

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI SCIENZE  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia

**JACOBUS KAPTEYN: DA ASTRONOMO  
SENZA TELESCOPIO A IDEATORE DI  
UN NUOVO MODELLO DI UNIVERSO**

Tesi di Laurea

Relatore:  
Chiar.ma Prof.  
Paola Focardi

Presentata da:  
Filippo Tropeano

Sessione IV  
Anno Accademico 2020/2021



## Introduzione

Jacobus Kapteyn (1851-1922) fu un astronomo olandese che diede i suoi contributi più importanti nel campo della ricerca galattica, occupandosi, in particolare, di statistica stellare, ossia della determinazione del numero e dei tipi delle stelle nelle diverse regioni dello spazio e dello studio dei loro moti. Quando Kapteyn diede avvio al suo ambizioso studio sistematico, la cui esecuzione si sarebbe protratta nel corso di tutta la sua vita, il problema della distribuzione spaziale delle stelle equivaleva ancora al problema della struttura dell'Universo. Non si sapeva ancora che la Galassia fosse solo uno degli innumerevoli sistemi stellari che popolano l'Universo.

Pietre miliari nella ricerca di Kapteyn furono la scoperta, nel 1904, dei cosiddetti flussi stellari, la determinazione della funzione di luminosità stellare e il modello di galassia presentato nel suo articolo *First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System*, pubblicato sull'*Astrophysical Journal* nel maggio 1922. Prima di scoprire i flussi stellari, Kapteyn realizzò un importante lavoro di riferimento noto come "Cape Photographic Durchmusterung" [CPD] in collaborazione con David Gill, direttore dell'Osservatorio Reale di Città del Capo, in Sudafrica. Poiché l'Università di Groninga non gli concesse mai, nonostante le sue insistenti richieste, i finanziamenti per la realizzazione di un telescopio, Kapteyn propose a Gill di intraprendere a Groninga la misurazione delle posizioni stellari su lastre fotografiche. Lo scopo era quello di ottenere le posizioni e le magnitudini delle stelle del cielo australe.

L'obiettivo finale di Kapteyn, a cui dedicò la sua intera carriera, fu la determinazione della distribuzione stellare nella Galassia. Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare i risultati dei principali lavori di ricerca di Kapteyn, che culminarono nella definizione del cosiddetto Universo di Kapteyn, ovvero la sua ricostruzione della distribuzione stellare galattica.

Secondo questo modello, formulato intorno al 1921, la Galassia possedeva una struttura simile a quella di un disco e il Sole si trovava prossimo al suo centro. La massima estensione della Galassia era di circa 30.000 anni luce nella direzione orizzontale e di circa 5.000 anni luce nella direzione dei poli. Quest'ultimo risultato, indicato come lo "spessore" della Galassia, fu poi confermato e perfezionato da autori successivi tra cui l'allievo di Kapteyn Jan Oort. Tuttavia, i risultati di Kapteyn per la posizione del Sole e l'estensione del sistema nelle direzioni perpendicolari al polo risultarono erronei perché trascurò l'assorbimento della luce da parte del mezzo interstellare. Kapteyn era consapevole della possibile esistenza di tale fenomeno e tentò a lungo di stimarlo attraverso il suo effetto di arrossamento dei colori di stelle lontane ma senza giungere mai a un

risultato conclusivo.

Con la sua definizione di Universo, Kapteyn portò a termine una vita di lavoro lento, metodico e dedicato a “campionare” le stelle o, per usare le sue parole, a “trasformare enormi masse di fatti in leggi”. Il modello di Kapteyn non ebbe vita lunga: un nuovo modello basato su nuove evidenze osservative, quello di Shapley si sarebbe affermato molto presto, ma anche questo avrebbe avuto una vita molto breve.

Jacobus Kapteyn (1851-1922) was a Dutch astronomer who made his most important contributions in the field of galactic research, particularly in the study of stellar statistics, that is, the determination of the number and types of stars in different parts of space and their motions.

At the time that Kapteyn began his ambitious systematic program, the execution of which would become his life's work, the problem of the spatial distribution of stars still amounted to the problem of the structure of the Universe. It was not known yet that the Galaxy was just one of the countless stellar systems that populate the Universe.

Milestones in Kapteyn's research were the discovery, in 1904, of so-called star streams, the determination of the stellar luminosity function, the study of isolated, loose groups of massive and hot B stars, and the model of the galaxy presented in his paper *First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System* (published in the *Astrophysical Journal* in May 1922). Even before making his discovery of stellar fluxes, Kapteyn carried out an important landmark work known as "Cape Photographic Durchmusterung" [CPD] in collaboration with David Gill, director of the Royal Observatory in Cape Town, South Africa. Since the University of Groningen (despite Kapteyn's requests) could not provide him with a telescope, he offered Gill to undertake in Groningen the measurement of stellar positions on photographic plates taken by Gill. Their purpose was to provide data on the positions and brightness of stars for the southern sky, after they were measured for the northern sky by visual means – not photographic – several decades earlier at the Bonn Observatory with the "Bonner Durchmusterung".

Kapteyn's ultimate goal was to determine the stellar distribution in the Galaxy, and he devoted his entire career to this. The purpose of this thesis is to analyze the results of Kapteyn's main research work, which culminated in the definition of the so-called Kapteyn Universe, that is, his reconstruction of the galactic star distribution.

According to this model, which arrived around the year 1921, the Galaxy possessed a disk-like structure with the Sun located near the center. Its maximum extent was about 30,000 light-years in the horizontal direction and about 5,000 light-years in the direction of the galactic poles. This last result, referred to as the "thickness" of the Galaxy, was later confirmed and perfected by later authors including Kapteyn's pupil Jan Oort. However, Kapteyn's results for the position of the Sun and the extension of the system in directions perpendicular to the pole were ultimately spurious because he neglected the absorption of light by the interstellar medium. Kapteyn was aware of the problem of the possible existence of such matter and vigorously pursued methods to identify it through its reddening effect on the colors of distant stars but without conclusive results.

With his definition of the Universe, a life of slow, methodical work, dedicated to sampling the stars and “grinding huge masses of fact into law” had come to an end. Kapteyn’s model didn’t last long: a new model based on new observational evidence, by Howard Shapley, would be established very soon, but this too would have had a very short life.

# Indice

<b>I</b>	<b>Jacobus Kapteyn</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>I primi anni</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Parallassi</b>	<b>11</b>
2.1	L'articolo del 1891 e le prime misurazioni . . . . .	11
2.2	Misurare la parallasse . . . . .	12
2.3	L'accoglienza del lavoro di Kapteyn . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Il Cape Photographic Durchmusterung</b>	<b>18</b>
3.1	Lo sviluppo dell'astronomia in Sudafrica . . . . .	18
3.2	La fotografia astronomica nel XIX secolo . . . . .	20
3.3	L'origine del CPD . . . . .	22
3.3.1	La collaborazione con David Gill . . . . .	24
3.4	Il progetto Carte du Ciel . . . . .	26
3.4.1	Esecuzione della Carte du Ciel . . . . .	27
3.5	Esecuzione del CPD . . . . .	29
3.6	Il metodo parallattico . . . . .	31
3.7	La Stella di Kapteyn . . . . .	34
3.8	Produzione del CPD . . . . .	38
3.9	Il lavoro all'osservatorio di Groninga . . . . .	40
3.9.1	Parallassi e moti propri . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Le correnti stellari</b>	<b>44</b>
4.1	Ulteriori studi sui moti stellari: la legge delle velocità . . . . .	44
4.2	Determinare la distribuzione spaziale delle stelle . . . . .	47
4.3	La definizione di magnitudine assoluta . . . . .	50
4.4	L'esposizione universale di St. Louis del 1904 . . . . .	52
4.5	Le due correnti stellari . . . . .	53
4.6	Il successo del modello . . . . .	55

<b>5</b>	<b>Il Progetto delle Aree Selezionate</b>	<b>59</b>
5.1	La proposta del Progetto delle Aree Selezionate . . . . .	59
5.2	La collaborazione con Hale al monte Wilson . . . . .	61
5.3	La produzione del Progetto delle Aree Selezionate . . . . .	64
5.4	Il Durchmusterung di Harvard-Groninga . . . . .	65
5.5	Ulteriori progressi del Progetto . . . . .	67
5.5.1	Il Durchmusterung di Bergedorf . . . . .	68
5.6	La fine non ufficiale del progetto . . . . .	69
<b>II</b>	<b>L'Universo di Kapteyn</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Harlow Shapley e gli studi sugli ammassi</b>	<b>73</b>
6.1	L'Universo di Shapley . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Kapteyn e van Rhijn</b>	<b>79</b>
<b>8</b>	<b>Le critiche alla calibrazione della relazione periodo-luminosità</b>	<b>83</b>
8.1	Due modelli di universo a confronto . . . . .	85
<b>9</b>	<b>Il “primo tentativo”: l'Universo di Kapteyn</b>	<b>89</b>
<b>10</b>	<b>Il problema dell'assorbimento interstellare</b>	<b>93</b>
10.1	Densità stellare o estinzione? . . . . .	95
10.2	Sull'assorbimento della luce nello spazio . . . . .	97
<b>11</b>	<b>L'eredità di Kapteyn: gli anni successivi</b>	<b>102</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>105</b>



**Parte I**  
**Jacobus Kapteyn**

# Capitolo 1

## I primi anni

Jacobus Cornelius Kapteyn nacque il 19 gennaio 1851 a Barneveld, un piccolo villaggio di poche migliaia di abitanti situato nella regione centrale di Veluwe, nei Paesi Bassi, decimo<sup>1</sup> di quindici figli, in una famiglia di educatori. Era infatti il figlio dell'insegnante Gerrit Jacobus Kapteyn, nato il 4 gennaio 1812 a Bodegraven<sup>2</sup>, ed Elisabeth Cornelia Koomans, nata il 5 novembre 1814 a Rotterdam, figlia di un fattore di Bodegraven. I due si sposarono nel 1837 e successivamente si stabilirono a Voorschoten, un piccolo villaggio tra L'Aia e Leida, dove lui aveva aperto un collegio maschile. Tale collegio era frequentato perlopiù da ragazzi provenienti dall'Aia, i quali tuttavia si rivelarono viziati, abituati al lusso e difficili da controllare. A causa di questa situazione, Gerrit Jacobus decise presto di fare richiesta per un posto in una scuola a Barneveld, la quale fu accettata e li portò entrambi a trasferirsi nella cittadina con i primi due figli. La scuola, col passare degli anni, divenne sempre più rinomata e sempre più alunni facevano richiesta per iscriversi, cosa che presto portò Kapteyn a dimettersi, comprare un pezzo di terra con un edificio grande e spazioso e a fondare un suo collegio, che battezzò "Benno". Questo collegio divenne sempre più famoso, attirando da tutta la nazione studenti e insegnanti illustri.

