransk astronom og kosmolog, Evry Schatzmann, bemærkede at "On the philosophical plane, Milne's theory is related to objective idealism", og at teorien hørte til den klasse, hvor "certain cosmologists have striven to dispose of all difficulties by means of unverifiable hypotheses" [83, s.221-222]. For Schatzmann, som for mange andre, måtte en videnskabelig teori nødvendigvis kunne testes eksperimentelt: "Science admits imagination, on condition that it tests new ideas by facts, so as to establish more firmly in our minds the representation of processes which take place objectively in Nature" [ibid.]. Schatzmann gjorde det klart for sine læsere, at ud fra dette kriterium kunne han ikke acceptere Milnes teori som et bidrag til den moderne kosmologi.

For mange fysikere og astronomer i perioden efter 1950 repræsenterede Milne en over-ambitiøs, rationalistisk form for videnskab, der kun bidrog til at nedsætte kosmologiens videnskabelige omdømme. Den store russiske fysiker Lev Landau kunne have haft Milne i tankerne, da han efter sigende udtalte²⁴, at "Cosmologists are often in error, but never in doubt".

²⁴Citatet kan ikke verificeres.

3.3 Epilog

Med hensyn til Milnes senere leveår vil det nu være passende, afslutningsvis at følge op på det første, biografiske kapitel 1. Milne og Margot havde fået to døtre, Eleanor og Margaret, som blev kaldt Meg, og efter det stormfulde år i 1937, blev Margot gravid igen, og de fik deres første dreng, som kom til at hedde Alan. Kort tid efter fødslen blev Margot imidlertid meget syg, og hun døde under meget ulykkelige omstændigheder samme år [118, s. 425]. I den kronologiske gennemgang af sin karriere, under titlen ”My philosophy”, benævnte Milne året 1938 som ”The year of blackness”, og det fremgår endvidere af notaterne, at han vendte tilbage til sin gamle vane med kirkegang hver søndag [147, s.4].

Milne blev i 1937 formand for London Mathematical Society, og han beholdte posten indtil Anden Verdenskrig krigen brød ud i september 1939, hvor han måtte forlade Oxford til fordel for The Ordonance Board ved Chistlehurst i Kent, hvor han igen kom til at arbejde under Fowler og Hill, og deltog i vigtig militærvidenskabelig forskning. Han flyttede til en lille lejlighed i Chistlehurst sammen med sine tre børn, og beskrev, i sin egenskab af enlig far, krigstiden som ”meget dyr”, i et brev til Geoffrey året efter [146, 3/7 1940]. Milne fortsatte så at sige sit arbejde fra Første Verdenskrig, som nu var underlagt voldsomme teknologiske forbedringer, og hans *War Office Handbook* blev som nævnt genanvendt. Det er imidlertid vanskeligt at finde nogen litteratur om hans arbejde med ballistik, raketter, *sound ranging*, *armour piercing* og modeller for optimal fordeling af våben²⁵.

Eleanor og Margaret blev forflyttet til Boston i USA, hvor de blev passet af familien Durham, som var venner af Milnes familie. Lige inden krigens udbrud havde Milne deltaget i et symposion i forbindelse med åbningen af MacDonald Observatory i Texas. På båden, der krydsede Atlanten, havde han mødt en 27-årig kvinde, amerikaneren Beatrice Brevoort Renwick, på båden, og de faldt straks for hinanden [118, s.425]. I efteråret 1939, umiddelbart efter krigens udbrud, gennemførte Beatrice modigt en besværlig rejse fra New York, over Paris og til Oxford, hvor Milne tog imod hende, og de blev gift i juni året efter [146, 3/7 1940].

Til sin store overraskelse blev Milne i 1941 hædret med *The Royal Medal* af Royal Society. Dette kom meget bag på ham, som det fremgår af et brev til Chandrasekhar [148, 30/12 1941]:

This old year shall not go out without writing to thank you for your kind letter
of congratulations on my Royal Medal. It was a most unexpected award
- I had thought that my recent writings had excited criticism rather than
recognition. [...] No actual Gold Medal will be given till after the War, by
the King's Orders.

²⁵Der findes ikke megen tilgængelig litteratur om Milnes arbejde under krigen, og Weston Smith skrev i et brev til mig d. 12/10 1999: ”World War II is quite hard to unravel [...]. The Public Record Office has loads of records of meetings and they are tedious to go through... Milne was chairman of the Ballistics Committee, for instance”.



Figur 3.1: E.A. Milne fotograferet i maj 1939 ved Williams Bay i Wisconsin af Chandrasekhar.

I 1943 fik ægteparret en datter, og samme år blev Milne formand for Royal Astronomical Society, en post han besad frem til 1945. I 1944 fik familien endelig mulighed for at flytte tilbage til Oxford fra deres lejlighed i Chistlehurst, men under indflytningen blev lejligheden bombet, uden de dog kom fysisk til skade. Året efter blev Milne imidlertid endnu engang ramt af en tragedie, idet hans kone Beatrice døde efter kraftige overanstrengelser, ifølge McCrea som en konsekvens af krigen og ”the strange country [England]” [118, s.425].

Den epidemiske encephalitis, som Milne havde pådraget sig godt 20 år tidligere, begyndte nu at vise sine langtidssymptomer i form af muskelstivhed og rystelser, og sygdommen ramte også hans hjerte, hvilket gjorde ham syg i sine seneste leveår. To år efter krigens afslutning blev han udnævnt til æresmedlem af American Academy of Arts and Sciences, og i 1948 blev han tillige æresmedlem af Calcutta Mathematical Society. Samme år som *Kinematical Relativity* blev udgivet, udkom også hans lærebog, *Vectorial Mechanics*, som behandlede klassisk mekanik på universitetsniveau [5]. Som følge af den stadigt forværrede sygdom, tog Milne ikke længere del i så mange møder, men han ville ikke afslå en invitation til Dublin af Royal Irish Academy i 1950, hvor han skulle tale om sin nyligt udgivne artikel, der behandlede forbindelsen mellem gravitation og magnetisme, en teori som udsprang af den kinematiske relativitetsteori [42].

Som følge af nylige undersøgelser af Milnes hjerte, advarede lægen ham imod at tage afsæd, men Milne havde bestemt sig for at rejse, og mødte om aftenen d. 20. september op til en uformel reception ved akademiet, hvor han, ifølge McCrea, udtrykte sin store fornøjelse ved besøget. Den næste morgen, på vej til dagens første kollokvium, kollapsede han på gaden, og døde få minutter efter i ambulancen på vej til hospitalet.

Kapitel 4

Konklusion

4.1 Opsummering

Efter at have undersøgt de forskellige centrale faser af Milnes videnskabelige beskæftigelsesområder, vil jeg kort opsummere de vigtiste elementer af hans professionelle karriere, der tog sin begyndelse under Første Verdenskrig gennem hans arbejde i Hills afdeling. Det militærvidenskabelige arbejde med ballistik, *sound ranging* og atmosfærteori øgede hans interesse for matematiske løsninger af fysiske problemer, og hans første artikler var, sammen med Hills opmuntring, med til at give ham det endelige skub ind i universitetskarrieren, da han fik det søgte *fellowship* ved Trinity College. Milnes engagement og store aktivitet i forskellige videnskabelige studenterklubber mm., samt hans ansættelse ved Solar Physics Observatory betød, at han hurtigt blev en kendt person blandt fysikere og matematikere ved Cambridge Universitet, og allerede som 25-årig begyndte han som underviser i astrofysik.

Talen i CUNS-klubben giver et indblik i den unge videnskabsmands meninger om matematikkens status blandt naturvidenskaberne, men giver samtidig et billede af en visionær astrofysiker med klare videnskabspolitiske holdninger til datidens uddannelsesstruktur i England. Med sin forskning i stjerners strålingsligevægt og atmosfærteori udviklede han hurtigt de vigtige astrofysiske *Milnes ligninger*, som begavede ham med *Smith's Prize*. Milne og Fowlers statistiske metode, der frembragte en forbedret tryk- og temperaturskala for stjerneatmosfærer, resulterede i en ny forståelse for de fysiske forhold i stjernernes yderste lag, som affødte Paynes vigtige Ph.D afhandling om stjerneatmosfærer.

Med professoratet i Manchester, i en alder af 28 år, fortsatte Milne sin astrofysiske forskning, og specielt hans behandling af pulserende stjerner og hydrodynamisk ligevægt bidrog til en revidering af teorier for stjerners dynamik. Som følge af denne ortodokse og videnskabeligt frugtbare fase af karrieren blev han Fellow of the Royal Society som 30-årig.

Flytningen til Oxford, efter den attraktive professorstol i matematik, førte til en retningsændring af Milnes videnskabelige metode, som han allerede fremlagde

ved sin tiltrædelsesforelæsning, hvor han lagde grunden til sin rationalistiske epistemologi, som han imidlertid forenede med en falsifikationistisk position med hensyn til forholdet mellem teori og empiri.

Fra 1929 indledte han sit arbejde med stjerners indre strukturelle komposition, og i Eddington-Milne kontroversen fremhævedes Milnes bestemte karakter i en teoretisk kamp mod ”titanen”, den anerkendte astronom, Eddington. Milne besøgte datidens vigtige videnskabelige institutioner i Tyskland og i Danmark, og var en fast del af det astrofysiske netværk. Han modtog i 1935 den fornemme RAS-guldmedalje for sine vidtspændende astrofysiske arbejder, som havde udvidet kendskabet til mange astrofysiske begreber og han var formodentlig den første til at foreslå en sammenhæng mellem himlens nova-fænomen og visse stjerners diskontinuerte kollaps til hvide dværge.

Milnes alternative og heterodokse kinematiske forklaring af Hubble-loven viste sig ikke direkte at bære den samme videnskabelige frugtbarhed, som karrierens foregående faser, om end hans originale fortolkning af det kosmologiske princip, forlenet med hans operationalistiske ideer, indirekte kom til at spille en afgørende rolle for udviklingen af Robertson-Walker metrikken.

Selvom Milnes kinematiske relativitetsteori var metodologisk heterodoks, var metoden ikke enestående i 30’ernes England, og amerikaneren Robertson gav eksplicit udtryk for sin utilfredshed med Milnes videnskabelige metode. Milnes kosmologiske princip og de operationalistiske ideer om kommunikerende partikelobservatører betød Walkers og Robertsons, indbyrdes uafhængige, udvikling af den kendte metrik, som benyttes i stort set al moderne standard kosmologi, selv i dag, over 60 år efter. Men hele den kinematiske teori var i modstrid med de relativistiske modeller, alene på grund af antagelsen om fladt rum, men også som følge af dens kinematiske basis. Teoriens mest bemærkelsesværdige elementer må siges at være de konventionelle tidsskalaer, den Lorentzinvariante bevægelsesligning og konventionen om lysets konstante hastighed, mens den hævdede tidsafhængighed af fysiske ’konstanter’ ikke var helt enestående dengang.

Nok gav Milnes tidsskala en provisorisk forklaring på datidens problem med fastsættelsen af universets alder i forhold til visse stjerners alder, men det forekommer uklart, hvilke processer der fulgte t -tiden, og hvilke der fulgte τ -tiden. Milnes behandling af elektromagnetiske fænomener var endnu mere ufrugtbar, og blev af de fleste kolleger ikke anset for at være hverken vigtig eller interessant.

Milnes rolle som ’selvudnævnt reformator’ skyldtes formodentlig til en vis grad, at han selv var overordentlig overrasket over de vide konsekvenser af hans simple kinematiske antagelser, men hans største betydning var formentlig af filosofisk karakter, som det fremgik af den hede debat, der startede i 1937, mellem de induktive empirister og de rationalistiske ’deduktivister’. Milnes insisteren på teoriens operationalistiske basis gør det imidlertid vanskeligt at legitimere denne sprogbrug, som jeg dog har anvendt gennem hele specialet, idet kosmofysikernes filosofiske position nok bedre kunne repræsenteres ved betegnelsen ’rationalistisk empirisme’.

Dingles angreb mod rationalisterne var i nogen grad præget af den videnskabs-politiske trussel, der for Dingle at se, syntes at ligge i de tænkelige implikationer af en institutionel etablering af rationalismen. Samtidig udtrykte han sin dybe utilfredshed med tidens stadig stigende mangel på værdsættelse af landets empiriske tradition. Kontroversen forårsagede en stor filosofisk trafik i de populære tidsskrifter, og man diskuterede kosmologiens epistemologiske og metodologiske grundlag, og demarkationskriterier for den 'nye' videnskab blev behandlet under debatten. Det brogede netværk af forskellige videnskabsfolk fik herigenem formuleret kosmologiens filosofiske grundlag, men krigens udbrud betød en stagnation af den brede debat. Antallet af relaterede artikler daledede kraftigt, og kun få diskussioner fulgte i begyndelsen af 40'erne, specielt McVittie-Milne-Walker diskussionen i *The Observatory*.

Milnes kristne tro blev i slutningen af hans karriere eksplisit indlemmet i hans kosmofysik, idet han anså det for helt nødvendigt at beskæftige sig med universets skabelse hvis man ville bedrive ordentlig kosmologi, og han afviste både den almen relativitetsteori og den nye steady-state teori med religiøse argumenter. Ifølge Milne var universet rationelt, og derfor var også universets skaber rationel, og iøvrigt begrænset i sin almagt, og Milnes teologiske ideer synes i det hele taget temmelig inkonsistente.

4.2 Diskussion

Indholdet af det første kapitel er i høj grad tilvejebragt på basis af publicerede primærkilder, eftersom perioden ikke er velbeskrevet i videnskabshistorisk sekundær-litteratur, hverken det militærvidenskabelige arbejde eller udviklingen af Milnes ligninger. Milne-Fowler temperaturskalaen er dog beskrevet enkelte steder¹ i forbindelse med Sahas ligning. Det kom iøvrigt som en overraskelse for mig, at Milne tilsyneladende var den første til at foreslå en forbindelse mellem nova-fænomenet og kolapsset af stjerner til hvide dværge, idet jeg ikke har set dette forhold beskrevet andetsteds.

Årsagen til at jeg har transskribert Milnes tale til CUNS-klubben i 1922 er dels ønsket om at undersøge Milnes tidlige filosofiske overvejelser af sit fag, dels for at behandle et upubliceret manuskript, der så vidt vides ikke findes undersøgt andre steder.