Il fatto di provenire da una famiglia così numerosa, cosa non insolita all'epoca, unito al fatto che i suoi genitori trattavano figli e alunni come una vera e propria famiglia allargata, ebbe una certa influenza sul carattere del giovane Kapteyn, il quale si sentì spesso ignorato. Vedeva poco spesso i suoi genitori o i suoi fratelli, e questa cosa influenzò i rapporti che avrebbe instaurato in età adulta, dei quali si sentiva particolarmente riconoscente.

---

<sup>1</sup>Molte fonti, compresa la biografia scritta dalla figlia Henrietta, riportano che Kapteyn fosse il nono figlio, in realtà era il decimo.

<sup>2</sup>Bodegraven è una cittadina nella provincia dell'Olanda Meridionale, equidistante (circa 30 km) dalle principali città olandesi: Amsterdam, Rotterdam, Utrecht e L'Aia.



Figura 1.1: Kapteyn da giovane, probabilmente intorno al 1880. (Crediti: Prabook)

Kapteyn veniva ricordato come un giovane dalla corporatura snella e dall'aspetto pallido. Inoltre, ereditò delle palpebre insolitamente lunghe e pesanti da sua madre, le quali gli davano un aspetto distratto (“costantemente in profonda riflessione”) che il suo comportamento introverso non faceva che rafforzare. Amava inoltre gli animali, in particolare gli uccelli, e allevava canarini da ragazzo. Un aneddoto su un gufo che lui stesso catturò dimostra il suo precoce interesse per la sperimentazione scientifica. Sentì dire che i gufi non potevano vedere nella luce diurna, ma, non credendoci, decise di verificare la verità dell'affermazione tendendo delle corde attraverso una stanza chiusa in maniera simile a una ragnatela, e liberò il gufo. Esso riuscì a volare senza mai toccare una corda, contraddicendo quella credenza e contribuendo ad alimentare l'interesse di Kapteyn verso la verifica dei fatti scientifici per sé stesso.

Come molti dei suoi fratelli maggiori – uno dei quali, Willem, divenne professore di matematica e suo collaboratore su alcuni lavori in ambito matematico – Kapteyn mostrava un talento per la matematica e le scienze fisiche, campi su cui si distinse come straordinariamente intelligente. Nella sua biografia, Henrietta racconta che un giorno, suo fratello maggiore Hubert, tornato a casa dall'università per le vacanze, si offrì di giocare a scacchi con lui. Kapteyn, che all'epoca aveva solo dieci anni, riuscì a batterlo per ben tre volte di fila, dopodiché Hubert si rifiutò di giocare ancora con lui.

Quando aveva 14 anni, sua sorella maggiore Albertine Maria (Bertamie), tornò da

un viaggio in Inghilterra e gli portò un globo stellare<sup>3</sup> in modo da poterlo studiare insieme. Il globo venne messo nel giardino e Kapteyn iniziò subito a localizzare le stelle. Con enorme cura e grande precisione produsse una mappa stellare, sulla quale indicò stelle di prima magnitudine, le più luminose, con figure stellari tagliate da carta color oro, stelle di seconda magnitudine con carta color argento e dipingendo le posizioni di stelle di terza magnitudine con vernice bianca. Fu un lavoro sorprendente che sopravvive ancora oggi<sup>4</sup>, mostrando come, anche all'età di 14 anni, possedesse già lo stesso amore e la stessa precisione nel lavoro che avrebbe dimostrato successivamente durante la sua carriera astronomica. Quando suo padre notò la serietà con cui si dedicava allo studio delle stelle, gli regalò un telescopio più grande, che fu posto nella mansarda e con il quale fece numerose osservazioni.

All'età di 16 anni, Kapteyn superò l'esame d'ingresso per l'università di Utrecht, ma suo padre pensò fosse troppo giovane per lasciare casa e lo tenne con sé a Barneveld un altro anno. La scelta di Kapteyn per Utrecht non fu casuale; era la città dove studiarono anche i suoi due fratelli maggiori Nicolaas Pieter (1845-1916) e Willem (1849-1927). Quella di Utrecht era l'università più vicina a Barneveld e in generale godeva di un'eccellente fama. In olandese la facoltà era chiamata "*wis en natuurkunde*", la cui traduzione è "matematica e fisica".<sup>5</sup>

Quando Kapteyn si iscrisse, nel 1868, condusse una vita universitaria relativamente spensierata. La scuola rigorosa di suo padre lo aveva preparato bene, e così riuscì a compiere gli studi di matematica e fisica abbastanza facilmente. Durante il suo ultimo anno a Utrecht, Kapteyn incontrò la sua futura moglie, Elise Kalshoven. La famiglia Kalshoven era, nelle parole della figlia Henrietta, l'antipode della famiglia Kapteyn, in quanto, come scrisse Henrietta "*non c'erano studi e lavori in corso, tutto era allegro e accogliente*". Kapteyn ammirava la natura allegra di Elise e la sua sicurezza di sé, e "*conservò l'immagine di questa giovane ragazza radiosa nel suo cuore fino a quando non sarebbe arrivato il suo momento*".

Kapteyn conseguì il dottorato di ricerca nel 1875 con una tesi sulla vibrazione delle membrane, intitolata *Onderzoek der Trillende Platte Vliezen* ("Uno studio delle membrane piatte vibranti"), un argomento che riguardava l'osservazione condotta dal fisico tedesco Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) secondo cui quando si copre un

---

<sup>3</sup>La biografia di Henrietta inizialmente menziona una mappa, ma la frase successiva lascia intendere che si trattasse di un globo.

<sup>4</sup>Oggi la mappa stellare è appesa a una parete nella *Kapteyn Room* dell'Istituto Astronomico Kapteyn dell'Università di Groninga.

<sup>5</sup>La facoltà comprendeva anche chimica, biologia e farmacia. "*Natuurkunde*" in questo caso si riferisce agli studi sulla natura in un contesto più ampio; quindi, la traduzione appropriata di "*natuurkunde*" in questo caso è "scienze naturali".

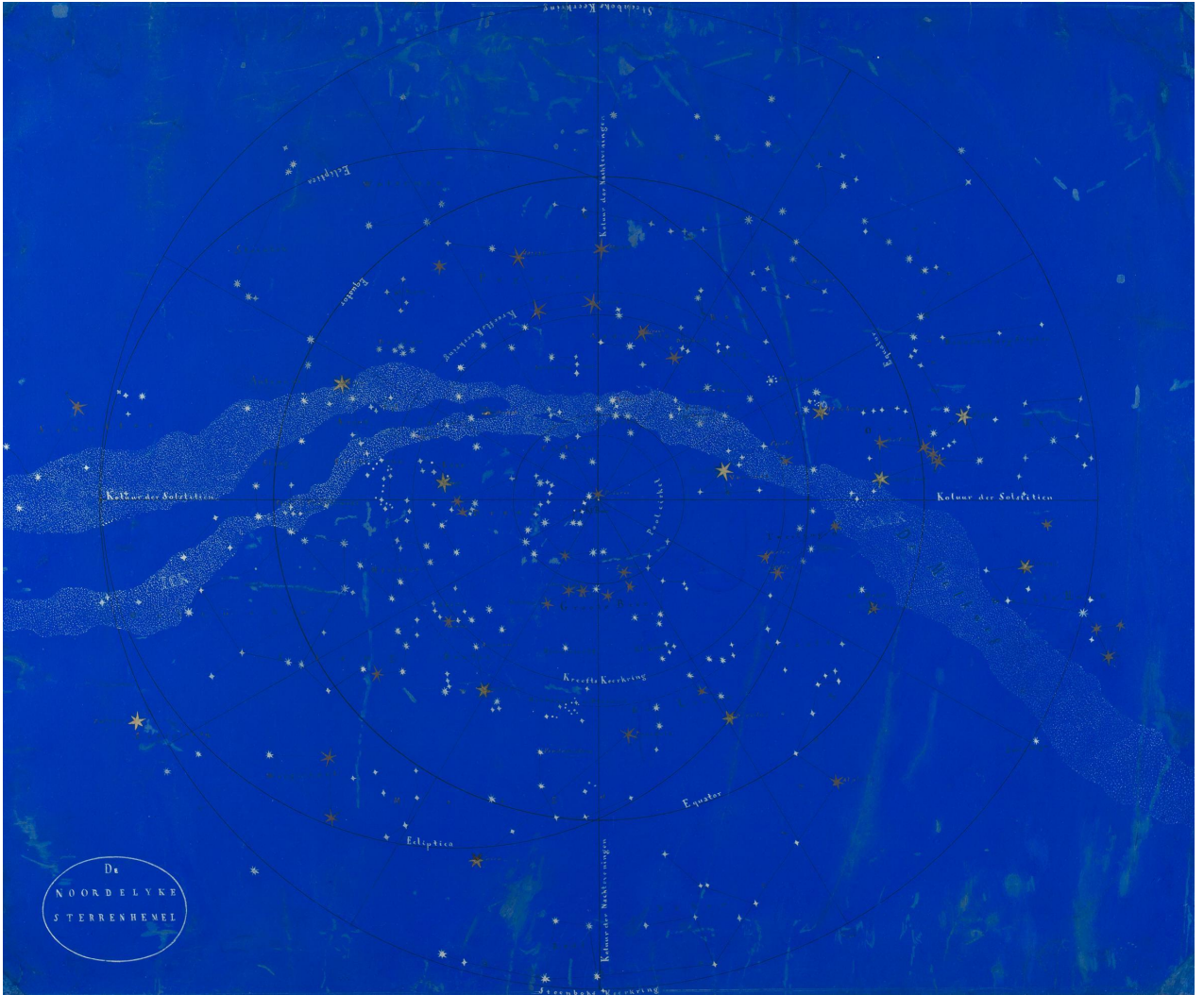


Figura 1.2: Immagine della mappa stellare che Kapteyn realizzò all'età di 14 anni, appesa oggi nella *Kapteyn Room* nell'Istituto Astronomico Kapteyn. (Kapteyn Astronomical Institute)

piatto piano con una polvere e viene poi fatta vibrare per esempio da un archetto di violino, la polvere forma dei motivi regolari e simmetrici.



Figura 1.3: Frontespizio delle tesi di dottorato di Willem Kapteyn “Sulla teoria delle lastre vibranti e la loro relazione on gli esperimenti”, presentata all’Università di Utrecht e sostenuta il 14 giugno 1872, e di Jacobus Cornelius Kapteyn “Studio delle membrane piatte vibranti” presentata all’Università di Utrecht e sostenuta il 24 giugno 1875. (Crediti: *Jacobus Cornelius Kapteyn: Born Investigator of the Heavens*, P.C. van der Kruit)

Dopo aver conseguito il dottorato, Kapteyn si ritrovò a dover decidere cosa fare. Suo padre sperava che avrebbe seguito una tradizione familiare di grande longevità e che sarebbe diventato un insegnante, ma Kapteyn sentiva di non avere la personalità giusta per questa carriera.

Accettò, invece, un impiego come membro dello staff junior o “osservatore” presso l’osservatorio di Leida, una città olandese conosciuta, come Utrecht, per la sua università. Molti autori ritengono che l’ingresso di Kapteyn nel mondo dell’astronomia fu puramente accidentale, dal momento che cercava impiego in campi non necessariamente legati ad essa. L’astronomo olandese Anton Pannekoek (1873-1960), per esempio, scrisse che Kapteyn fece richiesta per un posto come meteorologo a Batavia (oggi Giacarta, la capitale dell’Indonesia) che però era stato appena occupato. Successivamente cercò una posizione in un osservatorio a Pechino, in Cina, ma anche questo piano fallì. Le circostanze dunque lo portarono a Leida dove poté coltivare il suo interesse per

l'astronomia che possedeva sin da piccolo, come dimostrato dalla mappa stellare che realizzò a 14 anni.

Trascorse lì due anni, diventando esperto nel maneggiare la strumentazione astronomica e formulando quesiti di ricerca che avrebbe perseguito per il resto della sua vita.

Nel 1877, un decreto regio istituì Kapteyn come professore di astronomia e meccanica teorica all'Università di Groninga, nello stesso momento in cui suo fratello Willem ricevette una cattedra di matematica all'Università di Utrecht. L'Università di Groninga, fondata nel 1614, contava solo, all'incirca, 250 studenti, e alcuni consideravano la città, nell'estremo angolo nord-orientale dei Paesi Bassi, come remota e provinciale. Tuttavia, il successo professionale di Kapteyn sembrò assicurato. Si trasferì a Groninga e poi tornò nel 1878 per una visita a Utrecht, a chiedere a Elise di sposarlo. La data del matrimonio venne fissata per l'anno successivo e i due si sposarono il 18 luglio 1879 a Utrecht. Entro la fine del 1879, Kapteyn si stabilì a Groninga da uomo sposato e professore universitario, portando con sé grandi speranze di risolvere alcuni dei problemi fondamentali che affliggevano gli astronomi alla fine del XIX secolo.



Figura 1.4: L'Osservatorio di Leida nel 1864. (Archivi Osservatorio di Leida)

Al momento del suo ingresso nell'università, tenne un discorso inaugurale. Riflettendo il suo interesse per le dimensioni dell'universo e la distribuzione delle stelle, scelse di tenere una conferenza su “La parallasse delle stelle fisse”. Non sopravvive alcun testo di questa sua conferenza, ma è probabile che abbia spiegato al suo pubblico non specializzato l'importanza delle misurazioni della parallasse, e che abbia accennato ai suoi piani di studiare la struttura dell'universo conosciuto ricavando più informazioni possibili sulle distanze stellari. Erano passati quasi quaranta anni dalle prime convincenti misurazioni della parallasse stellare di Bessel, Struve e Henderson, ma i dati sulle distanze stellari erano ancora scarsi e difficili da ottenere. Kapteyn si unì alla facoltà poco dopo la formazione del dipartimento di astronomia, e naturalmente si aspettava di potersi avvalere di un telescopio, attrezzature fotografiche e altri strumenti. L'uni-

versità fino ad allora non aveva nulla, e così Kapteyn si mise al lavoro per raccogliere le risorse necessarie. Individuò un sito fuori città che avrebbe potuto essere adatto per la costruzione di un osservatorio; inoltre richiese fondi per un eliometro, uno strumento come quello di Bessel, per raccogliere dati di parallasse. Inviò una proposta dopo l'altra al governo, che controllava la spesa universitaria. Tuttavia, gli astronomi di Leida e Utrecht, temendo che i fondi per la ricerca astronomica sarebbero stati a malapena sufficienti per loro, si opposero ai suoi piani. Kapteyn continuò a presentare petizioni al governo olandese per dodici anni dopo il suo arrivo nel campus. Mentre aspettava e sperava in una risposta positiva, collaborò con suo fratello Willem in problemi matematici e trascorse le vacanze estive all'osservatorio di Leida.



# Capitolo 2

## Parallassi

### 2.1 L'articolo del 1891 e le prime misurazioni

Come si può notare, sin dall'inizio il principale interesse di Kapteyn fu la distribuzione spaziale delle stelle, e determinare le distanze stellari era di primaria importanza per questo problema.

Il lavoro di Kapteyn sulla parallasse delle stelle risale al 1884, anche se ci volle fino al 1891 per vederlo pubblicato un articolo, *Bestimmung von Parallaxen durch Registrir-Beobachtungen am Meridiankreise* (“Determinazione delle parallassi attraverso osservazioni con il 'registrir' al cerchio meridiano”). Nell'articolo discuteva della fattibilità di misurare le parallassi tramite osservazioni temporali dei passaggi meridiani non solo sulla base di considerazioni generali, ma anche della sua esperienza a Leida nel determinare le posizioni delle stelle in Perseo.

L'idea di misurare le parallassi utilizzando questo metodo fu anche oggetto di discussione in alcune lettere che scambiò con l'astronomo britannico David Gill (1843-1914), al quale fu legato da un lungo rapporto di amicizia e, come si vedrà in seguito, professionale. Per esempio, in una lettera sul programma dell'altitudine polare del 2 marzo 1885, Kapteyn scrisse:

*“Speravo di trovare il tempo di sottoporre al Tuo giudizio un mio progetto per una determinazione delle parallassi stellari per mezzo delle differenze in ascensione retta, ma poiché è giunto il momento di chiudere la lettera chiedo il Tuo permesso di farlo in una successiva occasione. Spero anche che Tu mi scriva se ritieni che il metodo spiegato sia praticabile o meno”.*

Egli ritornò sulla questione in un'altra lettera datata 20 settembre 1885.

Kapteyn comunicò inoltre a Gill che van de Sande Bakhuyzen, direttore dell'Osservatorio di Leida, gli aveva dato accesso al cerchio meridiano di Leida per fare osservazioni notturne durante le sue vacanze accademiche. Descrisse in grande dettaglio come aveva eseguito le sue osservazioni e chiese a Gill consigli sulle procedure. Il 15 ottobre 1885, Gill rispose illustrando il livello di dettaglio che Kapteyn doveva considerare, come l'accuratezza delle osservazioni, la necessità di selezionare stelle di magnitudine circa uguale e gli effetti della temperatura (sia "ottici che meccanici"), poiché le osservazioni dovevano essere fatte a sei mesi di distanza, quindi una in estate e una in inverno.

Le osservazioni furono effettuate durante le sue vacanze in quattro periodi: da marzo ad aprile 1885, da novembre a gennaio 1885-1886, da novembre a gennaio 1886-1887 e da marzo a maggio 1887. Il programma riguardò 15 stelle, selezionate per i loro grandi moti propri, per le quali fu determinata la parallasse con un'accuratezza di circa 0,03 secondi d'arco.

Vale la pena citare il paragrafo conclusivo dell'articolo del 1891 (tradotto dal tedesco):

*“Con i progressi dell'astronomia pratica negli ultimi tempi è ora già evidente che una misura sistematica delle parallassi di tutte le stelle, probabilmente anche fino a stelle di magnitudine 8,5 o 9 [...], non è più un compito che va oltre le capacità degli astronomi. Con tali determinazioni sarà ora possibile rispondere in modo completo alle “grandi domande cosmiche” che sono state poste da Gill ed Elkin nel loro articolo sopra citato”<sup>1</sup>*

## 2.2 Misurare la parallasse

Conoscere le distanze delle stelle è ovviamente il primo, vitale passo verso la comprensione della loro distribuzione nello spazio. La misura fondamentale della distanza di una stella si fa mappando il suo moto annuale nel cielo come riflesso del movimento orbitale della Terra attorno al Sole (vedi Fig. 2.2). Rispetto alle deboli e distanti stelle di fondo, il moto annuale di una stella è un'ellisse, il cui semi-asse maggiore dipende dalla distanza ed è definito "parallasse". Ad una latitudine di 90° (la stella si trova sul polo dell'eclittica) l'ellisse si riduce a un cerchio; a 0° (la stella si trova sull'eclittica) degenera in una linea.

---

<sup>1</sup>L'articolo in questione è *Heliumeter-determinations of stellar parallax in the 'southern hemisphere'* (1885).