Med hensyn til Milnes første officielle, kosmologisk relaterede artikel har jeg argumenteret for en tidligere datering end den, der findes i anden sekundær-litteratur. Begrebet 'det kosmologiske princip' er endvidere fundet at være Freundlichs opfindelse, og Gale, Urani og Shanks' påstande om at det stammer fra Robertson er tilbagevist. Endvidere har jeg dokumenteret, at Walker ikke mente, den kinematiske relativitetsteori kunne være et specialtilfælde af, eller forenelig med, almen

¹[136] og [137].

relativitetsteori, som det hævdes af Kragh.

I min tekniske undersøgelse af Milnes kinematiske relativitetsteori har det fremgået, at hans konvention om lyshastighedens konstans vitterligt var en konvention, men at også selve bevægelsesligningen var definitorisk bestemt. Det faktum, at ligningen var en anden-ordens differentialligning var nemlig en antagelse, og ikke en deduktion, så påstanden om, at den frie partikels dynamik blot kunne deduceres fra de kinematiske præmisser holdt ikke helt stik. Dette har Milne ganske sikkert været helt klar over, men det har sandsynligvis ikke bekymret ham det mindste, idet hans 'geometriske', axiomatiske system jo ikke blot bestod af begyndelsesdefinitioner og -antagelser, men også af forskellige hjælpeantagelser i løbet af deduktionsprocessen.

Selvom Milnes massebegreb havde formelle ligheder med Einsteins udtryk for massetilvæksten, var de afgørende forskellige, eftersom Milnes masseformel udtalte sig om fundamentalpartikler, der alle havde de samme "typiske masser", i kontrast til speciel relativitetsteori. Gravitationsbegrebet er noget diffust, da Milnes teori i begyndelsen af 30'erne ikke udtalte sig om tyngdekræfter, men efter 1935 blev han nødt til at indlemme dem i teorien, der da hævdedes at kunne redegøre for lokal gravitation.

Milnes og McCreas neo-newtonske universmodel, der hverken gjorde brug af speciel eller almen relativitetsteori, udtalte sig om formel ækvivalens mellem Friedmann-ligningen og den klassiske 'energi-ligning' for en massepartikel på randen af en kugleformet massefordeling, og jeg har demonstreret, at Milne betragtede modellen som en anskuelig indfaldsvinkel til de 'tunge' relativistiske modeller.

Det er forhåbentlig lykkedes mig at demonstrere, at selvom Milnes originale kinematiske alternativ til relativistisk kosmologi fik nogen videnskabelig betydning, så konstituerede hans filosofiske position et vigtigere aspekt af hans projekt. Robertson-Walker metrikken kom ikke blot til veje som en reaktion på Milnes teoretisk-fysiske ideer, men blev et resultat af både videnskabelige og filosofiske reaktioner på én gang.

Jeg har forsøgt at give svar på spørgsmålet om den kinematiske relativitetsteoris skæbne, og mener det er rimeligt at hævde, at den løb ud i sandet, fordi den hverken forsynede videnskaben med en eneste forudsigelse, eller formåede at gøre rede for visse af de fænomener, som almen relativitetsteori kunne forklare. Selvom Milnes kosmofysik må betegnes som en fejlslagen teori, har det vist sig at studiet af hans originale projekt alligevel medvirker til forståelsen af begrebsændringer i fysikken.

4.3 Forslag til videre forskning

Jeg har anvendt et lille udvalg af breve og manuskripter fra kildesamlingen i Oxford [70] samt breve fra IVHs Strömgren-arkiv [144]. Det ville imidlertid være yderst interessant at gennemføre en komplet gennemgang af eksisterende, upublicerede kilder,

som aldrig tidligere har været systematisk anvendt². Det kunne også være interessant at undersøge Milnes betydning i de astrofysiske netværk i perioden 1920-1930, eftersom der så vidt vides ikke findes grundige videnskabshistoriske behandlinger af dette område.

Jeg har forsøgte at kortlægge den vigtige brydningsperiode i moderne kosmologi, og en videre behandling kunne omfatte en grundig redegørelse for kosmofysikernes respektive filosofiske positioner. En kontekstuel undersøgelse af Milnes rent videnskabelige bidrag kunne også tåle en grundig sammentænkning med øvrige faktorer i perioden, blandt andet af kulturhistorisk og politisk art, og en indgående undersøgelse af engelsk videnskab og åndsliv kunne være en naturlig fortsættelse af dette specialestudium. Det kunne med andre ord forsøges, at integrere videnskabs-, ide- og kulturhistorie med udgangspunkt i Milnes ideer.

²Øvrige kilder findes ved Yerkes Observatory, University of Chicago samt noget i Oslo.

Appendix A

The Relations of Mathematics to Science

By E. A. Milne¹

The enduring nature of mathematics

(1.2) It was remarked a little while ago by Prof. Eddington that when we had all got to heaven the mathematicians would be the only ones who were in a position to enjoy themselves. The student of physics would have no more atoms or electrons to be curious about, the student of chemistry would have no more flasks to burst; the student of astronomy would have no more stars to gaze at, and the student of biology would have no more animals to torture; the student of politics no more avenues to explore; lastly that other large class of students - students of human nature - would be equally unemployed. But the mathematician could still rejoice in the properties of abstract numbers; he would still have avenues of approximations to explore, still have formulas to torture. Shall I put it more concretely? It was once said of Prof. Whittaker of Edinburgh, sometime lecturer at this college, a man well versed in dynamics, that to him the universe was a Pfaffian form. I will not go into the question of what a Pfaffian form is; let it suffice that there are more than one. Now in heaven Whittaker could not only contrive to contemplate the Pfaffian

¹This is a transcript of Milne's manuscript notes for a talk which he gave to fellow members of the Cambridge University Natural Science Club in his rooms at Trinity College, Cambridge on Feb. 6 1922. As far as is known the text has not hitherto been published. Milne's handwriting is difficult to read, and an unknown word is shown thus —; square brackets [...] denote the addition of a word for clarity of meaning. The parentheses (i,j) designate page (i) and line (j) in the original text. Mrs. Meg Weston Smith and I have ventured to fill in some chapter-titles just in order to help with the separation of the varying content, hence we have made up all the headlines. All *italics* correspond to underlined words in the original. The Bergson-citations and the Eddington-passage at the end of the original text have not been transcribed. S.O.Rebsdorf.

form that this universe has been; he could proceed to consider others also. He might even hope to be taken on as a consulting mathematician in the construction of the next universe, and so help to bridge that gap between mathematics and engineering about which we hear so much.

(2.9) Perhaps mathematics in heaven would not be as easy as I have suggested, for it is sometimes said that even the mathematicians' numbers come eventually from physics. Before we count we must have objects to count. I am not prepared to deny that the mathematicians' *ordinary* numbers are derived in this way. But could sheer intelligence set loose in an otherwise empty universe devise a mathematics? At first sight it would appear not; for there would be no universe to be intelligent about. But I am credibly informed by pure mathematicians that they think they could manage it. That is to say, they would begin by counting the only thing of which they have immediate awareness or perception - "I myself", which makes one [class]. They would then consider (a) "I myself", (b) "the null class", the class defined as the class of all entities which are not "I myself". Since the universe is otherwise empty, there are none and we get the null class. This makes *two*. They would then consider (a) I myself, (b) the null class, (c) the class consisting of I myself and the null class. This makes three. Thus by dint of establishing a welter of pyramidal egotism the supreme pure mathematician would proceed in triumph. Surely symbolic, you say, of even lesser mathematicians. However ignoring your remark for the moment, it is questionable whether there is any meaning in the concept of pure intelligence *per se*, so the doubt still remains.

(3.12) The upshot of these considerations is that mathematics is in a very enviable and privileged position, exalted above all other studies. It is the object of this paper to exploit this position.

The role of mathematics in science

(3.16) For it is not as though it does not need exaltation. In spite of its having recently achieved one of the greatest triumphs that any branch of human activity has ever achieved - I mean the general theory of relativity - the rôle of mathematics in science is frequently being misunderstood. One often meets and hears people who have a genuine fear and distrust of mathematics. They contemplate the steady mathematicalisation of so many sciences during the last $2\frac{1}{2}$ centuries with something like dismay; they regard it as a kind of nemesis; a something that has probably got to happen to all sciences sooner or later, but a something to be staved off as long as possible. They are affected with a vague uneasiness if they begin to suspect their own science of "getting too mathematicky". One sees this in physiology, in economics, even in physics. I am afraid their venom may more be directed against mathematicians than against mathematics, and the fault may lie with mathematicians for not sufficiently expounding the *raison d'être* of their subject. But I wish

to assert passionately and emphatically that there is no need for this distrust, that it need not exist, and that the mathematicalisation of science I have referred to is not a decadence but a climax, not a nemesis but an apotheosis. The species of animal, mathematician, may be "méchant": at least it shall be said that "quand on l'attaque il se défend".

(5.1) It is impossible to embark on an apology for mathematics or indeed for anything else without first formulating some criteria for the value, relative or absolute, of different branches of human activity. The first sentence of Poincaré's Science and Method furnishes us with one such. He says: "la recherche de la vérité doit être le but de notre activité", for, he goes on to say, that is the only object which is worthy of it. Now I am not sure that I can accept this statement of the aim of human activity, an aim which must include that of science. For it is doubtful whether the phrase "the search after truth" can be sufficiently objectified to mean anything at all. Still more do I dislike the reason he gives. To say that the search after truth is the only object *worthy* of the ultimate application of human faculties seems to bring in an idea of morality and of eternal approval which we can well avoid. The question is rather: in what does the human mind find its most profound satisfaction? There are probably several answers to this. There are many departments of the mind, and each may get its own ultimate satisfaction in its own ways. But I am considering in this connection chiefly that department which we call intelligence. To what is our own intelligence most devoted? Does it evince chiefly an interest in the unknown? Does it take its greatest delight in a rapid and constant alternation of satisfied and unsatisfied curiosity? Does it adopt the spirit of the collector, and glory most in the increase in the frontiers of our knowledge of facts, in the assemblage of fresh phenomena in a tendency to completion and exhaustiveness? This is not the same as the urge of curiosity. The gluttony of curiosity has its principal interest in the things that have *not* been discovered; the gluttony of accumulation in the things that *have* been discovered. Again it is a passion to *know*, to brave intimate acquaintance with things as they are, to find out because there are definite entities, at present veiled, capable of being found out?

(6.17) Now I think most people would disclaim the first two of these, curiosity and — completeness. But the third, knowledge of the truth, is explicitly adopted, moreover successfully adopted, by a large group of men of science. Yet the whole tendency of metaphysics is to explore the delusion of it. For metaphysics questions whether we ever get direct acquaintance with little bits of things as they are, with little bits of ultimate realities.

Orderliness

(7.2) Personally I am not willing to accept any of the attitudes mentioned. I prefer something more relativistic, and at the same time more accessible. I conceive that

science in human intelligence is realising its grandest objects when it is engaged in the tracing and exploring of orderlinesses in nature. I regret having to use so cumbrous a word as orderliness; but I want to distinguish it quite clearly from order. The word order is used currently in two different senses. It is used in the sense of sequence, of serial successions - order in line and order in space - and it is also used in the sense of tidiness, of simplicity in inter-relatedness. The latter is what I mean here by orderliness. It is in this process of the isolation of orderliness from what might have been, and what may indeed be chaos, that human intelligence experience its greatest satisfaction.

(7.17) For in the first place the ideal of an eventual all-embracing system has all the inspiration that could be demanded for any ideal. In the second place the realisation of the ideal is sufficiently difficult. A measure of difficulty, though logically irrelevant, is psychologically necessary. Yet, in the third place, the ideal is not a hopeless one. That is to say progress is now continually being made, achievements can be reckoned up.

(8.4) What the things are amidst which we are to determine these orderlinesses is indifferent. We are concerned with the pattern of the fabric of reality, not its texture. Moreover the pattern may not be unique. From different aspects the structure of the design may be entirely different. That again does not matter. The pattern may indeed be nothing but the forms of the deposition of dew from the breath of the observer. They are still sufficiently strange, sufficiently unmanageable to attract his whole attention.

Beauty

(8.13) If now this is indeed the ultimate aim of science, many conclusions follow. What I have called orderliness I might have called beauty, save for the fear of being misunderstood. Orderliness in science *is* beauty, beauty of form and of harmony.

(8a.1) It is apposite to quote the following from Matthew Arnold's essay on the study of poetry. "We should conceive of poetry worthily, and more highly than it has been the custom to conceive of it. We should conceive of it as capable of higher uses and called to higher destinies, than those which in general men have assigned to it hitherto. More and more mankind will discover that we have to turn to poetry to interpret life for us, to console us, to sustain us. Without poetry our science will appear incomplete; and most of what now passes with us for religion and philosophy will be replaced by poetry. Science, I say, will be incomplete without it. For finely and truly does Wordsworth call poetry "the impassioned expression which is the countenance of all science"; and what is a countenance without its expression. Again, Wordsworth finely and truly calls poetry "the breath and finer spirit of all knowledge"; our religion, parading evidences such as those on which the popular mind relies now; our philosophy, pluming itself on its reasonings about causation

and finite and infinite being; what are they but the shadows and dreams and false shows of knowledge?... The more we perceive their hollowness the more we shall prize 'the breath and finer spirit of knowledge' offered to us by poetry".

Beauty and simplicity as tests of value

(8.17) We have then a criterion as to the value of any given piece of scientific work, any achievement or *result* in the ordinary sense. Does it minister directly to our sense of beauty and orderliness? If not, if it appears to import confusion and ugliness, we may further ask: is this ugliness merely an unfortunate, temporary necessity, a small pucker introduced in order to smooth out some larger fold elsewhere! If the answer to both these questions is in the negative, then I say, "away with it, for it cumbereth the ground".