(‘BB VII’ stands for a list of ‘Bonn Beobachtungen, series VII’)

Star	$p_{JCK}$	HD	$p_{modern}$	Remarks
BB VII 81 (pr.)	$74 \pm 27$	79210	$172.06 \pm 6.31$	Flare star; binary
		79211	$156.45 \pm 8.58$	Flare star; binary
$\theta$ Ursa. Maj.	$52 \pm 26$	82328	$74.19 \pm 0.16$	Spectroscopic binary
BB VII 85	$64 \pm 22$	84031	$54.89 \pm 0.92$	Variable star
20 Leon. Min.	$62 \pm 29$	86728	$66.46 \pm 0.32$	High proper-motion star
BB VII 89	$176 \pm 24$	88230	$205.21 \pm 0.34$	Flare star
BB VII 94	$101 \pm 26$	90508	$43.65 \pm 0.43$	High proper-motion star
BB VII 95	$38 \pm 27$	91347	$26.48 \pm 0.59$	High proper-motion star
Lal. 20670	$-6 \pm 28$	92855	$26.84 \pm 0.50$	Star in double system
BB VII 104	$428 \pm 30$	95735	$392.64 \pm 0.67$	Flare star
BB VII 105	$168 \pm 27$	–	$206.27 \pm 1.00$	High proper-motion star
BB VII 110	$30 \pm 27$	101177	$43.01 \pm 0.73$	Spectroscopic binary
BB VII 111	$16 \pm 32$	102158	$20.29 \pm 0.70$	Star in double system
BB VII 112	$139 \pm 26$	103095	$109.99 \pm 0.41$	High proper-motion star
BB VII 114	$-28 \pm 42$	104556	$17.5 \pm 0.51$	High proper-motion star
BB VII 119	$56 \pm 34$	105631	$40.77 \pm 0.66$	High proper-motion star

Figura 2.1: Nella tabella sono confrontati i valori di parallasse derivati da Kapteyn ( $p_{JCK}$ ) con le osservazioni moderne del satellite astrometrico dell’ESA, Hipparcos ( $p_{modern}$ ). I numeri HD sono quelli del Catalogo Henry Draper, dell’Harvard College Observatory, pubblicato tra il 1918 e il 1924. La prima stella è una binaria composta da due stelle di magnitudine approssimativamente uguale e qui Kapteyn si deve essere confuso prendendo solo la stella primaria (la differenza di magnitudine tra le due stelle è molto piccola, solo circa 0,1 magnitudini). Ad eccezione di questo caso, il confronto mostra che in generale le osservazioni di Kapteyn sono estremamente buone, soprattutto considerando la strumentazione che aveva a sua disposizione e le difficoltà nel fare tali misurazioni. (Crediti: *Jacobus Cornelius Kapteyn: Born Investigator of the Heavens*, P.C. van der Kruit)

La distanza di una stella si esprime in parsec, una grandezza introdotta dall’astronomo britannico Herbert Hall Turner (1861-1930), che è la distanza alla quale la parallasse annua è di un secondo d’arco. Un parsec equivale a  $3.1 \times 10^{16}$  m o 3,26 anni luce.

Nel corso del tempo le stelle cambiano posizione l’una rispetto all’altra a causa del loro moto nello spazio, anche noto come moto proprio, studiato per la prima volta da Edmond Halley (1656-1742) nel 1718. Oltre al moto proprio dovuto alla velocità casuale di una stella attraverso lo spazio, esiste anche un modello sistematico di flusso attraverso il cielo come risultato del moto del Sole rispetto a tutte le stelle nelle sue vicinanze: il Sistema di riposo locale. Questo modello consiste in una tendenza siste-

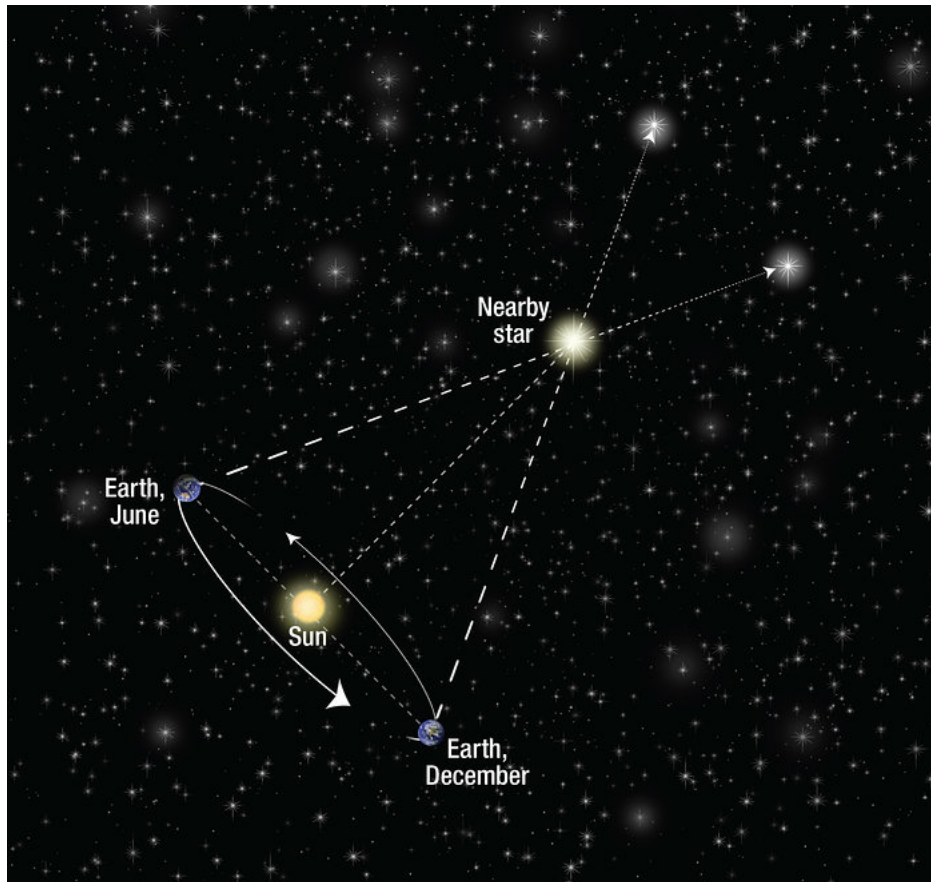


Figura 2.2: Schema parallasse stellare. (Crediti: ESA/Hubble)

matica delle stelle a muoversi lontano dal punto del cielo verso cui è diretto il moto del Sole, ovvero l'Apice solare. Questo punto si trova nella costellazione di Ercole (vedi Fig. 2.3) e la velocità del Sole rispetto al Sistema di riposo locale è di circa 20 km/s. Questo modello di flusso può essere utilizzato per ricavare distanze di gruppi ben definiti di stelle, con la cosiddetta parallasse secolare.

Poiché l'ellisse è sempre allineata lungo l'eclittica, la parallasse è sempre più grande in ascensione retta che in declinazione. Quindi, in linea di principio la parallasse può essere misurata confrontando l'ascensione retta di una stella a sei mesi di distanza. Nella pratica è necessaria una terza misura da effettuare un anno dopo, in modo tale da correggere per il moto proprio. L'ascensione retta si misura cronometrando il passaggio attraverso il meridiano con un cerchio meridiano. Di conseguenza, anche la parallasse è misurabile allo stesso modo, più precisamente confrontando il passaggio della stella attraverso il meridiano con qualche debole stella di confronto.

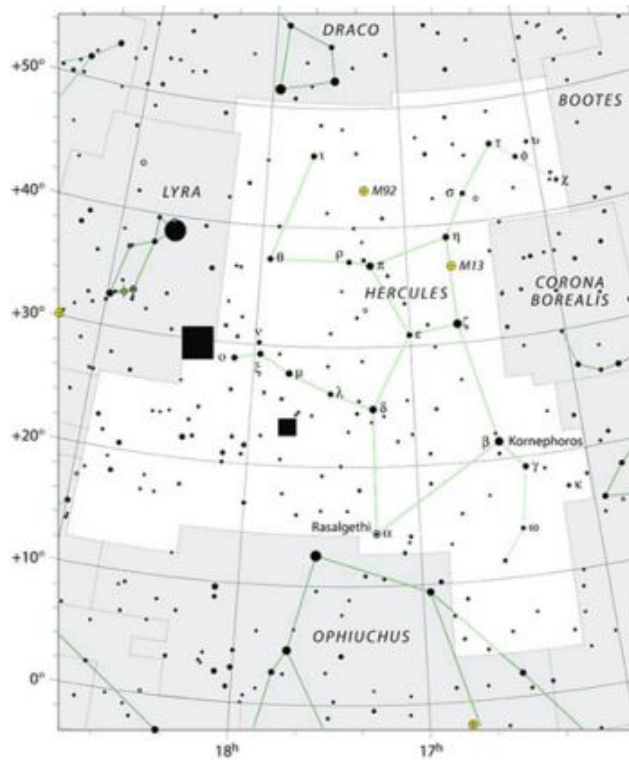


Figura 2.3: L'Apice è la direzione del cielo verso la quale si muove il sole rispetto alle stelle vicine. Si trova nella costellazione di Ercole. Il quadrato nero più grande è la posizione trovata da Kapteyn nel 1901, il quadrato più piccolo è una determinazione più recente basata sui moti propri fatta dal satellite Hipparcos. (Crediti: sito web dell'Unione Astronomica Internazionale)

La misurazione del passaggio di una stella attraverso il meridiano viene eseguita utilizzando un insieme di fili trasversali paralleli ed equidistanziati sul piano focale del cerchio meridiano. Dietro questa trama di fili incrociati, vengono registrati i tempi di passaggio della stella. L'utilizzo di più di un filo trasversale migliora la precisione in maniera significativa.

Poiché ci sono differenze nel modo in cui i diversi osservatori esprimono i tempi, per confrontare dati diversi sono necessarie correzioni per le cosiddette "equazioni personali" dell'osservatore, che sono determinate empiricamente. Ovviamente, la misura più accurata è quella fornita da una stessa persona allo stesso telescopio, preferibilmente a breve distanza dalla successiva.

La registrazione dei dati vera e propria veniva effettuata con uno strumento chiamato *registrir-apparat* ("apparato di registrazione"), ovvero una specie di registratore

a strisce azionato da un motore elettrico, che produceva ogni secondo e in maniera automatica dei buchi su una striscia di carta in movimento. Quello usato da Kapteyn sul cerchio meridiano di Leida è stato descritto da van de Sande Bakhuyzen nell'ambito di un inventario della strumentazione dell'Osservatorio:

*“Con questo piccolo, maneggevole e facilmente trasportabile strumento, viene spostato un nastro di carta da un motore elettrico. La puntina per le osservazioni ha un giunto che gli consente di produrre ancora punti quando la corrente viene interrotta per un po' [...], rendendo possibile alla puntina di seguire la carta per un breve periodo.”*

## 2.3 L'accoglienza del lavoro di Kapteyn

L'articolo sulla determinazione della parallasse utilizzando il metodo dei passaggi attraverso il meridiano attirò certamente l'attenzione. Poco dopo la sua pubblicazione nel 1891, era già stato introdotto nel mondo anglofono in due discussioni letterarie. La prima fu pubblicata sempre nel 1891 nel *The Observatory* da William Edward Plummer (1849–1928), direttore dell'Osservatorio di Liverpool, Inghilterra. Così iniziava l'articolo:

*“Dobbiamo congratularci con il Prof. Kapteyn per il successo dell'inaugurazione di un nuovo metodo per determinare la parallasse stellare relativa, mediante l'impiego di uno strumento per i transiti per l'osservazione delle differenze in Ascensione Retta tra stelle selezionate e stelle vicine di confronto”.*

Verso la fine:

*“Il Prof. Kapteyn ha fornito uno schema con il quale può essere ottenuta la determinazione relativamente rapida di molte parallasse di stelle. Vogliamo esprimere una speranza molto sincera che il processo possa essere testato da qualche astronomo che ha più tempo libero del Prof. Kapteyn, o, meglio ancora, confidiamo che quell'astronomo possa presto trovarsi dotato di strumenti adeguati a consentirgli di svolgere un'indagine alla quale si è già applicato a tali buoni scopi e in circostanze alquanto avverse.”*

L'altra discussione fu pubblicata da Lewis Boss (1846-1912), direttore dell'Osservatorio Dudley a Schenectady, New York, che scrisse anche una recensione favorevole.

Tuttavia, tutto questo sostegno non fu abbastanza per i suoi tentativi di ottenere il proprio osservatorio. Questo è esattamente ciò a cui Henriette si riferiva nella sua biografia:

*“Kapteyn ha sofferto per l'impossibilità di trasformare i suoi piani scientifici in realtà [...] voleva fare qualcosa di molto più grande e sapeva di essere in grado di farlo. Poi, improvvisamente, è arrivata la soluzione e ha dato una direzione completamente nuova alla sua vita”.*

Durante i suoi primi anni a Groninga, Kapteyn condusse una vita tutt'altro che improduttiva per quel che riguardava la ricerca astronomica. In realtà si occupò anche di argomenti non astronomici, per esempio trascorse molto tempo a studiare gli anelli degli alberi e contribuì a lavori in ambito matematico con suo fratello Willem. Entro la fine del 1885 diede avvio a tre diverse indagini che portarono tutte a nuovi approcci. Primo fra tutti, il metodo che progettò per risolvere l'equazione di Keplero, che non riuscì del tutto e passò in gran parte inosservato. Miglior sorte ebbero gli altri due progetti, che riguardavano nuove tecniche per migliorare la determinazione delle posizioni e delle distanze delle stelle, problemi vitali per quello fondamentale che desiderava affrontare, ovvero la distribuzione delle stelle nello spazio e la costruzione del *sistema siderale*. Il primo di questi progetti, sulla determinazione assoluta della latitudine geografica di un osservatorio, portò alla cooperazione tra Kapteyn e David Gill.

# Capitolo 3

## Il Cape Photographic Durchmusterung

### 3.1 Lo sviluppo dell'astronomia in Sudafrica

L'influenza di Kapteyn sull'astronomia in Sudafrica è stata grande ed è durata per la maggior parte del XX secolo, lasciando il segno soprattutto nelle relazioni che continuano ad esistere ancora oggi tra astronomi olandesi e sudafricani.

Si potrebbe supporre che una stretta cooperazione tra l'astronomia sudafricana e olandese si sia sviluppata in modo naturale poiché gran parte della popolazione europea del Sudafrica era, ed è oggi, di origine olandese. Ma questo fatto sembra aver giocato solo un ruolo minore nelle collaborazioni. Per esempio, quella tra Kapteyn e Gill, su cui è incentrata la maggior parte di questo capitolo, ebbe luogo durante le crescenti tensioni tra inglesi e olandesi durante gli eventi che portarono alla guerra anglo-boera del 1899-1902.

Lo sviluppo dell'astronomia fino a tempi abbastanza recenti è stato sempre fortemente legato ai problemi della navigazione. Sebbene si ritenga che i Fenici possano aver circumnavigato l'Africa intorno al 600 a.C., l'era moderna dell'esplorazione iniziò solo alla fine del XV secolo. Bartolomeo Diaz raggiunse il Capo di Buona Speranza, approdando sulla costa sud-orientale dell'attuale Sudafrica nel 1488 e dieci anni dopo Vasco de Gama scoprì la rotta verso l'India passando per il Capo. Questi viaggi furono resi possibili dai miglioramenti nell'astronavigazione solitamente associati al principe Enrico il Navigatore e ai suoi successori.

Il graduale sviluppo delle rotte commerciali portò nel 1652 alla creazione del primo insediamento europeo in Sudafrica in quella che oggi è Città del Capo. Jan van



Riebeeck fondò questo insediamento per conto della Compagnia Olandese delle Indie Orientali che ne aveva bisogno principalmente come stazione di ristoro per le loro navi sulla strada per le Indie Orientali Olandesi. Alla luce di quest'ultimo fatto è alquanto sorprendente che la Compagnia non sembri essersi interessata fortemente all'astronomia, in particolare per quanto riguarda la determinazione della longitudine e la classificazione delle stelle australi. Le stesse autorità del Capo sembravano essere ben consapevoli di questa necessità, poiché accolsero il gesuita padre Guy Tachard sulla sua strada per il Siam nel 1685 e al suo ritorno nel 1687, nonostante al Capo fosse molto diffusa l'avversione nei confronti della chiesa cattolica romana. Padre Tachard avrebbe dovuto determinare la longitudine, cosa che fece in modo piuttosto impreciso. La misura fu effettuata da un altro uomo di chiesa francese, l'abate Nicolas-Louis de Lacaille, che dal 1751 al 1753 svolse il primo lavoro astronomico sistematico in Sudafrica: oltre a determinare la posizione geografica del Capo, catalogò con cura le stelle e le costellazioni.



Figura 3.1: *Le fort des Hollandais au Cap de Bonne Esperance.* (*Voyage De Siam*, Père Tachard, 1689)

Il Capo passò in mano britannica alla fine delle guerre napoleoniche e nel 1820 l'Ammiragliato britannico decise di istituire l'Osservatorio Reale al Capo di Buona Speranza, come il corrispettivo di Greenwich nell'emisfero sud. Come per Greenwich, il suo scopo fu fin dall'inizio fortemente legato alle esigenze della navigazione: catalogare le posizioni e le luminosità delle stelle e dei pianeti, regolare i cronometri delle navi e fornire un tempo preciso.



Figura 3.2: L'edificio principale dell'Osservatorio Reale del Capo di Buona Speranza. (Crediti: sito web dell'Osservatorio Reale di Greenwich)

David Gill fu nominato direttore e astronomo di Sua Maestà presso l'Osservatorio Astronomico Reale del Capo di Buona Speranza nel 1879. Gill era già una figura di spicco nell'astronomia avendo recentemente derivato un valore per l'unità astronomica (la distanza fra la Terra e il Sole) che rimase il valore definitivo per molti anni. Dedusse questo valore dalle osservazioni dell'avvicinamento ravvicinato di Marte effettuate dall'isola di Ascensione nel 1877. Al Capo iniziò rapidamente a rivitalizzare l'osservatorio e ad avviare una serie di nuovi progetti.

## 3.2 La fotografia astronomica nel XIX secolo

Un'altro aspetto importante riguarda i progressi nella tecnologia nel XIX secolo.

Nel contesto delle proposizioni che accompagnavano la tesi di dottorato di Kapteyn, era noto come i fotometri, sebbene implicassero l'uso di fiamme e fossero indubbiamente scomodi e ingombranti da usare, fornivano magnitudini stellari più precise, migliorando notevolmente le stime visuali più vecchie. In origine, infatti, le magnitudini stellari venivano stimate visivamente attraverso un confronto di due stelle al telescopio.<sup>1</sup>

Nella decima proposizione della sua tesi di dottorato, Kapteyn affermava che il miglior fotometro era quello di Zöllner, che faceva uso di una tecnica suggerita da François Jean Dominique Arago (1796–1853) che sfruttava la polarizzazione della luce, scoperta insieme a Augustin-Jean Fresnel (1788–1827). Il fotometro di Zöllner utilizzava una fiamma controllabile (su un becco di Bunsen, in maniera tale che fosse stabile) e dei diaframmi per produrre un'immagine stellare artificiale sul campo visivo. Utilizzando un elemento polarizzatore fisso e uno rotante, la luminosità apparente della stella artificiale poteva quindi essere regolata fino a quando non era la stessa di quella della stella "reale". La quantità di rotazione del polarizzatore determinava la magnitudine delle stelle in modo abbastanza accurato.

Ulteriori passi in avanti si ebbero con macchine come il "registrier-apparat".

Eppure, la grande rivoluzione di quel periodo fu senza dubbio la lastra fotografica, che dominò nelle osservazioni astronomiche per circa un secolo, fino a circa il 1980 quando venne sostituita da dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD) e altre tecniche per il conteggio dei fotoni.

Immagini del cielo stellato non furono possibili fino a quando non furono realizzate le lastre "secche", che divennero comuni quando iniziarono a essere prodotte in serie con George Eastman (1854-1932), fondatore della Eastman-Kodak Company, e che sarebbero diventate fondamentali per la fotografia astronomica. In pochissimo tempo, divenne possibile ottenere immagini di pianeti come Giove e Saturno, così come un'immagine ottenuta nel 1880 da un medico, astronomo dilettante e pioniere dell'astrofotografia Henry Draper (1837-1882) della Nebulosa di Orione.

Per quanto riguarda l'argomento di questa tesi, lo sviluppo più importante avvenne nei primi anni 1880 con le immagini della cometa del 1882.

---

<sup>1</sup>Per esempio, Sir John Frederick William Herschel (1792–1871), figlio di Sir William Herschel (1738-1822), utilizzava uno strumento chiamato "astrometro" con cui confrontava una particolare stella con un'immagine ridotta della Luna, riflessa da un prisma e focalizzata con una lente sul campo di vista. Carl August von Steinheil (1801–1870), da Monaco, aveva sviluppato uno strumento per confrontare due immagini stellari sfocate e stimare i rapporti di brillantezza, regolando uno dei semi-obiettivi del telescopio finché le immagini non avessero entrambe la stessa brillantezza superficiale.