(9.3) I am prepared to apply this test ruthlessly. I would willingly see scrapped all papers - mathematical, physical or biological - which are merely excursions into a riot of chaotic complexity. It may be difficult to apply the test to current papers; many people would be so charitable as to deem all papers as answering the test in practice, even though they accept the test in principle. But one has only to look through the back files of scientific periodicals, say of 50 years back, to come across dozens of papers which have served no purpose in the extension of scientific knowledge and which never could have done, mere fungi on the trunk of the scientific tree, and like fungi, constantly reappearing if swept away. In a way these old papers are interesting; they all deal with additions to knowledge, they contain facts, then fresh, now completely forgotten or constantly being rediscovered. But it is nearly always the useless facts that get rediscovered. The useful ones never get forgotten. The existence of masses of useless scientific knowledge has moreover a definitely deleterious effect. It prejudices true science by causing it to be mistaken for jargon. It gives rise to sneers such as that of H.G. Wells, when he pictured the large majority of scientific workers as each of them merely "adding one or two to that large stock of little papers with blunted conclusions of which the world is already too full" (Tono-Bungay).

(10.7) I do not wish to be taken to imply that a paper which, as the phrase goes, "lead nowhere" is thereby devoid of justification. On the contrary if it evokes in us those emotions which we associate with beauty no further justification is needed; it is not a fungus but a blossom; it is a terminus of science, the end of a line of inquiry in which science *has* reached its ultimate goal. It is the ugly papers which require justification.

(10.15) I have used the word complexity as indicating one of the elements constituting the ugliness. It is the antithesis of that simplicity which is one of the characteristics of the orderliness we are seeking. And here we raise a definite issue with those others that I spoke of, those who desire principally to get at the truth,

the real nature of things, however ugly that truth may be. They believe that the truth itself *is* beautiful, or will be when properly ascertained. Rutherford, for example, often says with respect to a certain idea or theory, that it is simple and for that reason (he says) more likely to be true than some other, which is complicated or artificial. In other words, he regards knowledge as a road which most probably leads to simplicity or to beauty. I regard beauty as a road to knowledge, or rather as being the only knowledge worth having. I see no reason to suppose that the truth, nature itself, reality itself should be simple. I merely regard simplicity as being the best substitute we can get for truth, and as being the only one worth aiming at. I do not discourage ugliness or complexity because they are likely to be wrong, but because they are offensive.

Justification of mathematics in science

(11.11) Now this marsh towards orderliness which is the true aim of science is the supreme justification of mathematics in science (Marginal note: H.G. Wells once explained mathematics as "an appreciation of form"). For mathematics is *par excellence* the instrument of orderliness; and not only of orderliness but of order too, in the sense mentioned before, order being one of the most comprehensive kinds of orderliness. There is no need to marvel at the mathematicalisation of sciences. It is only when it has crystallized out into mathematics that any science has begun to accomplish its aim.

(11.20) For the purposes of this essay I will divide mathematics not, as customarily, into two branches, pure and applied, but into three: (1) abstract mathematics, (2) mathematical physics, (3) applied mathematics. Abstract mathematics is pure mathematics in the narrow sense, concerned only with logic, number, form, order, etc. With that we have nothing to do here. By applied mathematics I mean mathematics employed frankly as a tool, as a kind of necessary but objectionable way of salvation, such as mathematics is, say, in engineering, in economics, and in general in most papers with a purely experimental outlook. By mathematical physics I mean all those mathematical activities which strive to bring orderliness into experimental chaos, which essay to filter simplicities out of nature; all those papers which take an abiding joy in their method as well as in their results, which link together distant things by trains of majestic reasoning; all those, in short, which help in the evolution of that embodiment in logical framework of all the data of perception which is the only thing ultimately worth having in science.

(12.16) If now a problem in say physics leads to a piece of beautiful work in mathematical physics which yet clearly leads nowhere, is it for that reason not worth the doing? Persons antagonistic to mathematics aver that it is not. But if the attitude towards science be that which I have adopted, then I assert that it *is* worth the doing. It is a work of art. It is something of value in itself. It is the fine

flower of the human spirit triumphing after its manner. And it is to be encouraged.

(13.3) There are several mistaken notions abroad as to the precise functions of mathematical physics. There are some who look upon the mathematicians as a kind of auditor. They resent what they call his interference with the job in hand but have no objection to this coming in at the end, and, as it were, seeing that the accounts are right. Now the mathematician is only too glad to be useful when required; it is the measure of his urbanity that he is always prepared to do applied mathematics to help a comrade in distress. But it is quite unfair that he should be told that he must keep his hands off all except the job he is chartered for. If he turns the applied mathematics into genuine mathematical physics, the subject can only be enriched.

(13.16) Perhaps the most curious objection ever brought against mathematics is that it is always right. The opponent of mathematics contents himself with his own slipshod algebra, and then refuses to allow the mathematician to make it rigorous on the ground that it is bound to be right anyhow - it always is. Surely this is a strange form of gratitude. The mathematician has produced a complicated tool which works satisfactorily even when it is rusty and almost dropping to pieces; and the user of the tool objects to its designer coming in and overhauling it, free of charge, too! There is of course the type of worker who to some extend distrusts his own mathematics and is not antipathetic to the mathematician coming in and verifying it, but even he merely regards the mathematician as a kind of coroner, whose main function is to produce a verdict.

The co-operation between mathematicians and physicists

(14.9) In an advanced science such as physics the number of steps between theory or hypothesis and experimentally verifiable deductions is alarming and is becoming increasingly so. As theories become more recondite the validity of each step from the deep-seated substratum to the effect capable of being tried out become more and more important, and errors in reasoning become more and more difficult to detect. It is here, of course, that the necessity for mathematics becomes paramount. But it is still unfair to regard the mathematician a mere patent agent who bridges the gap between the inventor and the inaccessible government department.

Theory and observation

(14.21) For, when one comes to think of it in detail, the mathematician is the only one who knows anything about nature or the universe at all. The experimentalist merely makes contact with events here and there; the mathematician alone can give an account of the infinitely greater number of events which are not observed. In all systems which are the victims of experimentation in physics, it is usually only

one particular stage, in the change that is going on, that is observed. When an electron is moving and a physicist measures its velocity, it is merely its velocity at the moment it entered his magnetic field. The mathematician on the contrary is just as much at home at any one point of the trajectory of things in general as at any other point. He has the whole of space and time for his habitation. He is at home everywhere, like a man of the world - perhaps I should say man of the universe. His motto is: "toujours chez soi".

(15.16) Now how comes it that the mathematician has this intimate knowledge of things? The data of observation, I admit, are the contributions of the experimenter; why can the theorist go beyond him? (In parenthesis I might remark that in thus using the words physicist and mathematician, experimenter and theorist, I am not thereby implying that any given person is either the one or the other. The two are combined, to some extend, in everyone, though there are some who would be furious if told that there was anything of the mathematician in their make-up). Now a phrase which is frequently on people's lips is illuminating in this connection. People say, concerning such and such "and so it merely reduces to an interpolation formula"; they say it contemptuously; to say that a formula reduces to the level of an interpolation formula is to put it beyond the pale, to make it an outcast, to consider it, in short, as very small beer indeed. (16.10) So there are then formulae, O physicist, which are not interpolation formulae? I make this point to defend the mathematician from the aspersion that his formulae, even his vaunted Maxwell's equations and his universal square law of gravitation, are simply interpolation formulas, invented to fit the observed points, and that therefore their sanction is merely that of observed points themselves. This may be true. But nobody acts as though it was. And even the physicist has invented a special mode of speech for stigmatising especially those noires bêtes which are interpolation formulae par excellence. It is unquestionable that there are certain types of laws of nature, formulated mathematically, which we do habitually endow with more weight than the totality of all the observations which support them. It is easy to give examples. Take the phenomenon of diffraction in the undulatory theory of light. If I take a new kind of screen and a light source, and calculate the resulting diffraction pattern by approved methods, nobody is likely to question the probability of the actual phenomenon being in accordance with my results. It would be felt, perhaps, a waste of time to verify them experimentally. Similarly if I take a piece of metal of a new shape, raise it to a given temperature and let it cool, I feel quite certain that the resulting temperature distribution will be that predicted by the theory of the conduction of heat. (17.16) We can now state very concisely the difference between the formulae for the propagation of light or of heat and a mere interpolation formula. We regard them as valid extrapolation formulae. In a way, the determination of valid extrapolation formulae is the sole object of science. Science ends when the totality of valid extrapolation formulae is known. Those, in fact, who hold a strictly mechanistic view of things believe that when the totality of valid extrapolation formulae are known, everything

is known; for the future would then be completely predictable, the past completely ascertainable. Those who do not hold a strictly mechanistic view must be content with saying that whatever is external to the totality of valid extrapolation formulae is outside science. They have no other alternative.

(18.10) Note, now, the effect of a formula being promoted to the rank of a valid extrapolation formula. Automatically the premiership passes to the mathematician. He is enabled to explore fully the domain which open out, and to give adequate account of a vast range of phenomena which the experimentalist is no longer called upon to verify. The ground is out from under the latter's feet. Mathematics is thus instrumental in saving the time of the experimentalist. I go back to the example of the conduction of heat - and it must be remembered that the whole subject of Fourier series arose from a certain mathematician, Fourier, burying a few physical facts under a thick lather of analysis, a lather the bubbles in which subsequently became some of the brightest gems in the mathematician's crown. To go back to the conduction of heat, it is in a way astonishing that a few simple physical experiments on the maintenance of temperature gradients in metals should enable one to predict at any given time say, the temperature of a piece of matter given its initial temperature-distribution (e.g. the cooling of the Earth, the lag of an aircraft thermometer or the cooing of a shell along its trajectory) and to make it unnecessary to do further experimental verification.

The power of mathematics to deduce principles

(19.13) The experimentalist may reply "Ah yes. Those are merely deductions from the principles. The main thing, the difficult thing, is the isolation of the principles, and this is so bound up with the experimental work that it is far better left in the hands of those doing the experimental work." Now I am far from denying the right of the experimentalist to make his own deductions from his own experiments. What he does, though, is to deny the right of the mathematician to make his deductions from his (the mathematician's) experiments. I claim for the mathematician the perfect right to set forth, at such length as publishers of journals are willing to publish, the result of his exploration of the consequences of sets of assumptions. Mathematical analysis has a kind of momentum of its own. Of its own accord it often suggests the kind of generalisation that itself is capable of, it hints at orderliness still more orderly, at generalities still more general, if it is allowed to take things into its own hands. (20.9) Naturally there is nothing occult about this. It is merely that mathematics provides channels which are easy for the current of thought to run in. Mathematics relieves the thinker from all anxieties as to details; mysteries once consigned to it are sacred trusts which it never betrays. The mathematician, then, merely asks leave to be allowed to consult his oracle, and set forth its answers and guess its riddles. If he never asks it anything he will never get any answers.

(20.19) Thus one of the functions of the mathematician is to say "if you believe

this, then you must believe that. If you don't believe that, then you have got no right to believe this". But a still more important function is to suggest the advisability of believing such and such in order to be in a position to believe such and such. You believe B. The mathematician says "I also believe B. But I prefer to begin, if you will allow me, by believing A. For then, not only am I happier about believing B, but it ought to be true. Go then and try it out". Of course this is the procedure used in formulating any theory. But it is in mathematical generalisations that the procedure takes its grandest form. And it is only in allowing the mathematician a completely free hand that there is a chance of realising these forms. Maxwell's equations are perhaps the most beautiful examples of this. When they were formulated they were nothing but sheer "waffle" - the physicist will know what I mean. They were singularly unconvincing; their alleged deduction involved new and unjustifiable hypotheses; they were pronouncements rather than theorems. Their attractiveness lay in their beauty and simplicity. But [from] them Maxwell predicted electromagnetic waves, calculated the velocity of light and established de novo the theory of optics. (21.19) Later investigations found more startling consequences. They found them capable (and surely this was a glorious accident, a true reward for the pursuit of beauty) - they found them capable of an unexpected transformation; they possessed, as they stood, a property of invariance, out of which there arose relativity. What matter that their child, the Lorentz electron, radiated energy, whilst real electrons (or what physicists tell us are real electrons) do not? I would sooner perish embracing a Lorentz electron in flames of transcendent analysis, than sit glumly opposite a modern one with that pre-breakfast feeling of utter bearishness that the present electron inspires. Seriously, I regard the spacious elaboration of the properties of the Maxwellian electron as one of the great things of science, as one of the things for which science has been most worth while.

The identification and utility of mathematical similarities

(22.14) There is yet another mode of service that the mathematician renders directly to the physicist. He is sometimes able to point out formal similarities between the most diverse phenomena, and so make the exploration of the one depend on that of the other. The classical examples of this are the gravitational, electrical, magnetic and hydrodynamical fields, which have the same potential relations, the same distribution of intensity in the one as velocity in the other, in short substantially the same structure. But a more striking and less well-known one is that due to Mr. G.I. Taylor. He pointed out, if I remember rightly, that the equations of the state of strain of a plate of material, say metal, under given stresses, are formally identical with those for the state of a soap-bubble film, with a given boundary. He was thus able to solve the very difficult problem of the determination of the stress in such a plate - a problem of importance in engineering, by just putting up the appropriate soap-film and viewing the Newton's rings in it. Both problems are equally incapable

of direct solution. But if one can determine the one by observation, one knows the other. There would be no seeing this however, if one were prohibited from playing about with partial differential equations of the second order.

(23.17) Consider, too, the catholicity of the mathematician. His main interest may be, say, existentence theorems². I suppose there can be few things in the world as more satisfying as a general existence theorem; in establishing an existence theorem man comes as near as he ever does, I suppose, to a direct creative act. Consider then, the mathematician rudily disturbed and ordered to solve a particular physical problem (of little moment compared with existence theorems). He solves the problem. Even then the physicist is not contented. He demands to be helped in that curious inward process he calls "seeing the thing physically". And with grave old-world courtesy the mathematician turns and says "My son, I will see what I can do for you", and he decks out his heavenly treasures in the perishable dress of material imagerery that the rust and moth doth corrupt, and which thieves break through and steal.

(24.20) The physicist, then, is a kind of burglar, rifling the safes of nature. He puts his periwinkle in the crack of the door; the mathematician uses a pin. I have said to use another metaphor that the mathematician consults his oracle. He himself is the great high priest, sacrificing all things (even physicists) on the alter of his temple and announcing the oracles. Like the oracles of old, they may be ambigous. But, again like them, they are always true, whichever way things happen. Relativity has said so.