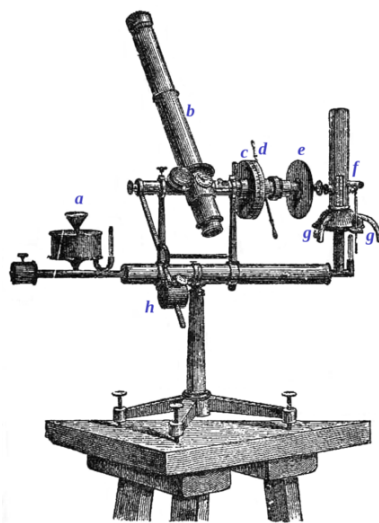


Figura 3.3: Nel fotometro Zöllner, la luce di una fiamma (nel tubo a destra) viene focalizzata sul campo del telescopio attraverso un diaframma. Tra la fiamma e il telescopio veniva utilizzato un polarizzatore rotante per diminuire la luminosità della stella artificiale risultante. La struttura a sinistra fungeva da contrappeso (Crediti: Efron Encyclopedic Dictionary)

### 3.3 L'origine del CPD

Secondo la biografia di Henrietta, un articolo che Kapteyn lesse durante le sue vacanze cambiò il corso della sua vita professionale e determinò il suo ingresso in una carriera di “cartografi dell’universo” nella tradizione di William Herschel e Wilhelm Struve (1793-1864). L’articolo, scritto da David Gill, descriveva un nuovo progetto per fotografare il cielo australe con l’obiettivo di produrre un catalogo che integrasse i cataloghi esistenti del cielo settentrionale. Gill aveva notato che l’immenso volume di dati che il progetto stava generando fosse molto più di quello che era in grado di gestire da solo, e che l’analisi dei dati avrebbe richiesto anni di lavoro. Il progetto, che divenne noto come *Cape Photographic Durchmusterung*<sup>2</sup> o *Cape sky survey*, aveva lo scopo di integrare il *Bonner Durchmusterung* o *Bonn sky survey*, il catalogo stellare più completo ad oggi, contenente la posizione e la luminosità di 324.000 stelle dell’emisfero settentrionale.

La missione autoimposta di Gill era quella di sfruttare i recenti progressi nella fotografia. Infatti, mentre Friedrich Argelander, compilatore dell’indagine di Bonn, aveva misurato le posizioni delle stelle con un micrometro e ne aveva stimato le magnitudini ad occhio, Gill voleva misurare le posizioni e le magnitudini in modo più oggettivo e coerente su lastre fotografiche. La parte difficile sarebbe stata soprattutto misurare le

<sup>2</sup>*Durchmusterung* è un termine tedesco che significa “indagine”. In italiano quindi il progetto si traduce come “Indagine fotografica del Capo”.

lastre, cioè estrarre le coordinate e le magnitudini delle stelle dalle fotografie, e in secondo luogo applicare le correzioni necessarie a questi dati prima di includerli nel catalogo.

Gill tenne nel 1887 una conferenza alla Royal Society di Londra sulle applicazioni della fotografia in astronomia, in cui raccontò che il primo assistente dell'osservatorio del Capo, il signor W.H. Finlay aveva scoperto una cometa la mattina dell'8 settembre 1882. Essa era stata tuttavia già osservata da diversi osservatori dilettanti, che avevano ottenuto delle immagini che non avevano alcun valore scientifico per lo studio della cometa perché non erano state prese in maniera adeguata. Così Gill si fece aiutare da un fotografo locale, il signor Allis, che utilizzò un obiettivo montato su una normale macchina fotografica, quindi uno strumento con una piccola potenza ottica, e ottenne sei fotografie diverse che mostravano la presenza di numerose stelle sullo sfondo. Gill si rese subito conto della necessità di impiegare mezzi simili, se non più potenti per la costruzione di mappe stellari, su qualsiasi scala e ordine di grandezza richiesto. Un



Figura 3.4: La grande cometa del 1882, fotografata da David Gill. (Crediti: sito web del South African Astronomical Observatory)

breve documento che esprimeva queste considerazioni, e accompagnato da copie cartacee delle sei fotografie, venne inoltrato all'ammiraglio Ernest Mouchez<sup>3</sup>, e da questi comunicato all'Accademia delle Scienze di Parigi il 26 dicembre 1882.

Nel documento, l'ammiraglio Mouchez condivideva l'opinione che queste fotografie indicassero la possibilità di produrre eccellenti carte stellari per mezzo della fotografia, e in seguito rivelò che queste immagini lo portarono a incoraggiare i fratelli Henry<sup>4</sup> a concentrare i loro sforzi nella costruzione di obiettivi per l'astrofotografia e nell'applicazione della fotografia al lavoro astronomico in generale. I mezzi fotografici potevano quindi rendere possibile l'estensione del *Durchmusterung* in modo efficiente e preciso al polo sud celeste.

### 3.3.1 La collaborazione con David Gill

Gill riuscì a ottenere un finanziamento di 300 sterline per il suo progetto dal fondo governativo della Royal Society, ma era conscio delle difficoltà che avrebbe incontrato nel convogliare quella enorme mole di dati osservativi in un prodotto finito, che sarebbe stato il CPD. Kapteyn vide un'opportunità e tra il 16 e il 23 dicembre 1885 scrisse due lettere a Gill offrendo il suo aiuto. Non si faceva illusioni sulla natura dell'opera, sapeva che determinare le posizioni delle stelle e altre informazioni dalle lastre fotografiche sarebbe stato un lavoro noioso e ripetitivo, e si aspettava che sarebbe durato sei o sette anni. Tuttavia, i dati risultanti avrebbero sicuramente prodotto informazioni preziose sull'architettura dell'universo, una questione di grande importanza per Kapteyn.

Fin dall'inizio della sua carriera universitaria, Kapteyn aveva immaginato di studiare il sistema stellare “da zero” accumulando grandi quantità di dati e cercando di dedurre da essi la distribuzione e i moti delle stelle. Nelle lettere a Gill, Kapteyn affermava che se avesse potuto aiutarlo nel lavoro legato alla trasformazione di quanto raccolto nelle fotografie in dati di interesse astronomico, avrebbe potuto contribuire in modo molto efficace al successo di un'impresa “enorme ed eminentemente utile”.

*“Se mi confiderai uno o due negativi, ci proverò, e se il risultato sarà come mi aspetto, dedicherò con piacere degli anni della mia vita a questo lavoro, che potrebbe*

---

<sup>3</sup>L'ammiraglio Ernest Amédée Barthélemy Mouchez (1821–1895) era un ufficiale di marina che nel 1878 divenne direttore dell'Osservatorio di Parigi (Observatoire de Paris).

<sup>4</sup>I “fratelli Henry” sono Paul-Pierre (1848-1905) e Mathieu-Prosper Henry (1849-1903), solitamente indicati come Paul e Prosper Henry. Erano ottici e astronomi francesi, costruttori di telescopi molto esperti che contribuirono con i loro successi nel campo dell'astrofotografia nelle fasi iniziali del progetto Carte du Ciel.

*alleggerirti un po', come spero, e con cui potrei guadagnar mi l'onore di associare il mio nome a una delle più grandi imprese del nostro tempo"*  
(Lettera di Kapteyn a Gill, 16 dicembre 1885).

Gill rispose con calore ed entusiasmo:

*"Non è facile dirvi cosa provo nel ricevere una proposta del genere. Riconosco in essa la vera fratellanza della scienza e in te un vero fratello"*  
(Lettera di Gill a Kapteyn, 9 gennaio 1886).

Le condizioni di Kapteyn erano due: la prima era che il governo raddoppiasse il suo sussidio annuale con una cifra almeno superiore a 40£ concessa per l'acquisto di libri e piccoli strumenti astronomici, la seconda era la richiesta di un altro sussidio annuale di 80£ dalla Society of Teyler, una società molto ricca, solitamente disposta a concedere un po' di denaro per attività scientifiche. Kapteyn, tuttavia, non ricevette mai denaro da tale società, ma piuttosto da altre due fondazioni private, rispettivamente di Rotterdam e Utrecht<sup>5</sup>. Con queste somme, Kapteyn si garantì l'aiuto di tre persone per svolgere la parte più meccanica del lavoro, mentre lui stesso avrebbe eseguito tutte le misurazioni, il calcolo delle tabelle di riduzione, il confronto dei cataloghi, ecc. E così, a partire dal 1886 e fino al 1892, Gill spedì negativi a Groninga.

Kapteyn aveva bisogno inoltre di trovare un assistente, perché il carico di lavoro sarebbe stato proibitivo per una sola persona. I fondi che ricevette dal governo gli avrebbero permesso di assumere un solo assistente. Come scrisse Henrietta nella sua biografia, "gli uomini intelligenti e di talento che volevano lavorare sodo per pochi soldi erano difficili da trovare". Kapteyn si rivolse al direttore di una scuola professionale (*ambachtschool*) di Groninga, che raccomandò uno studente di 19 anni, Teunis Willem De Vries. Il giovane de Vries arrivò come apprendista temporaneo e si rivelò molto "talentuoso" soprattutto quando si trattava di eseguire misurazioni estremamente accurate ed era considerato un osservatore superbo; eseguiva i calcoli con tale accuratezza e diligenza da rendersi indispensabile per questo tipo di compito. De Vries iniziò a lavorare per Kapteyn nel 1888, e il suo contributo fu molto importante nel completamento del CPD e per il Laboratorio Astronomico in generale.

Quando Kapteyn e De Vries finirono di misurare le lastre fotografiche, la comunità astronomica internazionale iniziò a riconoscere l'abilità e la diligenza di Kapteyn. Non

---

<sup>5</sup>Come scrive Kapteyn nei ringraziamenti della pubblicazione del CPD, i nomi delle due società erano: il *Bataafsch Genootschap der Proefondervindelyke wijsbegeerte te Rotterdam* e il *Provinciaal Utrechtsch Genootschap van Kunsten en Wetenschappen*, che possono essere tradotti in italiano come "Società Bataviana per la filosofia sperimentale di Rotterdam" e "Società provinciale delle arti e delle scienze di Utrecht".

erano ancora emersi nuovi modelli completi per la distribuzione delle stelle, ma la compilazione dei dati stessi fu considerata estremamente preziosa. Il governo francese gli conferì la “Legion d’honneur”, e la Royal Astronomical Society in Inghilterra lo elesse “Foreign Member”. Questi riconoscimenti sollevarono il suo spirito e contribuirono ad alleggerire i suoi sforzi per raccogliere fondi e attrezzature a Groninga, ma non alleviarono il carico fisico e intellettuale del lavoro d’indagine del Capo. Kapteyn si logorò e sviluppò un affaticamento degli occhi che lo avrebbe infastidito per il resto della sua vita, ma presto trovò un po’ di tregua dai calcoli estenuanti partecipando a riunioni internazionali. Grazie a questi incontri intravide quella che sarebbe stata la direzione della futura ricerca astronomica e capì quale avrebbe potuto essere il suo ruolo in essa una volta completato il lavoro d’indagine del Capo.