English preudice against the mathematical physicist

(25.5) Let us admit that the ideal head of a laboratory would be the mathematician-physicist, such as I have sketched him. We may liken him, then, to a merchant prince of the old Italian cities, sending forth his couriers and argosies to the ends of the world. His couriers and emissaries may sometimes conduct intrigues on their own. So may experimental physicists. Both sometimes come to grief.

(25.12) But instead of this ideal, we have a school of thought in English physics which definitely discourages the pursuit of mathematical physics. Applied mathematics it tolerates, and indeed makes its dupe, but it would entirely suppress the investigation of its own problems by mathematicians. "What we want to do" I have

²I remember when I was at school, I heard with awe of existence theorems as "things you did up at Cambridge, only not in your first year". This of course was an exaggeration, for the first thing the authorities did was to set to work to bring home to one a deep sense of guilt that one had never previously felt the need of the inward grace of existentence theorems (Milne put this passage in parentheses, to which he connected the marginal note "Omit!" Hence it seems that he did not present these lines at the talk).

heard it say "is to muzzle all these mathematicians; they tear the thing to pieces before one gets a look at it oneself; they write and they write and they write, - and one never gets time to think". And when one remonstrates, all the reply one gets is "Well, I suppose we can't really stop 'em; some of 'em can't help stumbling on the real thing, but I'd like to see a reg'lar clean sweep made of 'em". This point of view makes me very impatient. More than that, it makes me as sad. For, whatever it formally admits, it does in fact discourage mathematical experimentation, and so eventually puts a stopper on lines of speculation. Further, it definitely impairs the technique of English applied mathematics by swaying the best physical brains against indulging in it. The result is that there *is* no school of applied mathematics in this country. (26.12) Brilliant isolated examples are not scarce, but I should only have to mention some recent names - Lord Rayleigh, J.J. Thomson, Larmour, Jeans - to demonstrate this isolation. We feel they have cultivated their technique by some special inward power not available to the ordinary person. Whilst if we look to Germany, one could mention mathematical physicists of all ranks, bridging the gap between the great names at the top and the beginners. One can point to scores of writers, who for all one can tell might easily and normally develop into a Lorentz, a Planck, a Sommerfeld. I attribute this in part to some consequence of the difference between English and German systems of university education, something difficult to analyse. But I feel that a certain definitely adopted attitude, in this country, may be partly responsible. I will admit that there are just as many weak mathematical papers written as weak experimental ones, that just as much rot is written in mathematics as in physics. That leads one back to the remarks of Wells' that I quoted earlier. (27.11) But why the mathematical ones should be singled out for butchery I cannot understand. Who knows that any particular paper is not the work of a potential Bohr? I am willing, as I said before, for all papers to be scrapped which do not satisfy my tests. But the scrapping must apply equally to all. It may be that more mathematical papers would fail them than experimental ones. But let us have them scrapped in these grounds, not simply on the ground that they are mathematics. The danger is a real one, in view of the number of publications which referee the papers sent to them. It is a positive disgrace to English mathematical physics that, except Rayleigh and Jeans' early work, not a single development of the theory of quantum dynamics has been made in this country. Yet one feels that had the ideas actually occurred to some one here, they might have never seen the light. All our physicists moan and cry out that they have no mathematical fluency or facility. How on earth are they to get it if they are to be discouraged from engaging in mathematical physics for its own sake? The curious theory is, - and I believe it to be true - that though if every mathematician had a line of experimental work to work at, physics would not advance appreciably faster, yet if every experimentalist had a line of mathematical investigation to go on, physics would perhaps develop at an enormously greater rate. I suggest that this point is worth discussing.

Bergson versus Eddington: Science and life

(29.1) I turn now to a more fundamental attack on the efficacy of mathematics. This is the attack voiced by Bergson. I have held up as the ultimate ideal of science an order all-embracing³. Tacitly I have postulated the possibility of this order, at least ideally. It is this postulate which is stoutly denied by Bergson. Making inductions from various classes of phenomena in the domain of biology he puts forward the view that a large portion of nature will always and permanently resist inclusion in an all-embracing order, that there are large tracts of reality in which there can be no formulation of precise laws, in which an attempt to impose laws will be essentially unsuccessful. Laws as we have discovered them are, he contends, adopted solely and simply to summarizing and describing the relations of one particular kind of matter, inanimate matter; they are essentially of mathematical form (or, as he prefers to put it) of geometrical form; and our ultimate formulation of the laws of physical matter will be a geometry; our physics is the more successful the more it manages to reduce the things it is dealing with to relations which are at bottom geometrical relations. But geometry is a product of intelligence, and intelligence is at its most congenial task when engaged in fitting phenomena in a geometrical framework; more, a geometrical framework is the only framework that intelligence is capable of manipulating, so that with things which have in their own reality no geometrical relations intelligence is impotent, and will prove and is proving to be so.

(30.10) Now it is difficult if not impossible to oppose these contentions by way of argument. But I am not sure they need be opposed. I am not sure that Bergson himself does not show a way out. Amidst much that is superficial in him, much that is verbal trickery, much that is mere poesy, he does cause certain difficulties to emerge; but *not* the difficulties that he insists on. I am going to try to show how Bergson's line of thought, culled from biology, leads to precisely the same conclusions as Eddington's, based on physical reality. The conclusion is, in short, that the future business of wresting the words of her order out of nature is going to be of a difficulty compared with which our previous triumphs are child's play. Bergson is right in elaborating a contrast; but the contrast is not between order and disorder, but between subjective or superficial order and objective or intrinsic order.

(31.3) With your permission I will read out 3 or 4 extracts from Bergson which I have translated quite freely and roughly and then invite you to compare them with some quotations from Eddington. I hope you will not find them too lengthy.

The first I have entitled...

[Bergson-citations]

(31.8) Whilst these sentences are fresh in your minds, confront them with Edding-

³an order from which nothing will be excluded, an order which will in fact be the whole of nature itself (this sentence is crossed out in the manuscript).

ton's. The following quotation is from a paper of Eddington's in "Mind". Eddington has just been showing that relativity actually predicts the laws of conservation of momentum and of mass, the laws of gravitation and of electrodynamics, and that these laws would hold, we should find, whatever the underlying reality was like, simply because our mind would always select on and fix on these aspects, of the underlying reality for which these laws do hold.

[Eddington passage⁴]

(31.17) Eddington nowhere mentions Bergson. But the parallelism is most striking. If we follow Eddington, the philosophic scientist, then Bergson the scientific philosopher was quite right in rejecting our facile mathematics and physics and in refusing to expect it to apply to life. But surely we may hope that our deeper mathematics and physics, when it comes, will link on to life.

Eddington selected atomicity as a constituent of nature *not* imposed by the mind. I will venture to add another - life. Probably all his considerations would apply to the latter just as well as to the former. But in a way they are the same problem. Atomicity and life - they are both incidents in evolution. Why atoms (or rather electrons and protons) - why these hold together at all i.e. why they exist is at present just as much outside physics as why living things exist. And we can no more account for the origin of the one than of the other.

(32.9) There is another aspect. Science may be said to present us with three cardinal problems. First the problem of the structure of matter, of the structure of the atom. Second the problem of cosmogony - why and how the earth and the sun and the stars have been produced, how the universe was got together. Thirdly there is the problem of life. But let me group the last two together and call them the generalized problem of evolution. We have then two - (1) the structure of matter and (2) evolution, the history of matter. Science has solved neither of these. But there is one problem science has solved, above the heads of these others. This is generalized relativity, the problem of the description and possible form of laws of nature. One would have thought this last the hardest. But it is the only one in which appreciable progress has been made and the results would seem to hold independent of the solutions to the other two problems.

We have then atoms, which are the bricks. We have evolution, which is the house built out of them. And we have relativity, or the rules of building. What Eddington points out is that given the rules of building, we still cannot predict the bricks. What Bergson would point out is that given the laws of building *and* the bricks, we still cannot predict the house.

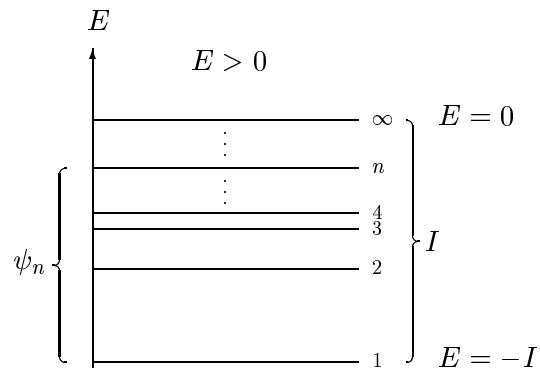
⁴From Eddington, Arthur Stanley, "The meaning of matter and the laws of nature according to the Theory of Relativity", *Mind*, **29** (1920), s.45.

Appendix B

Kort introduktion til teoretisk astrofysik

B.1 Ioniseringsteori og Sahas ligning

Den relative population af elektroner i atomer, og dermed atomernes energiniveauer, afhænger af mekanismerne for befolkning og affolkning. I en stjerneatmosfære er det strålings-, kollisions- og spontane overgange der er vigtige. Når kollisionsovergange dominerer over stråliningsovergange gælder ligningerne for termodynamisk ligevægt. Elektronens ioniseringspotential I er den energi der kræves for at løsøre elektronen helt fra atomets stationære tilstand, grundtilstanden, der har energien $E = -I$. For at excitere (eller anslå) en elektron op i det n 'te niveau kræves der energien ψ_n ; dette kaldes excitationspotentialet (således er $\psi_1 = 0$ og $\psi_\infty = I$). Brøkdelen af



Figur B.1: Energidiagram, $I > 0$ og $\psi_n \geq 0$.

atomer i det n 'te niveau er givet ved Boltzmannfaktoren:

$$f = g_n \exp\left(-\frac{\psi_n}{kT}\right),$$

hvor g_n er den statistiske vægt (for Hydrogen er $g_n = 2n^2$). Antallet af atomer per enhedsvolumen i det n'te exciterede niveau N_n , i forhold til det totale antal atomer af samme art N , er (Boltzmannligningen):

$$\frac{N_n}{N} = \frac{f}{Z(T)} = \frac{g_n}{Z(T)} \exp\left(-\frac{\psi_n}{kT}\right),$$

hvor $Z(T)$ er tilstandssummen [*partition function*] for de exciterede tilstænde givet ved

$$Z(T) = \sum_{m=1}^{\infty} g_m \exp\left(-\frac{\psi_m}{kT}\right).$$

Hvis en atomgas kolliderer med N_e frie elektroner (pr. enhedsvolumen), og elektronernes partialtryk er $P_e = N_e kT$, da vil ionisationen for den kollisionsdominerede atomgas være [140, s.13]

$$\frac{N_1}{N_0} P_e = \frac{(2\pi m)^{\frac{3}{2}} (kT)^{\frac{5}{2}}}{h^3} \frac{2Z_1(T)}{Z_0(T)} \exp\left(-\frac{I}{kT}\right).$$

N_1/N_0 er brøkdelen af ioner i forhold til neutrale atomer, m er elektronens masse og h er Plancks konstant. Brøken Z_1/Z_0 er forholdet mellem de ioniseredes og de neutrals tilstandsfunktioner, og I er ioniseringspotentialet. Vi tager logaritmen af ligningen og får *Sahas ligning* [140, s.13]

$$\log\left(\frac{N_1}{N_0} P_e\right) = -\frac{I}{kT} + \frac{5}{2} \log T + \log \frac{2(2\pi m)^{\frac{3}{2}} k^{\frac{5}{2}}}{h^3} + \log \frac{Z_1(T)}{Z_0(T)}. \quad (\text{B.1})$$

Ligningen er forskellig fra Sahas oprindelige ligning

$$\log\left(\frac{\tilde{x}^2}{1-\tilde{x}^2} P\right) = -\frac{U}{4.571 T} + \frac{5}{2} \log T - 6,5$$

fra 1920 [81]. For det første skelnede Saha ikke mellem de forskellige trykbidrag, men anvendte i stedet det totale tryk P i sin ligning. For det andet angav han ioniseringsbrøkdelen ved hjælp af ioniseringsgraden \tilde{x} (som mædeligt nok var kvadreret i hans ligning). For det tredje kaldte han ioniseringspotentialet for U ; men den vigtigste forskel er dog, at han ikke anvendte ensembleteori for atomer og elektroner, og derfor ikke var i stand til at udregne fordelingen ved høje temperaturer (mht. atomernes højere exciterede elektroner).

Milne-Fowler ligningen (1.2) svarer til (B.1), dog med $\sigma = 2$, $\frac{x}{1-x} = \frac{N_1}{N_0}$ og tilstandssummen $b(T) = Z_0(T)/Z_1(T)$. Hos Fowler og Milne [11] er excitationspotentialet $\chi_1 - \chi_n = \psi_n$, med $n > 0$; dvs. ioniseringspotentialet er $\chi_1 = I$.

B.2 Gastryk og strålingstryk

Gassen inden i en stjerne er næsten fuldstændigt ioniseret. Vekselvirkningerne mellem de individuelle partikler er få, så gassen adlyder til en god approximation idealgasligningen

$$P_{gas} = NkT = \left(\frac{\rho}{\mu m} \right) kT,$$

k er Boltzmanns konstant, ρ er gassens tæthed, N er antallet af partikler pr. volumenhed, μ er middelmolekylvægten i enheder af m , som er gaspartiklens masse, fx. brintatomets eller elektronens masse. Ved høje temperaturer må strålingstrykket yderligere lægges til gastrykket. Det kan vises, at strålingstrykket, dvs. fotonernes tryk, er givet ved

$$P_{str} = \frac{1}{3}aT^4,$$

hvor a er strålingskonstanten. Det totale tryk er altså

$$\begin{aligned} P &= P_{gas} + P_{str} \\ &= T(Nk + \frac{1}{3}aT^3). \end{aligned}$$

Ved høje temperaturer ser vi, at strålingstrykket vil være dominerende (med mindre N er meget stort, dvs. hvis stjernen er meget tæt).