### 3.4 Il progetto Carte du Ciel

Il CPD incontrò alcune difficoltà fondamentali che parvero minacciare l’intero progetto. La ragione fu l’avvio di un altro grande progetto internazionale a cui sia Kapteyn che Gill parteciparono, che quasi fermò il CPD laddove era appena iniziato.

Si è già accennato alla corrispondenza nel 1882 tra Gill e l’ammiraglio Mouchez, direttore dell’Osservatorio di Parigi, sulla questione legata all’importanza dell’utilizzo delle lastre fotografiche in astronomia per la catalogazione delle stelle. Il lavoro, tuttavia, era troppo esteso per essere intrapreso in un singolo osservatorio, o anche da un singolo paese, e venne concordato in maniera unanime che la cooperazione internazionale fosse essenziale per la sua esecuzione in un lasso di tempo sufficientemente breve. Senza entrare nei dettagli della consultazione preliminare o delle corrispondenze, alla fine Mouchez organizzò una conferenza all’Osservatorio di Parigi, il *Congrès Astrophotographique International*, che si aprì il 16 aprile 1887. Furono invitati astronomi da tutto il mondo e ne presero parte in tutto 55. Durante tale congresso venne proposto uno schema per fotografare sia l’emisfero settentrionale del cielo che quello meridionale. Questa indagine, che divenne nota come “Carte du Ciel”, aveva due obiettivi.

Il primo riguardava il cosiddetto “catalogo astrografico”, che avrebbe fornito le posizioni e le magnitudini di tutte le stelle fino all’undicesima magnitudine. Per fare questo, bisognava determinare le posizioni di un insieme di stelle di riferimento usando cerchi meridiani. Con un notevole ritardo, questo lavoro fu finalmente completato nel 1961 (le circa 22.000 lastre furono acquisite tra il 1891 e il 1950).

Il secondo era la Carte du Ciel vera e propria, e prevedeva la produzione di im-



magini fotografiche di tutto il cielo, prodotte sottoforma di lastre per fotoincisione<sup>6</sup>. Tuttavia, questa parte del progetto si rivelò proibitiva e non venne mai completata. Venne poi sostituita dalla Palomar Observatory Sky Survey degli anni 1950 e le sue successive estensioni meridionali, che sono state prodotte rapidamente e distribuite su copie cartacee senza molto ritardo. Questo rese immediatamente la Carte du Ciel propriamente detta non necessaria e obsoleta.

L'osservatorio convocò una serie di riunioni annuali per discutere il progetto e per ripartire il lavoro tra gli osservatori partecipanti. Nella prima di queste riunioni, Kapteyn propose alcune idee: voleva sfruttare l'approccio sperimentale dell'indagine per misurare un gran numero di parallassi stellari contemporaneamente. Alla fine nessuna delle sue idee venne adottata, ma continuò nello studio del "problema siderale" della distribuzione delle stelle nello spazio tridimensionale. Riuscì infatti a convincere il direttore dell'Osservatorio Helsingfors in Finlandia a realizzare una versione limitata dello schema, e nel 1900 arrivò ad aggiungere circa 250 stelle alla breve lista di quelle le cui parallassi erano già state determinate.

Sebbene il suo piano per la misura della parallasse non venne adottato, Kapteyn sostenne con tutto il cuore il progetto Carte du Ciel. Lui e Gill parteciparono alle riunioni e svolsero un ruolo attivo nella pianificazione e nell'esecuzione del progetto. Come l'indagine del Capo, la Carte du Ciel richiese molto più tempo per essere completata di quanto gli organizzatori avessero previsto. Tuttavia, Kapteyn rimase impressionato dalle possibilità che aveva visto in questi incontri per quanto riguardava la cooperazione internazionale. Nel progetto originale, diciotto osservatori si assumevano il compito di fotografare una zona di cielo. Dieci degli osservatori erano in Europa (Greenwich, osservatorio vaticano, San Fernando in Spagna, Catania, Helsingfors, Potsdam, Oxford, Parigi, Bordeaux e Tolosa), uno in Nord Africa (Algeri), uno in America Centrale (Tacubaya, Messico), tre in Sud America (Santiago, Rio de Janeiro e La Plata in Argentina), uno in Africa meridionale (il Capo di Buona Speranza), e due in Australia (Sydney e Melbourne).

Verso la fine del XIX secolo, il progetto Carte du Ciel si avvicinò molto a quello che poteva essere definibile come uno sforzo mondiale.

### 3.4.1 Esecuzione della Carte du Ciel

Il progetto Carte du Ciel come impresa internazionale ebbe i suoi successi e fallimenti. Riuscì ad arruolare osservatori in tutto il mondo per fare serie coordinate di osserva-

---

<sup>6</sup>Immagini incise su lastre di rame.

zioni.<sup>7</sup>

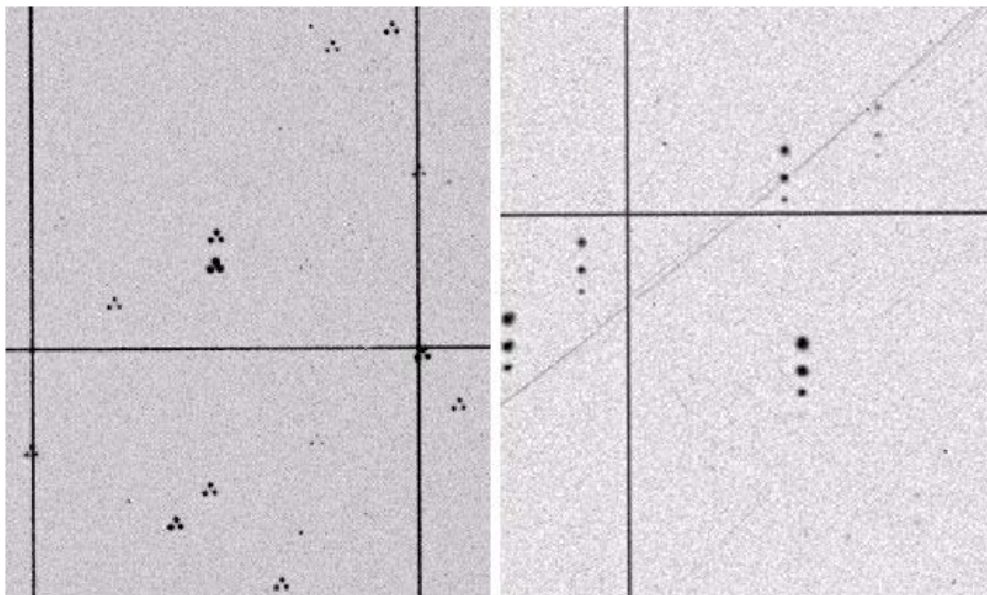


Figura 3.5: Immagine che ritrae il metodo di osservazione. Tutte le lastre possedevano delle “reti” impresse fotograficamente su di esse, costituite da una matrice quadrata di linee sottili; queste verificavano le distorsioni nell’emulsione fotografica, ma successivamente furono usate per misurare le posizioni delle stelle su essa. Questo costituì un vantaggio, poiché la misurazione delle posizioni sulle lastre avrebbe richiesto microscopi montati su viti molto costose e anche soggette a usura nel corso del progetto, con relative imprecisioni. (Orellana et al., 2010)

Il Catalogo Astrografico non fu mai un successo anche se fu completato. Fino a poco tempo fa era quasi completamente ignorato e inutilizzato. Le magnitudini erano molto imprecise e persino prive di coerenza tra le diverse zone, ma un’altra ragione importante era che oltre ad aver subito grandi ritardi, le pubblicazioni disponibili alla fine contenevano solo le coordinate rettangolari sulle lastre in quasi tutti i casi, e sebbene fossero fornite anche costanti di lastra, derivare ascensioni rette e declinazioni da quelle era un lavoro poco agevole.

In tempi più recenti, il Catalogo è diventato una miniera d’oro. Dopo che sono state rese accessibili ai computer, le posizioni delle stelle ricavate con il Catalogo Astrografico sono state combinate con i risultati del satellite astrometrico Hipparcos dell’Agenzia

---

<sup>7</sup>Non furono coinvolti, tuttavia, osservatori americani nel progetto, anche se ci furono contatti con il direttore dell’Osservatorio di Harvard, Edward Pickering.

Spaziale Europea (ESA), offrendo una base temporale dell'ordine di un secolo per la determinazione di posizioni e di moti propri accurati.

Kapteyn scrisse un articolo teorico sulle correzioni per la rifrazione e l'aberrazione da applicare alle immagini acquisite su lastre fotografiche e poi non contribuì più allo sforzo per la Carte du Ciel, probabilmente perché non era riuscito a far accettare nessuna delle sue idee e forse anche perché il CPD avrebbe potuto prendere troppo del suo tempo.

### 3.5 Esecuzione del CPD

Il telescopio utilizzato per il CPD è mostrato in Fig. 3.6. La montatura era quella di un vecchio telescopio del Capo, non più in uso. La struttura principale consisteva in una scatola di legno di circa  $30 \times 30$  cm con una struttura nella parte superiore contenente una delle lenti di Dallmeyer (lente rapida rettilinea) con un diametro di circa 15 cm e una lunghezza focale di circa 137 cm. La messa a fuoco poteva essere fatta spostando il tubicino rispetto alla scatola di legno e poteva essere letta dal quadrante sul lato, indicato dalla lettera 'S'. Un telescopio guida di circa 9 cm, che originariamente apparteneva a un altro telescopio non più utilizzato, era collegato al tutto. La luce della lampada 'L' illuminava il piano focale del telescopio dopo essere stata riflessa da un piccolo specchio ellittico. Su questo piano il telescopio non impiegava il solito set di fili incrociati per guidare una stella sul campo visivo, ma un pezzo di molla di un orologio con un piccolo foro su una delle due estremità. La stella veniva vista attraverso un vetro rosso collocato dentro questo foro. Nel corso delle prove per il metodo, fu richiesto un altro obiettivo Dallmeyer, anch'esso con un diametro di circa 15 cm ma con una lunghezza focale di circa 175 cm, che venne montato su un altro telescopio. Questo obiettivo, tuttavia, si rivelò di qualità inferiore al primo e sebbene Dallmeyer intraprese alcune rifiniture, fu presa la decisione di tornare alla vecchia lente, che venne rilucidata e successivamente usata per ottenere tutte le lastre del CPD.