B.3 Strålingsligevægt og Milnes ligninger

Man taler om strålingsligevægt (SL) i en stofmængde, når der er en konstant netto-strålingsflux gennem stoffet, fx. gennem et atmosfærerlag og når al energi transportereres ved stråling. *Strålingsfluxen* F_ν ved frekvensen ν defineres ved integralet af intensiteten I_ν , over alle vinkler. Strålingsfluxen er givet ved $F_\nu = 2\pi \int_0^\pi I_\nu \cos \theta \sin \theta d\theta$, og hvis intensiteten antages ikke at være azimut-afhængig, da kan F_ν omskrives til *Fluxintegralet* [140, s.97]:

$$F_\nu(\tau) = 2\pi \int_\tau^\infty S_\nu(\tau) E_2(t - \tau) dt - 2\pi \int_0^\tau S_\nu(\tau) E_2(\tau - t) dt.$$

Her er $S_\nu(\tau)$ en kildefunktion, fx. Planckfunktionen $B_\nu(\tau)$. τ er den såkaldte *optiske dybde*, der bestemmer hvor meget af intensiteten I_ν , der er blevet absorberet gennem atmosfærerlaget (τ er altså massetætheden ganget med en absorptionskoefficient κ , integreret over lagets tykkelse). E_n er exponential-integralet $E_n(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-tx}}{t^n} dt$. Ved SL antager man mere specifikt, at der hverken er energidræn eller kilder i atmosfæren, dvs. divergensen af den totale energiflux \mathcal{F} er nul overalt. Den totale flux er fluxen F_ν integreret over alle frekvenser, $\mathcal{F} = \int_0^\infty F_\nu d\nu$. Ved planparallel geometri

i atmosfærerlagene (som regel en rimelig approximation) giver divergensbetingelsen, at $\frac{d}{dx}\mathcal{F}(x) = 0$, eller at $\mathcal{F}(x) = F_0 = \text{konstant}$. Herved fås nu *Milnes 2. ligning*:

$$\int_0^\infty \underbrace{\left[\int_\tau^\infty S_\nu(\tau) E_2(t - \tau) dt - \int_0^\tau S_\nu(\tau) E_2(\tau - t) dt \right]}_{\text{Flux-integral}} d\nu = \frac{F_0}{2\pi}. \quad (\text{B.2})$$

Ligningen skal tolkes derhen, at når man finder en kildefunktion S_ν , der løser (B.2), da kan man udtale sig om intensitetsændringen gennem atmosfæren, idet S_ν da kan indsættes i *transportligningen* $\frac{dI_\nu}{d\tau} = -I_\nu + S_\nu$. *Milnes ligning* så lidt anderledes ud i originalartiklerne, men indholdet var det samme som i de tre ligninger vi i dag kalder *Milnes ligninger* [140, s.97-99]. De to andre ligninger er lignende frekvensintegraler, men istedet er integranden hhv. middelintensitets-funktionen $\mathcal{J}_\nu(\tau)$ og funktionen $\mathcal{K}_\nu(\tau)$ (der, integreret over hele spektret, er proportional med strålingstrykket $P_{str} = \frac{4\pi}{c} \int_0^\infty \mathcal{K}_\nu d\nu$). Ligningerne skrives i dag således:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \kappa_\nu(\mathcal{J}_\nu(\tau) - S_\nu(\tau)) d\nu &= 0, \\ \int_0^\infty \frac{d}{d\tau} \mathcal{K}_\nu(\tau) d\nu &= \frac{F_0}{2\pi}, \end{aligned}$$

og det er disse, der sammen med (B.2) kaldes *Milnes ligninger*.

Appendix C

Gravitation og geometri

C.1 Einsteins feltligninger

I speciel relativitetsteori beskrives en *begivenhed* (et rum-tids-koordinatsæt) ved 4-vektoren

$$y^\alpha = (y^0, \vec{y}).$$

Græske indices løber over rumtiden ($\alpha = 0, 1, 2, 3$), latinske over rummet ($i = 1, 2, 3$). Den *Lorentzinvariante* egentid $d\tau^2$ er givet ved (se appendix D.1, formel (D.2))

$$d\tau^2 = (dy^0)^2 - (d\vec{y})^2.$$

For lys er $d\tau^2 = 0$, dvs. $\left(\frac{dy}{d\tau}\right)^2 = 1 \equiv c^2$; lyshastigheden er (sat til) 1 i alle referencesystemer. I 4-vektor-notation skrives egentiden som

$$d\tau^2 = -\eta_{\alpha\beta} dy^\alpha dy^\beta \equiv -\sum_{\alpha=0}^3 \sum_{\beta=0}^3 \eta_{\alpha\beta} dy^\alpha dy^\beta,$$

hvor Einsteins summationskonvention er anvendt: Når et index optræder to gange i et produkt, skal der summeres over det. Hvis vi angiver rum-tids koordinaterne i et vilkårligt koordinatsystem (x^0, x^1, x^2, x^3) , da er 4-vektorerne y^α funktioner af x^μ , så $y^\alpha = y^\alpha(x)$, $x = (x^0, \vec{x})$. Indsættes dette i egentiden får vi den såkaldte *rum-tids-metrik*:

$$d\tau^2 = -g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu,$$

hvor den *symmetriske, metriske tensor* er

$$g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\alpha\beta} \frac{\partial y^\alpha}{\partial x^\mu} \frac{\partial y^\beta}{\partial x^\nu}.$$

$\eta_{\alpha\beta}$ er den såkaldte flade, *euklidiske* metrik med værdierne $\eta_{\alpha\beta} = 0$ for $\alpha \neq \beta$, $\eta_{ii} = 1$ og $\eta_{00} = -1$.

Einstiens feltligninger udtaler sig om rummets *geometri* i forhold til tilsteds værelsen af *materie* eller stof. Ligningerne ser således ud (der er 10 ligninger, som følge af indexværdier og symmetrier):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -8\pi GT_{\mu\nu}. \quad (\text{C.1})$$

Venstre side udtaler sig om rummets geometri, idet første led, den symmetriske Ricci-tensor $R_{\mu\nu}$, og Ricci-skalaren R , er proportionale med $\partial^2 g$ (g er determinanten af $g_{\mu\nu}$). Højre side af feltligningerne indeholder gravitationskonstanten G , og den symmetriske *energi-impulstensor*, $T_{\mu\nu}$. I speciel relativitetsteori karakteriseres en strøm af stof ved dets *energitæthed* ρ , og 4-hastigheden $U^\mu(x)$ for et stofpunkt x . For et isotropt/ideelt fluidum af partikler er energi-impulstensoren givet ved

$$T^{\mu\nu} = p\eta^{\mu\nu} + (p + \rho)U^\mu U^\nu. \quad (\text{C.2})$$

Her er p *strålingstrykket* og ρ altså energitætheden, målt af en observatør, der bevæger sig med partiklerne. Bemærk, at den metriske tensor bl.a. hæver og sænker indices ($T^{\mu\nu} = g^{\mu\alpha}g^{\nu\beta}T_{\alpha\beta}$). Einstiens feltligninger er et sæt af ikke-lineære, anden ordens differentialligninger, som giver os mulighed for at beregne gravitationsfeltet fra en *given* energi-impulsfordeling. Dette er præcis indholdet af Einstiens generelle relativitetsteori. Einstiens kosmologiske overvejelser af sin teori gav sig ud for at vise, at feltligningerne repræsenterede et sfærisk afgrænset, isotropt univers med homogen massefordeling, og hans løsning var statisk, i den forstand, at krumningen var tidsuafhængig. Einstein indførte i 1917 den såkaldte kosmologiske konstant Λ i sine ligninger for at sikre et statisk univers, og de fik da udseendet

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - g_{\mu\nu}\Lambda = -8\pi GT_{\mu\nu}.$$

Effekten af Λ var en frastødende kraft, der skulle modvirke den gravitationelle tiltrækning.

C.2 Robertson-Walker metrikken

Den kosmologiske standardmodel opererer under to hovedantagelser; den ene er *det kosmologiske princip*, nemlig at universet på stor skala er isotropt om hvert punkt. Den anden hovedantagelse er, at tiden er uafhængig af rummet, og denne tid kaldes *kosmisk standard tid* (KST). Robertson-Walker metrikken (RW) udledes udelukkende vha. disse antagelser, og anvender ikke feltligningerne. Antagelsen om kosmisk tid forsimpler den metriske tensor, idet tiden nu ikke er koblet til rummet, og dermed bliver rum-tids linier, som er parallelle med tidsaksen, til geodæter, som er vinkelrette på rummets hyperflader. Egentiden bliver herved

$$d\tau^2 = dt^2 - g_{ij}dx^i dx^j.$$

Isotropiantagelsen forsyner egentiden med rotationsinvarians, og sammen med KST og ovenstående ligning (C.2) for et ideelt fluidum af partikler omskrives egentiden endelig til RW-metrikken:

$$d\tau^2 = dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right). \quad (\text{C.3})$$

Her er r den radiale koordinat, t den kosmiske tid, $a(t)$ er den såkaldte skalafaktor, og k er et udtryk for rummets krumning. Er $k = 1$ er rummet euklidisk og $k = 0$ giver linieelementet i et fladt univers, mens $k = -1$ gælder for et hyperbolisk rum. Skalafaktoren tolkes som et udtryk for universets krumningsradius.

C.3 Hubbles lov

For elektronnagnetisk stråling er $d\tau = 0$, og for radialbevægelse reduceres RW-metrikken til

$$dt^2 = a(t)^2 \frac{dr^2}{1 - kr^2}.$$

For lys der udsendes fra en galakse til begivenheden $(r, t) = (r_1, t_1)$, og som modtages på jorden til $(r, t) = (0, t_0)$ ses det, at r_1 er tidsuafhængig, idet løsningerne til integralet [141, s.59]:

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_{r_1}^0 \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}$$

er hhv. $\text{Arcsin}(r_1)$ (for $k = 1$), r_1 (for $k = 0$) og $\text{Arcsinh}(r_1)$ (for $k = -1$). Der gælder derfor, at

$$\int_{t_0+\delta t_0}^{t_1+\delta t_1} \frac{dt}{a(t)} = \int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)},$$

og for små perioder δt_i er $\delta t_0/a(t_0) = \delta t_1/a(t_1)$. For de to tilhørende bølgelængder λ_1 og λ_0 ser vi nu, at bølgelængden ændrer sig med tiden ligesom skalafaktoren, dvs. *bølgelængden strækkes eller forkortes ligesom universet ekspanderer eller kontraherer*. Relationen udtrykkes konventionelt ved rødforskydningen z , der defineres på følgende måde:

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} - 1. \quad (\text{C.4})$$

Fortolkningen af denne relation er klar: Et ekspanderende (kontraherende) univers karakteriseres ved en rødforskydning (blåforskydning) i spektrallinierne.

Hvis den udstrålende galakse er relativt tæt på os, kan vi Taylorudvikle (C.4) og få (til laveste orden):

$$z \approx \frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)}(t_0 - t_1) \equiv H_0 L,$$

hvor afstanden $L = t_0 - t_1$ ($c = 1$) er tilstrækkelig lille. H_0 er Hubbleparameterens nuværende værdi, og ligningen $z = H(t)r$ er den berømte *Hubbles lov* ($cz = H(t)r$).

Appendix D

Bevægelsesligning for fri partikel

Jeg vil her gennemgå en omskrivning og parafrase af §61-§69 i E. A. Milnes *Kinematic Relativity* [4, s.62-67]. Det er i flere artikler ([111, s.75], [133, s.412] og [122, s.163]) uklart, hvordan Milne når frem til sin Lorentzinvariante bevægelsesligning for en fri partikel i bevægelse, derfor denne grundige gennemgang af hans argumentation.

D.1 Lorentztransformationen (§62)

Vi ser på 1-dimensional bevægelse af observatøren O' relativt til observatøren O . O angiver partiklens rumtids-koordinater ved (t, x, y, z) mens O' angiver dens koordinater med (t', x', y', z') . Betragt 4-vektoren A' for partiklen med rumtids-koordinaterne $\frac{1}{c}(ct', x', y', z')$, målt i O' -systemet:

$$A' = \frac{1}{c}(ct', x', y', z') = \frac{1}{c}(\gamma c(t - \frac{\beta x}{c}), \gamma(x - \beta ct), y, z), \quad (\text{D.1})$$

hvor $\beta = \frac{v}{c}$ og γ -faktoren er givet ved $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Denne 4-vektor indeholder formlerne for Lorentztransformationen i det tilfælde, hvor O' -systemet bevæger sig parallelt med x-aksen, med hastigheden $\vec{v} = (v, 0, 0)$, væk fra O -systemet. $A = \frac{1}{c}(ct, x, y, z) = \frac{1}{c}(ct, \vec{r})$ er 4-vektoren for partiklen, iagttaget af O . Normen A^2 er Lorentzinvariant, dvs. $A^2 = A'^2$. Dette kvadrat er defineret ved:

$$\left(\frac{1}{c}(ct, x, y, z)\right)^2 = t^2 - \frac{1}{c^2}(x^2 + y^2 + z^2),$$

og er altså bevaret ved Lorentztransformationen $\frac{1}{c}(ct, x, y, z) \rightarrow \frac{1}{c}(ct', x', y', z')$. Normen er givet ved

$$A'^2 = t'^2 - \frac{\vec{r}'^2}{c^2}$$

$$\begin{aligned}
&= t'^2 - \frac{1}{c^2} (x'^2 + y'^2 + z'^2) \\
&= \gamma^2 (t - \frac{\beta x}{c})^2 - \frac{1}{c^2} [\gamma^2 (x - \beta ct)^2 + y^2 + z^2] \\
&= t^2 - \frac{\vec{r}^2}{c^2} \\
&= A^2.
\end{aligned}$$

Vi definerer nu den Lorentzinvariante funktion X ved A's norm:

$$X = t^2 - \frac{\vec{r}^2}{c^2}. \quad (\text{D.2})$$

D.2 Hastighedstransformationen (§63)

Hvis nu partiklen bevæger sig med hastigheden $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$, målt af O , da transformeres hastigheden til O' -systemet, som bevæger sig med hastigheden v i forhold til O, på følgende måde:

$$\begin{aligned}
\vec{u}' &= (u'_x, u'_y, u'_z) \\
&= \left(\frac{u_x - v}{(1 - \frac{\beta u_x}{c})}, \frac{u_y}{\gamma(1 - \frac{\beta u_x}{c})}, \frac{u_z}{\gamma(1 - \frac{\beta u_x}{c})} \right) \\
&= \frac{1}{(1 - \frac{\beta u_x}{c})} \left(u_x - v, \frac{u_y}{\gamma}, \frac{u_z}{\gamma} \right) \\
&= \sqrt{\alpha} \left(u_x - v, \frac{u_y}{\gamma}, \frac{u_z}{\gamma} \right).
\end{aligned}$$

Vi definerer $B' = \frac{1}{c}(c, \vec{u}') = \frac{1}{c}(c, u'_x, u'_y, u'_z)$. Kvadratet er da (med $\alpha = 1/(1 - \frac{\beta u_x}{c})^2$)

$$\begin{aligned}
B'^2 &= 1 - \frac{\vec{u}'^2}{c^2} \\
&= 1 - \frac{1}{c^2} (u'^2_x + u'^2_y + u'^2_z) \\
&= 1 - \frac{\alpha}{c^2} \left[(u_x - v)^2 + \frac{u_y^2}{\gamma^2} + \frac{u_z^2}{\gamma^2} \right] \\
&= \alpha \left((1 - \frac{v u_x}{c^2})^2 - \frac{1}{c^2} \left[v^2 + u_x^2 - 2u_x v + u_y^2(1 - \frac{v^2}{c^2}) + u_z^2(1 - \frac{v^2}{c^2}) \right] \right) \\
&= \alpha \left(1 + \frac{u_x^2 v^2}{c^4} - \frac{1}{c^2} \left[v^2 + (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) - \frac{v^2}{c^2} (u_y^2 + u_z^2) \right] \right) \\
&= \alpha \left(1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{\vec{u}^2}{c^2} + \frac{v^2 \vec{u}^2}{c^4} \right)
\end{aligned}$$

$$= \frac{\left(1 - \frac{\vec{u}^2}{c^2}\right) \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{\beta u_x}{c}\right)^2}.$$

Vi definerer ved Y funktionen

$$Y = 1 - \frac{\vec{u}^2}{c^2}, \quad (\text{D.3})$$

og tilsvarende $Y' = 1 - \frac{\vec{u}'^2}{c^2}$. Det ses straks at Y ikke er invariant (thi $Y' = \alpha\gamma^{-2}Y$), men *kovariant*, dvs. den bevarer sin form ved Lorentztransformationer (pånær den multiplikative faktor α/γ^2), men derfor ikke sin værdi.

Vi betragter nu udtrykket for egentiden $d\tau^2$, eller blot kvadratet på $dA = \frac{1}{c}(cdt, dx, dy, dz)$:

$$(dA^2 = d\tau^2 =) dt^2 - \frac{1}{c^2}(dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (\text{D.4})$$

Denne egentid er også Lorentzinvariant. Lad nu begivenhederne (t, \vec{r}) og $(t + dt, \vec{r} + \vec{dr})$ ske på partiklens vej; da er

$$\vec{dr} = (dx, dy, dz) = (u_x dt, u_y dt, u_z dt),$$

og af (D.4) får vi, at dA^2 er

$$\begin{aligned} dt^2 - \frac{\vec{dr}^2}{c^2} &= dt^2 - \frac{1}{c^2} (u_x^2 dt^2 + u_y^2 dt^2 + u_z^2 dt^2) \\ &= dt^2 \left(1 - \frac{\vec{u}^2}{c^2}\right) \\ &= dt^2 Y. \end{aligned}$$

Udfører vi samme omskrivning med A'^2 får vi tilsvarende

$$dt'^2 - \frac{\vec{dr}'^2}{c^2} = dt'^2 Y'^2.$$

Da egentiden er invariant, er $dA^2 = dA'^2$, dvs. $\sqrt{Y}dt = \sqrt{Y'}dt' = INV$. Vi konstruerer nu 4-vektoren

$$U = \frac{1}{\sqrt{Y}dt}(cdt, dx, dy, dz) = \frac{1}{\sqrt{Y}}(c, u_x, u_y, u_z).$$

Da $\sqrt{Y}dt$ er invariant, transformerer U ligesom $dA = \frac{1}{c}(cdt, dx, dy, dz)$, ved overgangen fra O til O' , dvs. U adlyder Lorentztransformationen. 4-vektorerne $(t, \frac{\vec{r}}{c})$ og $(\frac{c}{\sqrt{Y}}, \frac{\vec{u}}{\sqrt{Y}})$ transformerer altså ens.

(§64) Vi husker den invariante $X = t^2 - \frac{\vec{r}^2}{c^2}$ (D.2). Vi differentierer mht. den dynamiske tid:

$$\frac{dX}{dt} = 2(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{c^2}).$$

Definer nu

$$Z = t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{c^2}, \quad (\text{D.5})$$

dvs. $\frac{dX}{dt} = 2Z$. Da X og $\sqrt{Y}dt$ er invariante, er $Z/\sqrt{Y} = \frac{1}{2}(\frac{dX}{dt})/\sqrt{Y}$ også invariant. Da Z/\sqrt{Y} har dimensionen tid (vi skriver $[\frac{Z}{\sqrt{Y}}] = s$) følger det, at Z er kovariant (sml. med Y og $\sqrt{Y}dt$). Vi definerer en sidste funktion, ξ :

$$\xi = \frac{Z^2}{XY} = INV. \quad (\text{D.6})$$

ξ har dimensionen $[\xi] = 1$, og er klart Lorentzinvariant.

(§65) Vi resumerer herunder de fundne funktioner af t , \vec{r} og \vec{v} :

Funktion	Transformation	Dimension
$X = t^2 - \vec{r}^2/c^2$	INV.	s^2
$Y = 1 - \vec{v}^2/c^2$	KOV.	$s^0 = 1$
$\sqrt{Y}dt$	INV.	s
$Z = t - \vec{r} \cdot \vec{v}/c^2$	KOV.	s
$\xi = Z^2/XY$	INV.	1

§66 og §67 er en kort diskussion af spørgsmålet om empiriens nødvendighed for bestemmelse af partiklens banefunktion.

D.3 Bevægelsesligningerne 4-vektor form (§68)

Vi ser nu på en partikel i \vec{r} med hastigheden \vec{v} relativt til O (bemærk, at vi dermed har sat $\vec{u} = \vec{v}$, dvs. partiklens referencesystem er netop O' -systemet). I stedet for at betragte $\frac{d\vec{v}}{dt}$, konstruer da 4-vektoren

$$\tilde{U} = \frac{1}{\sqrt{Y}} \frac{dU}{dt} = \frac{1}{\sqrt{Y}} \frac{d}{dt} \left(\frac{c}{\sqrt{Y}}, \frac{\vec{v}}{\sqrt{Y}} \right) = INV.$$

\tilde{U} er Lorentzinvariant, idet vektoren $U = (\frac{c}{\sqrt{Y}}, \frac{\vec{v}}{\sqrt{Y}})$ er det. Vi vil udtrykke \tilde{U} ved funktioner af \vec{r} , \vec{v} og t . Denne 4-vektor kan kun opløses langs vore eneste disponible 4-vektorer, U og $R = (ct, \vec{r})$, dvs. vi søger koefficienterne i linearkombinationen

$$\tilde{U} = a_1 R + a_2 U. \quad (\text{D.7})$$

Milne opstiller følgende tre krav til (D.7):

1. a_i skal være 4-skalarer, dvs. invariante (ellers opstår der inkonsistens ved transformationer fra O til O').

2. a_i skal have passende dimensioner, så $[\tilde{U}] = ms^{-2}$, dvs.

$$\begin{aligned} ms^{-2} &= [a_1][R] + [a_2][U] \\ &= [a_1] \times m + [a_2] \times ms^{-1}, \end{aligned}$$

dvs. $[a_1] = s^{-2}$ og $[a_2] = s^{-1}$.

3. $a_1 R + a_2 U = INV$.

Vor eneste invariante funktion med dimension s^{-2} er X^{-1} , dvs.

$$a_1 = \alpha X^{-1}, \quad (\text{D.8})$$

hvor α er en invariant 4-skalar med $[\alpha] = 1$. Af invariante funktioner med dimension s^{-1} kan vi vælge mellem to: $X^{-\frac{1}{2}}$ og $Y^{\frac{1}{2}}/Z$. Milne skriver, at da det er ligegyldigt for resultatet hvilken funktion vi vælger, da vælger vi $Y^{\frac{1}{2}}/Z$, dvs.

$$a_2 = \beta Y^{\frac{1}{2}}/Z, \quad (\text{D.9})$$

hvor igen β er en 4-skalar med dimension 1. Af (D.7), (D.8) og (D.9) får vi:

$$\frac{1}{\sqrt{Y}} \frac{d}{dt} \left(\frac{c}{\sqrt{Y}}, \frac{\vec{v}}{\sqrt{Y}} \right) = \frac{\alpha}{X} (ct, \vec{r}) + \frac{\beta}{Z} (c, \vec{v}) \quad (\text{D.10})$$

Venstresiden af ligningen differentieres vha. kæderegralen og giver:

$$\begin{aligned} \left(\frac{c}{\sqrt{Y}} \frac{d(Y^{-\frac{1}{2}})}{dt}, \frac{1}{Y} \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{\vec{v}}{\sqrt{Y}} \frac{d(Y^{-\frac{1}{2}})}{dt} \right) &= \left(\frac{\vec{v}}{cY^2} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}, \left[\frac{1}{Y} + \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{c^2 Y^2} \right] \frac{d\vec{v}}{dt} \right) \\ &= \left(\alpha \frac{ct}{X} + \beta \frac{c}{Z}, \alpha \frac{\vec{r}}{X} + \beta \frac{\vec{v}}{Z} \right) \quad (\text{D.11}) \end{aligned}$$

Her anvendte vi først, at

$$\frac{d}{dt}(Y^{-\frac{1}{2}}) = Y^{-\frac{3}{2}} \frac{\vec{v}}{c^2} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt},$$

og dernæst omskrev vi linearkombinationen. Splitter vi nu 4-vektoren (D.11) op i tidskoordinaten og stedkoordinaterne, får vi først 'tids-ligningen':

$$\frac{\vec{v}}{c^2 Y^2} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \alpha \frac{t}{X} + \beta \frac{1}{Z}. \quad (\text{D.12})$$

Og rumdelen giver:

$$\left[\frac{1}{Y} + \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{c^2 Y^2} \right] \frac{d\vec{v}}{dt} = \alpha \frac{\vec{r}}{X} + \beta \frac{\vec{v}}{Z}.$$

Med $\frac{\vec{v}^2}{c^2} = 1 - Y$ omskriver vi rumdelen:

$$\left[\frac{1}{Y} + \frac{1-Y}{Y^2} \right] \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{Y^2} \frac{d\vec{v}}{dt} = \alpha \frac{\vec{r}}{X} + \beta \frac{\vec{v}}{Z}.$$

Vi multiplicerer nu vektorielt med $\frac{\vec{v}}{c^2}$ og indsætter $\vec{r} \cdot \vec{v} = c^2(t - Z)$:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{v}}{c^2 Y^2} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} &= \frac{\alpha}{X} \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{c^2} + \frac{\beta}{Z} \frac{\vec{v}^2}{c^2} \\ &= \frac{\alpha}{X}(t - Z) + \frac{\beta}{Z}(1 - Y). \end{aligned} \quad (\text{D.13})$$

Vi ser, at (D.12) er lig med (D.13), dvs.

$$\alpha \frac{t}{X} + \beta \frac{1}{Z} = \frac{\alpha}{X}(t - Z) + \frac{\beta}{Z}(1 - Y).$$

Der gælder altså flg. relation mellem 4-skalar-koefficienterne:

$$\beta = -\alpha \frac{Z^2}{XY}.$$

Nu indsætter vi β i (D.10):

$$\begin{aligned} \tilde{U} = \frac{1}{\sqrt{Y}} \frac{d}{dt} \left(\frac{c}{\sqrt{Y}}, \frac{\vec{v}}{\sqrt{Y}} \right) &= \frac{\alpha}{X}(ct, \vec{r}) - \frac{\alpha Z}{XY}(c, \vec{v}) \\ &= \frac{G(\xi)}{X} \left(c(t - \frac{Z}{Y}), \vec{r} - \vec{v} \frac{Z}{Y} \right). \end{aligned} \quad (\text{D.14})$$

Milne argumenterer nemlig, at siden $[\alpha] = 1$, og ξ er vor eneste 4-skalar med dimension 1, da må α være en funktion af ξ : $\alpha = G(\xi)$. (D.12) bliver nu

$$\frac{1}{Y^2} \left(\frac{\vec{v}}{c^2} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \right) = \frac{G(\xi)}{X} \left(t - \frac{Z}{Y} \right), \quad (\text{D.15})$$

og rumdelen af (D.14) er (se evt. (D.11)):

$$\frac{1}{Y} \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{\vec{v}}{Y^2} \left(\frac{\vec{v}}{c^2} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \right) = \frac{G(\xi)}{X} \left(\vec{r} - \vec{v} \frac{Z}{Y} \right).$$

(D.15) indsættes heri, og vi får:

$$\frac{1}{Y} \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{G(\xi)}{X} \left(t - \frac{Z}{Y} \right) = \frac{G(\xi)}{X} \left(\vec{r} - \vec{v} \frac{Z}{Y} \right),$$

og ligningen omskrives endelig til Milnes bevægelsesligning:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{Y}{X} \left(\vec{r} - \vec{v} t \right) G(\xi). \quad (\text{D.16})$$

Ligningen er Lorentz invariant, fordi den blot er en omskrivning af \tilde{U} (D.14), som per konstruktion er invariant.

Appendix E

Symbolindeks

I valget af de forskellige symboler har jeg, såvidt muligt, fulgt almindelige generelle principper og konventioner. Dette symbolindeks er ikke komplet, da det ikke er nødvendigt at indeksere almindeligt anvendte symboler såsom kartesiske, polære og sfæriske koordinater samt diverse matematiske koefficenter.

A	4-vektor	N	Totalt atomantal
$a(t)$	Skalafaktor/krumningsradius	N	Antal gaspartikler pr. volumenenhed
B	4-vektor	N_n	Boltzmannfaktor, $n=1,2,\dots$
$B_\nu(\tau)$	Planckfunktion	P	Totalt gastryk
$b(T)$	Tilstandssum (også $Z(T)$)	P_e	Elektroners partialtryk
E	Energi	P_{gas}	Gastryk (også P)
$E_n(x)$	Exponential-integral	P_{str}	Strålingstryk
\mathcal{F}	Total strålingsflux	P_{total}	Totalt tryk
\mathcal{F}_ν	Fluxintegral	p	Strålingstryk
$G(\xi)$	$= \alpha$, funktion i Milnes bevægelsesligning	R	4-vektor
g	Determinant af $g_{\mu\nu}$	R	Ricci-skalar
g_n	Statistisk vægtfaktor, $n=1,2,\dots$	$R_{\mu\nu}$	Ricci-tensor
$g_{\mu\nu}$	Metrisk tensor	r	$= \vec{r} $, Afstand
$H(t)$	Hubbleparameter	\vec{r}	$= (x, y, z)$, stedvektor
H_0	$H(t)$'s nuværende værdi	$S_\nu(\tau)$	Kildefunktion
I	Ioniseringspotential (også U)	T	Temperatur
I_ν	Intensitet ved frekvensen ν	T_e	Effektiv temperatur
$\mathcal{J}_\nu(\tau)$	Middelinintensitetsfunktion	T_{max}	Maximal temperatur
$\mathcal{K}_\nu(\tau)$	Absorptionsfunktion	$T_{\mu\nu}$	Energi-impuls-tensor
k	Konstant i RW-metrikken	t	Tid, tidskoordinat
L	Luminositet	U	Ioniseringspotential
M	Masse (af stjerne)	U	Lorentzinvariant 4-vektor

U^μ	4-hastighed
\vec{u}	(u_x, u_y, u_z) , hastighed
v	$= \vec{v} $, fart
v	Galaksers radialhastighed
\vec{v}	$= \dot{\vec{r}}$, hastighed
X	Lorentzinvariant funktion
x	Ioniseringsgrad
Y	Kovariant funktion
Z	Kovariant funktion
$Z(T)$	Tilstandssum (også $b(T)$)
z	Rødforskydning
α	$= G(\xi)$
β	$= v/c$, betafunktion
γ	$= (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$, gammafaktor
ξ	Lorentzinvariant funktion
η	Euklidisk metrik
θ	Azimutvinkel
κ	Absorptionskoefficient
χ_i	Ioniseringspotential, $i=1,2,\dots$
λ	Strålingsbølgelængde
μ	Middelmolekylvægt
ν	Strålingsfrekvens
ρ	Gastæthed
ρ	Energi-tæthed
σ	Antal ækvivalente valenselektroner
τ	Optisk dybde
τ	Egentid
ψ_n	Excitationspotential, $n=1,2,\dots$

Konstanter

Stefan-Boltzmann strålingskonstant	$a = 7,564 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-4}$
Lysets fart i vacuum	$c = 2,99792 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
Elektronens ladning	$e = 1,602 \times 10^{19} \text{ C}$
Gravitationskonstant	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$
Plancks konstant	$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js} = 2\pi\hbar$
Boltzmanns konstant	$k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
Elektronens masse	$m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Den kosmologiske konstant	Λ

Bibliografi

Primær litteratur

Bøger af E.A. Milne

- [1] Milne, E.A., "Theory and use of A.A. sound locators", i E.A. Milne (ed.) (*Secret War Office Handbook*, (bidrag fra forskellige forfattere, 1920(?))).
- [2] Milne, E.A., Kap. 2:"Thermodynamics of the stars", s. 65-255 og kap. 8:"Theory of pulsating stars", s. 804-821 i G. Eberhard, A. Kohlschlüter og H. Ludendorf (eds.): *Handbuch der Astrophysik*, bind 3 (Berlin: Julius Springer, 1930).
- [3] Milne, E.A., *Relativity, Gravitation and World Structure*, (Oxford: Clarendon Press, 1935).
- [4] Milne, E.A., *Kinematic Relativity: A sequel to Relativity, Gravitation and World Structure*,(Oxford: Clarendon Press, 1948).
- [5] Milne, E.A., *Vectorial Mechanics*, (London: Methuen & Co. Ltd, 1948). F
- [6] Milne, E.A., *Modern Cosmology and the Christian Idea of God*, (Cadbury lectures)(Oxford: Clarendon Press, 1952).
- [7] Milne, E.A., *Sir James Jeans: A Biography*, (Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1952).

Artikler af E.A. Milne

- [8] 1921, "Ionisation in stellar atmospheres", *The Observatory*, **44** (1921), s. 261-269.
- [9] 1921, "Radiative equilibrium in the outer layers of a star: the temperature distribution and the law of darkening", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **81** (1921), s. 361-374.

- [10] 1921, "Sound waves in the atmosphere", *Philosophical Magazine*, **42** (1921), s. 96-114.
- [11] 1923, (Milne & R.H. Fowler), "The intensities of absorption lines in stellar spectra, and the temperatures and pressures in the reversing layers of stars", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **83** (1923), s. 403-424.
- [12] 1923, "Stars of type O and the theory of high temperature ionisation", *The Observatory*, **44** (1923), s. 113-124.
- [13] 1924, "The equilibrium of the calcium chromosphere", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **85** (1924), s. 111-141.
- [14] 1925, "An extension of the theorem of the virial", *Philosophical Magazine*, **50** (1925), s. 409-414.
- [15] 1928, "Bemerkungen über die Chromosphärentheorie von A. Unsöld" *Zeitschrift für Physik*, **47** (1928), s. 745-750.
- [16] 1929, *The aims of mathematical physics* (Milnes tiltrædelsesforelæsning som Rouse Ball professor ved Oxford Universitet, givet den 19. november 1929) (Oxford: Clarendon Press, 1929).
- [17] 1929, "Bakerian lecture: The structure and opacity of a stellar atmosphere", *Philosophical Transactions*, **228** (1929), s. 421-461.
- [18] 1930, "World geometry in its time relations", *Nature*, **126** (1930), s. 742-743.
- [19] 1931, (Uden titel) i [49, s.715-717].
- [20] 1932, "World structure and the expansion of the universe", *Nature*, **130** (1932), s. 9-10.
- [21] 1932, *The white dwarf stars* (Halley forelæsning afholdt d. 19.maj 1932 i Oxford), (Oxford: Clarendon Press, 1932).
- [22] 1932, "Solens atmosfære som en typisk stjerneatmosfære" (et lysbillededeledsaget foredrag, holdt ved Astronomisk Selskab den 6.dec. 1932, oversat af Julie M. Vinter Hansen), *Nordisk Astronomisk Selskab*, **14** (1933), s. 1-9.
- [23] 1933, "World structure and the expansion of the universe" *Zeitschrift für Astrophysik*, **6** (1933) s. 1-95.
- [24] 1933, "Note on H.P. Robertsons paper on world-structure", *Zeitschrift für Astrophysik*, **7** (1933), s. 180-187

- [25] 1934, "A newtonian expanding universe", *Quarterly Journal of Mathematics*, **5** (1934), s. 64-72.
- [26] 1934, (Milne og William H. McCrea), "Newtonian universes and the curvature of space", *Quarterly Journal of Mathematics*, **5** (1934), s. 73-80.
- [27] 1934, "Some points on the philosophy of physics: Time, evolution and creation", *Philosophy*, **9** (1934), s. 19-38.
- [28] 1936-37 "The inverse square law of gravitation" (I, II & III), *Proceedings of the Royal Society*, **156** (1936), s. 62-84, **160** (1937), s.1-23 & s.24-36.
- [29] 1936, "On the foundations of dynamics", *Proceedings of the Royal Society of Oxford*, A, **154** (1936) , s. 22-52.
- [30] 1937, "Kinematics, dynamics and the scale of time" (I, II & III), *Proceedings of the Royal Society*, **158**, s. 324-347, **159** s. 171-191 & s. 526-547.
- [31] 1937, "On the origin of laws of nature", (supplement til) *Nature*, **139** (1937), s. 997-999.
- [32] 1937, "The acceleration for a substratum and the principle of inertia", *Quarterly Journal og Mathematics*, **8** (1937), s. 22-31.
- [33] 1938 Milne og McCrea, W.H., "On the meaning of uniform time, and the kinematic equivalence of the extra-galactic nebulae", *Zeitschrift für Astrophysik*, **15** (1938), s. 263-298.
- [34] 1938, "A possible mode of approach to nuclear dynamics", *New theories in physics*, (Warszawa-konference, 30.maj-3. juni, 1938), (Paris: International Institute of Intellectual Co-operation, 1939), s. 207-219.
- [35] 1938, "On the equations of electromagnetism" (I & II) *Proceedings of the Royal Society*, A, **165** (1938), s. 313-352 (I) & s. 342-357 (II).
- [36] 1941, "Kinematical relativity - a discussion" (indlæg af både Milne, A.G. Walker og G.C. McVittie), *The Observatory*, **64** (1941), s. 11-25.
- [37] 1941, "Remarks on the philosophical status of physics", *Philosophy*, **16** (1941), s. 356-371.
- [38] 1943, "Rational electrodynamics" (I, II & III), *Philosophical Magazine*, **34** (1943), s. 73-82 (I), s. 82-101 (II), s. 197-211 (III), s. 235-245 (IV) & s. 246-258 (V).

- [39] 1943, "On the philosophy of nature", i M.K. Munitz *Theories of the Universe*, (Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1957), s. 354-376. (teksten repræsenterer E.A. Milnes James Scott-forelæsning afholdt d. 3.maj 1943, og er identisk med Milnes artikel i *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, Sec. A, **62** (1943-49), s. 10-24, undtagen et appendix i sidstnævnte).
- [40] 1945, "Ralph Howard Fowler", *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society*, **5** (1945), s. 60-78.
- [41] 1947, "Kinematic relativity", *Théories nouvelles de relativité, III* (Bulletin de l'Academie Internationale de philosophie des sciences, Paris: Herman & C^{ie}, 1949) (foredrag v. Bruxellessymposion, 1947. Indeholder desuden en diskussion mellem Milne og bl.a. G. Lemaître og H. Weyl).
- [42] 1950, "Gravitation and magnetism", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **110** (1950), s. 266-274.

Anden primær litteratur

- [43] Allen, Woody, *Getting Even* (N.Y.: Random House, 1978), s. 24.
- [44] Bernal, John, *The Social Function of Science*, (London: George Routledge & Sons Ltd., 1939).
- [45] Bonner, William B., "Fifty years of relativity", *Science News*, **37** (1955), s. 7-24.
- [46] Chalmers, J.A. og Chalmers, B., "The expanding universe - an alternative view", *Philosophical Magazine*, **19** (1935), s.436-446.
- [47] Clausius, Rudolf, "On a mechanical theorem applicable to heat", *Philosophical Magazine*, ser.4, **11** (1870), s. 122-127.
- [48] Couderc, Paul, *The Expansion of the Universe* (London: Faber & Faber, 1952).
- [49] Dingle, Herbert (ed.), "The evolution of the universe" (fra "Contributions to a British Association Discussion on the Evolution of the Universe, s. 699-722 i supplement til) *Nature*, **128** (1931).
- [50] Dingle, Herbert, "On E.A. Milne's theory of world structure and the expansion of the universe", *Zeitschrift für Astrophysik*, **7** (1933), s. 167-179.
- [51] Dingle, Herbert, *Through Science to Philosophy* (London: Williams & Norgate, 1937).
- [52] Dingle, Herbert, "Modern Aristotelianism", *Nature*, **139**, s. 784-786.

- [53] Dingle, Herbert, "Deductive and inductive methods in science: A reply", *Nature*, **139**, s. 1011-1012.
- [54] Dingle, Herbert, "Judgment by hypothesis", *Nature*, **140** (1937), s. 589-590.
- [55] Dirac, Paul M., "The cosmological constants", *Nature*, **139** (1937), s. 323.
- [56] Dirac, Paul M., "A new basis for cosmology", *Proceedings in the Royal Society*, bf 165 (1938), s. 199-208.
- [57] Eddington, Sir Arthur, "Cosmological applications of the theory of quanta" *New theories in physics*, (Warszawa-konference, 30.maj-3. juni, 1938), (Paris: International Institute of Intellectual Co-operation, 1939), s. 173-206.
- [58] Einstein, Albert, "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie", *Sitzungsberichte der Preussischen Akad. des Wissenschaften*, Berlin, 1917 i *The Principle of Relativity*, (Dover, NY), s. 177-188.
- [59] Einstein, Albert, de Sitter, Willem, "On the relation between the expansion and the mean density of the universe", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **18** (1932), s. 213-214.
- [60] Fowler, R.H., "Dissociation equilibria by the method of partitions", *Philosophical Magazine*, **45** (1923), s. 1-33.
- [61] Haldane, John B.S., "Is space-time simply connected?", *The Observatory*, **59** (1936), s. 228-229.
- [62] Haldane, John B.S., "The position of genetics", *Nature*, **140** (1937), s. 428.
- [63] Haldane, John, B.S., "A new theory of the past", *American Scientist*, **33** (1945), s. 129-145.
- [64] Johnson, M., *Time, Knowledge and the Nebulae*, (N.Y.: Dover, 1947).
- [65] Layzer, David, "On the significance of newtonian cosmology", *Astronomical Journal*, **59** (1954), s. 268-270.
- [66] McVittie, G.C., "Kinematic relativity", *The Observatory*, **63** (1940), s. 273-281.
- [67] "Meeting of the Royal Astronomical Society" (9. jan. 1931), *The Observatory*, **54** (1931), s. 33-45.
- [68] "Meeting of the Royal Astronomical Society" (oktober 1935), *The Observatory*, **58** (1935), s. 108-114.
- [69] "Meeting of the Royal Astronomical Society" (december 1935), *The Observatory*, **68** (1948), s. 214-216.

- [70] Milne, E.A., "Catalogue of the papers and correspondence of Edward Arthur Milne, FRS" (samlet af Jeannine Alton og Peter Harper), CSAC 102/6/84, Dept. of Western Manuscripts, Bodleian Library, Oxford.
- [71] Heckmann, Otto, (Ukendt titel), *Hamburg Abh. Math.*, **14** (1941), s. 192.
- [72] Heckmann, Otto, *Theorien der Kosmologie* (Berlin: Springer-Verlag, 1942).
- [73] Payne, Cecilia H., "Stellar atmospheres: A contribution to the observational study of high temperature in the reversing layers of stars", *Harvard College Observatory Monograph*, **no.1** (Cambridge, 1925).
- [74] "Physical Science and Philosophy" *Nature*, **139** (1937), s. 1000-1010.
- [75] Plaskett, Harry H., "The Spectra of Three O-type stars", *Publications of the Dominion Astrophysical Observatory*, **1, No. 30** (1922).
- [76] Popper, Karl R., "Interpretation of nebular redshifts", *Nature*, **145** (1940), s. 69-70.
- [77] Robbins, Frank, "The Royal Astronomical Society's Gold Medalist", *Journal of the British Astronomical Association*, **45** (1935), s. 204-206.
- [78] Robertson, Howard P., "On the foundations of relativistic cosmology", *Proceedings of the National Academy of the Sciences*, **15** (1929), s. 822-829.
- [79] Robertson, Howard P., "On E.A. Milne's theory of world structure", *Zeitschrift für Astrophysik*, **7** (1933), s. 153-166.
- [80] Robertson, Howard P., "Kinematics and World-Structure" (I, II & III), *Astrophysical Journal*, **82** (1935), s. 284-301 (I), **83** (1936), s. 187-201 (II) & s. 257-271 (III).
- [81] Saha, Megh Nad, "Ionisation in the solar chromosphere", *Philosophical Magazine*, **40**, (1920), s. 472-488.
- [82] Saha, Megh Nad, "On a physical theory of stellar spectra", *Proceedings of the Royal Society of London, A*, **99** (1921), s. 135.
- [83] Schatzmann, Evry, *The Origin and Evolution of the Universe* (London: Hutchinson, 1966), (fransk udgave 1957).
- [84] Schilpp, P.A. (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (Evanston, Ill: Library of Living Philosophers, 1949).
- [85] Strömgren, Bengt, "Universet, der udvider sig", *Nordisk Astronomisk Tidsskrift*, **14** (1933), s.53-68.

- [86] Struve, O. & Zebergs, V., *Astronomy in the 20'th Century* (N.Y.: MacMillan, 1962).
- [87] *The Times* "The universe" (maj-juni 1932): 10/5, s.18 (journalist), 14/5, s.6 (S.Coleridge), 18/5, s.11 (J.H.Jeans og H.C.Thursfield), 19/5, s.13 (S.Coleridge og Tiverton), 20/5, s.10 (R.Giles og H.W.B.Joseph), 21/5, s.6 (J.G.Anderson), 23/5, s.15 (J.H.Jeans), 23/5, s.20 (journalist), 24/5, s.10 (R.Giles og H.Stacpole), 25/5, s.10 (H.W.B.Joseph og Lord Olivier), 26/5, s.10 (G.Peace og Rev. W.D..L.Greer), 27/5, s.15 (J.H.Jeans og Lord Rayleigh), 28/5, s.8 (F.A. Lindemann of H.Belloc), 30/5, s.8 (H.Dingle), 31/5, s.12 (H.F.Hallet), 1/6, s.10 (H.Stacpole og G.Ainslie Hight), 2/6, s.10 (W.Hooper og J.W.Matthews), 3/6, s. 10 (B.Selincourt og H.E.Roberts), 4/6, s.15 (Sir O.Lodge og P.L.Moore), 6/6, s.8 (Lord Berkeley), 11/6, s.13 (journalist).
- [88] Tolman, Richard C., "Methods of the physical universe", *Science*, s. 367-373.
- [89] Walker, Arthur G., "On the formal comparison of Milne's kinematical system with the systems of general relativity", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **95** (1935), s. 263-269.
- [90] Walker, Arthur G., "The principle of least action in Milne's kinematical relativity", *Proceedings of the Royal Society*, **147** (1935), s. 478-490.
- [91] Whitehead, Alfred N. & Russell, Bertrand, *Principia Mathematica*, 3 bind (London, 1910-13).
- [92] Whitrow, Gerald J., "A derivation of the Lorentz formulae", *Quarterly Journal of Mathematics*, **4** (1933), s. 161-172.
- [93] Whitrow, Gerald J., "World structure and the sample principle", *Zeitschrift für Astrophysik*, **13** (1937), s. 113-125.
- [94] Wilson, William, "Kinematic relativity", *Philosophical Magazine*, **35** (1944), s. 241-249.

Sekundær litteratur

- [95] Balashov, Yuri, "Two theories of the universe" (Essay review), *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* **29,1** (1998), s. 141-149.
- [96] *Bulletin of the Atomic Scientists* **5** (1952), (uddrag af Pavens erklæring, der definerede den katolske kirkes holdning til videnskab), s. 142-146 (+s.165)
- [97] "Cambridge University Natural Science Club, Founded March 10th, 1872" (ukendt forfatter, Cambridge, December 1982).

- [98] Cardwell, Donald S.L., "Science and World War I", *Proceedings of the Royal Society, A*, **342** (1974), s. 447-456.
- [99] Chandrasekhar, Subrahmanyam, *Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations in Science* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1987), s. 74-91.
- [100] Douglas, A.V., *The Life of Arthur Stanley Eddington*, (London: Thomas Nelson and Sons, 1956).
- [101] Gale, George & Urani, J.R., "Philosophical midwifery and the birthpangs of modern cosmology", *American Journal of Physics*, **61** (1993), s. 66-73.
- [102] Gale, George & Urani, J.R., "Philosophical aspects of the origin of modern cosmology", s.481-494 i N.S.Hetherington (ed.), *Encyclopedia of Cosmology*, (N.Y.: Garland, 1993).
- [103] Gale, George, "Philosophical aspects of cosmology", s.547-568 i N.S.Hetherington (ed.), *Cosmology: Historical, literary, ...*, (N.Y.: Garland, 1993).
- [104] Gale, George & Shanks, Niall "Methodology and the birth of modern cosmological inquiry", *Studies in the History of Modern Physics*, **27** (1996), s. 279-296.
- [105] Gale, George & Urani, J.R., "Milne, Bondi and the 'Second way' to cosmology", s.343-375 i H. Goenner et al. (ed.), *The Expanding Worlds of General Relativity* (Einstein Studies, vol. 7) (Birkhauser, USA, 1999).
- [106] Harder, Allen J., "E.A. Milne, scientific revolutions and the growth of knowledge", *Annals of Science*, **31** (1974), s. 351-63.
- [107] L Hetherington, Norris S., "The great debate", s.321-327 i N.S.Hetherington (ed.), *Cosmology: Historical, literary, ...*, (N.Y.: Garland, 1993).
- [108] Kendall, Davis G. "Statistics, geometry and the cosmos" (The Milne Lecture 1983), *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, **25** (1984), s. 147-156.
- [109] Kerszberg, Pierre, "On the alleged equivalence between newtonian and relativistic cosmology", *British Journal of the Philosophy of Science*, **38** (1987), s. 347-80.
- [110] Kerszberg, Pierre, *The Invented Universe: The Einstein-de Sitter Controversy (1916-17) and The Rise of Relativistic Cosmology*, (N.Y.: C.P., 1989), s. 354-368.
- [111] Kragh, Helge, "Cosmo-physics in the thirties: Towards a history of Dirac cosmology", *Historical Studies of the Physical Sciences*, **13** (1982), s. 69-108.

- [112] Kragh, Helge, "The beginning of the world: Georges Lemaître and the expanding universe", *Centaurus*, **30**,2, (Munksgaard, Kbh., 1987), s. 114-139.
- [113] Kragh, Helge, *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*, (Princeton: Princeton Univ. Press, 1996).
- [114] Kragh, Helge, *Quantum Generations* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1999).
- [115] Lübecke, Poul (ed.), *Politikens Filosofi Leksikon* (Kbh: Politikens Forlag, 1983).
- [116] Magill, Frank N. (ed.), *The Nobel Prize Winners, Physiology or Medicine* (USA: Salem Press, 1991), s.216-222.
- [117] McCrea, William H., "The ejection of matter by novae", **17** (1938), s. 208-217.
- [118] McCrea, William H., "E.A. Milne", *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society*, **7** (1951), s. 420-443.
- [119] McCrea, William H., "Cambridge Physics 1925-1929: Diamond jubilee of golden years", *Interdisciplinary Science Reviews*, **11** (1986), s. 269-284.
- [120] Morrell, Jack, *Science at Oxford, 1914-1939*, (Oxford: Clarendon Press, 1997).
- [121] Merleau-Ponty, Jacques, *Cosmologie du XX'eme siecle: Étude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, (Paris: Gallimard, 1965).
- [122] North, John D., *The Measure of the Universe: A history of modern cosmology* (Oxford: Clarendon Press 1965).
- [123] L Pattison, M., "Scientists, inventors and the military in Britain, 1914-19: Munitions Inventions Department", *Social Studies of Science*, **13** (1983), s. 521-568.
- [124] Paul, Diane B., "A war on two fronts: J.B.S. Haldane and the response to Lysenkoism in Britain", *Journal of the History of Biology*, **16** (1983), s. 1-37.
- [125] Payne-Gapotschkin, Cecilia, *Cecilia Payne-Gapotschkin: An Autobiography and other Recollections* (2.udg.), (Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1996).
- [126] Pepys, M.B., "Cambridge University Natural Science Club, 1872-1972", *Nature*, **237** (1972), s. 317-319.
- [127] Rebsdorf, Simon, "Tempus - naturfilosofisk essay", *Kvant (fysisk tidsskrift)*, **juni** (1998), s. 9-17.

- [128] Smith, Meg Weston, "E.A.Milne and the creation of air defence: some letters from an unprincipled brigand, 1916-1919", *Notes and Records of the Royal Society of London*, **44**,**2** (1990), s. 241-255.
- [129] Smith, Meg Weston, *A Scholarship Boy, Sugar, and a Round Square*, (Beverley: Highgate Publ., 1998). (Kopi kan rekvireres hos S.O. Rebsdorf).
- [130] Smith, R.W., "Cosmology 1900-1931", s.329-345 i N.S.Hetherington (ed.), *Cosmology: Historical, literary, ...*, (N.Y.: Garland 1993).
- [131] Wali, Kameshwar C., *Chandra: A Biography of S. Chandrasekhar* (Univ. of Chicago Press, 1991).
- [132] Whitrow, Gerald J., "Milne, Edward Arthur", C.C. Gillespie's *Dictionary of Scientific Biography*, (N.Y.: C. Scribner's Sons, 1974), s. 404-406.
- [133] Whitrow, Gerald J., "Milne's cosmology", s. 410-416 i *Encyclopedia of Cosmology*, (N.Y.: Garland, 1993).
- [134] Whitrow, Gerald J., *The Natural Philosophy of Time* (Oxford: Clarendon Press, Oxford, 1980).

Astro- og atomfysikkens historie

- [135] Brush, Stephen G., *The History of modern science, a guide to the Second Scientific Revolution, 1800-1950*, (Iowa: Iowa State Univ. Press, 1988).
- [136] DeVorkin, D.H. & Kenat, R., "Quantum physics and the stars (I): The establishment of a stellar temperature scale", *Journal for the History of Astronomy*, **14**, (1983), s. 102-132.
- [137] DeVorkin, D.H. & Kenat, R., "Quantum physics and the stars (II): Henry Norris Russel and the abundances af the elements in the atmospheres of the sun and stars", *Journal for the History of Astronomy*, **14**, (1983), s. 180-222.
- [138] Hearnshaw, J.B., *The Analysis of Starlight* (Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1986).
- [139] Lang, Kenneth R. & Gingerich, Owen, *A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900-1975*, (Massachusetts: Harvard Univ. Press, 1979).

Astronomi- og fysiklitteratur

- [140] Gray, David, F., *The Observation and Analysis of Stellar Atmospheres*, (2.udg.) (Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1992), s. 1-17 og s. 97-115.
- [141] Olesen, Poul & Ambjørn, Jan, *General relativity, cosmology and classical gauge theories*, (lecture notes), (Københavns Universitet, NBI, Forår 1997), s. 1-75.

Internetreferencer

- [142] www.cam.ac.uk/CambUniv/pubs/history/hist.html#eight
Cambridge Universitetets historie.

Upublicerede primærkilder (anvendt med tilladelse)

De følgende primærkilder befinder sig i to arkiver, nemlig Western Manuscripts, Bodleian Library (se Milne-kataloget [70]) hhv. Strömgren-arkivet v. Institut for Videnskabshistorie i Århus.

- [143] 1922, "The relations of mathematics to science", foredrag givet d. 6. februar 1922, 33 håndskrevne sider [70, B.4] (Jeg har i samarbejde med Meg Weston Smith transskribert disse noter (13 s.), som aldrig er blevet publiceret, se appendix A).
- [144] Milne → B. Strömgren (8/12, 1932), 2 sider [Strömgren-arkivet].
- [145] Hubble → Milne (3/4, 1933), 2 sider [70].
- [146] Milne → Geoffrey, 1939-1940. (4/9 1939, 3/7, 15/9 og 6/10 1940, 21 sider) [70].
- [147] Milne, E.A., "My philosophy", håndskrevet (6 siders kronologiske, autobiografiske notater) [70].
- [148] Milne → Chandrasekhar (14/2, 25/2, 1950), 4 sider [70].
- [149] Chandrasekhar → McCrea (14/10, 1950), 7 maskinskrevne sider [70].

Fotoreferencer

- [150] **Eddington:** Plummer, H.C., "Arthur Stanley Eddington", *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society* 5 (1945), s.112.
- [151] **Fowler, R.H.:** Milne, E.A., "Ralph Howard Fowler", *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society*, 5, (1945), s. 6.
- [152] **Hill:** Catz, Bernard, Sir, "Archibald Vivian Hill", *Biographical Memoirs of Fellows in the Royal Society*, 24 (1978), s. 70.
- [153] **Milne:** Fra [108, s.148], 1919.
- [154] **Milne:** Fra [108, s.148], 1926.
- [155] **Milne:** Fra [77, forside], 1935.
- [156] **Milne:** Fra [108, s.149], 1939.
- [157] **Payne-Gapotschkin:** Fra [125] (de første sider).
- [158] **Saha:** Fra [137, s.182].