Il campo di vista del telescopio e la dimensione delle lastre fotografiche (aventi lato di circa 14 cm) era di circa  $6^\circ$  (un millimetro corrispondeva a circa 2,5 minuti d'arco). Ogni campo veniva fotografato almeno due volte, in modo da poter identificare i difetti delle lastre che potevano essere scambiati per stelle.

La prima esposizione per il CPD definitivo avvenne il 15 aprile 1885 e, ad eccezione di alcune aree che Kapteyn chiese di riprendere, la raccolta delle lastre fotografiche terminò nel dicembre del 1888. Le declinazioni coperte furono da  $-18^\circ$  fino al polo sud ovvero a  $-90^\circ$ . Il numero totale di lastre prese per il CPD ed effettivamente misurate da Kapteyn fu di 613. Esiste tuttavia un elenco di circa 1100 lastre scartate e di altre

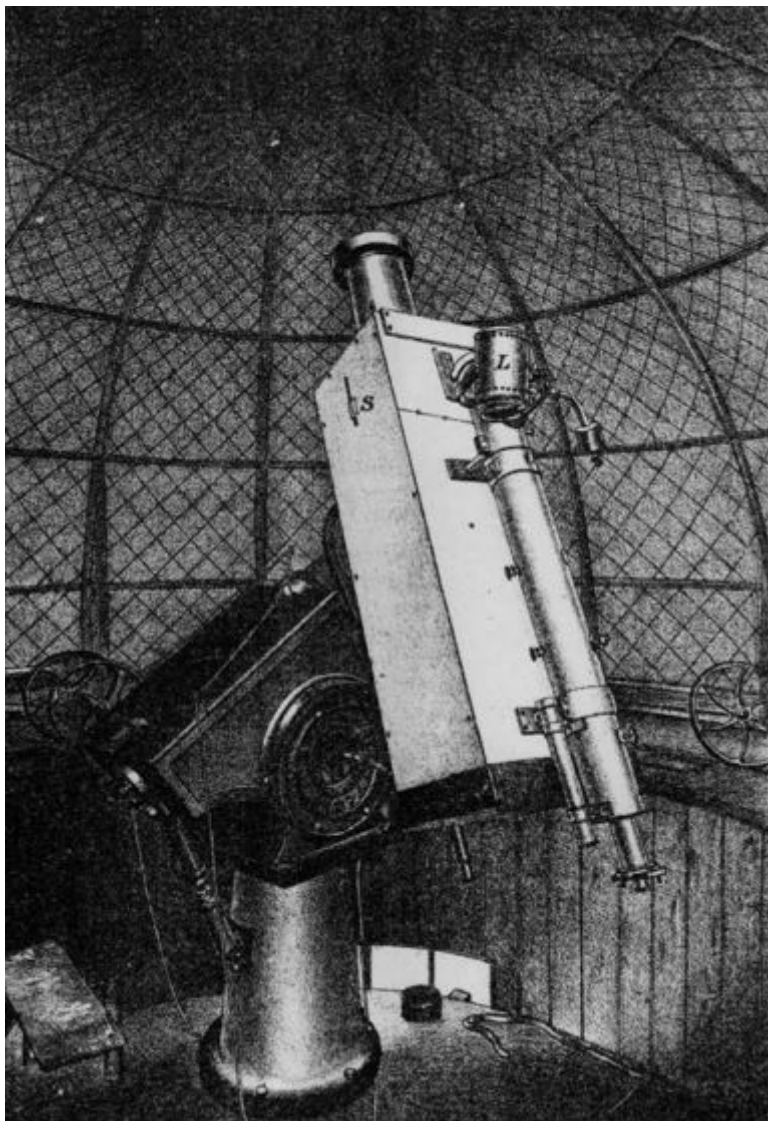


Figura 3.6: Il telescopio all'Osservatorio del Capo utilizzato per ottenere le lastre per il CPD.  
(Kapteyn Astronomical Institute)

100 circa che sono state utilizzate per la calibrazione o per la selezione di stelle di confronto o per misurare la parallasse delle stelle più luminose. Queste lastre furono a loro volta utili ai ricercatori di stelle variabili.

## 3.6 Il metodo parallattico

Kapteyn aveva anche bisogno di uno strumento per misurare le lastre.

Il modo più semplice per fare misurazioni era quello di localizzare ogni stella sulla lastra e registrare la sua posizione su una griglia rettilinea o in un sistema di coordinate cartesiane  $x$  e  $y$ , rispetto ad un punto di riferimento sulla lastra come il centro o uno degli angoli. Si potevano usare stelle di posizioni note per fissare una griglia di ascensione retta e declinazione sulla lastra. Tuttavia, la conversione della griglia rettilinea in una di coordinate sferiche celesti era piuttosto complicata e richiedeva molta aritmetica.

Kapteyn evitò tutto questo utilizzando quello che chiamò il principio della “misurazione parallattica”, la cui idea – come scrisse nella sua Introduzione della parte I del CPD – “*mi venne in mente molto presto dopo che le prime tavole furono poste nelle mie mani dal Dr. Gill*”. Notò che guardando la lastra da una distanza uguale a quella tra la stessa e la lente primaria del telescopio, si potevano ricavare esattamente le posizioni relative delle stelle nel cielo. Quindi, usando un apparecchio che funziona come un telescopio, puntandolo verso una stella sulla lastra e registrandone l’orientamento, la misurazione della posizione di una stella è la stessa che nel caso di un telescopio puntato verso il cielo: l’ascensione retta e la declinazione potevano quindi essere lette direttamente dall’orientamento del telescopio rispetto ai suoi due assi. Ciò costituiva un enorme risparmio di tempo e fatica. Il prezzo da pagare era una perdita di precisione nella misurazione delle posizioni poiché fare misurazioni micrometriche era un metodo senza dubbio più accurato, ma ai fini di un catalogo questo era accettabile.

Come il pensiero di Kapteyn si sia effettivamente sviluppato verso il metodo parallattico può essere dedotto dalla sua corrispondenza con Gill. Nella sua lettera del 15 maggio 1885, Gill chiese a Kapteyn di pensare a come misurare le lastre<sup>8</sup>, se usando due coordinate rettangolari (per esempio  $x$  e  $y$ ) o coordinate polari. Kapteyn rispose ampiamente nella sua famosa lettera del 16 dicembre 1885:

*“Queste considerazioni mi hanno portato al seguente piano, [...] Il negativo viene montato su un telaio, che, per mezzo di viti di correzione, viene leggermente rialzato o abbassato oltre che ruotato attorno ad un asse verticale alla lastra. Di fronte alla*

---

<sup>8</sup>Occorre sottolineare che la misura delle posizioni delle stelle su lastre fotografiche non era una procedura sperimentata, essendo questa la prima volta in cui veniva svolta un’indagine fotografica del cielo.

*lastra, diciamo a circa uno o due millimetri di distanza c'è una lastra di vetro rigata da montare. [...] La lettura delle lastre può ora essere effettuata molto comodamente per mezzo di un telescopio posto a una certa distanza (diciamo 15 o 20 metri)."*

Lo strumento, che attualmente si trova nel Museo dell'Università di Groninga, è mostrato nella Fig. 3.7. Per utilizzarlo, l'osservatore guarda attraverso l'oculare a destra (indicato con 'J') e punta l'obiettivo 'H' su una lastra fotografica. La distanza tra il punto centrale dello strumento e la lastra deve essere uguale alla lunghezza focale del telescopio che è stato utilizzato per ottenere la lastra fotografica (in questo caso 137 cm). Ruotando l'asse verticale 'B', che funge da asse di declinazione, si può puntare l'obiettivo su una stella di interesse, per poi leggere la posizione della stella sulla piccola ruota orizzontale 'D'. Allo stesso modo, l'asse 'A' e la ruota 'C' possono essere utilizzati per determinare l'ascensione retta. La parte 'L' che sporge verticalmente nel mezzo è un piccolo telescopio con cui si poteva posizionare correttamente lo strumento rispetto alla lastra fotografica tramite la lettura di una scala in lontananza. È evidente che la lastra e lo strumento dovevano essere posizionati con attenzione, e una volta fatto ciò, le ascensioni rette (relative) e le declinazioni potevano essere misurate in maniera diretta.

Il metodo di Kapteyn per le misurazioni consisteva nel montare due lastre nel supporto apposito (vedi Fig. 3.7); erano lastre della stessa area di cielo e la più "fonda" delle due era collocata sotto la prima, in modo che questa fosse vista attraverso l'emulsione della prima. Le lastre erano separate da una piccola distanza dell'ordine di un millimetro. Il supporto per le lastre era stato infatti progettato in modo tale che fossero spostate l'una rispetto all'altra di una piccola quantità (in modo che le immagini delle stelle più luminose apparissero separate di poco). In questo modo non era difficile distinguere le stelle da altri oggetti in movimento, come asteroidi, o da difetti della lastra stessa.

Le misurazioni venivano poi eseguite da tre persone in sequenza; un osservatore puntava l'obiettivo su una stella, ne stimava il diametro e leggeva la declinazione; un secondo osservatore leggeva l'ascensione retta usando un piccolo microscopio; un terzo osservatore annotava i risultati che erano stati messi in evidenza dagli altri due. Si trattava di un lavoro lungo e noioso che doveva essere eseguito in una stanza buia.

Tutte le lastre venivano misurate almeno due volte e l'ordine di misura avveniva per zone di declinazione. La prima lastra misurata fu quella centrata verso il polo sud celeste ( $\delta = -90^\circ$ ), ottenuta il 28 ottobre 1886. Kapteyn prese parte a queste misurazioni (anche se in seguito le lasciò ai suoi assistenti), le quali si conclusero l'11 giugno 1892; si rivelarono tuttavia necessarie varie sessioni più brevi di misurazioni

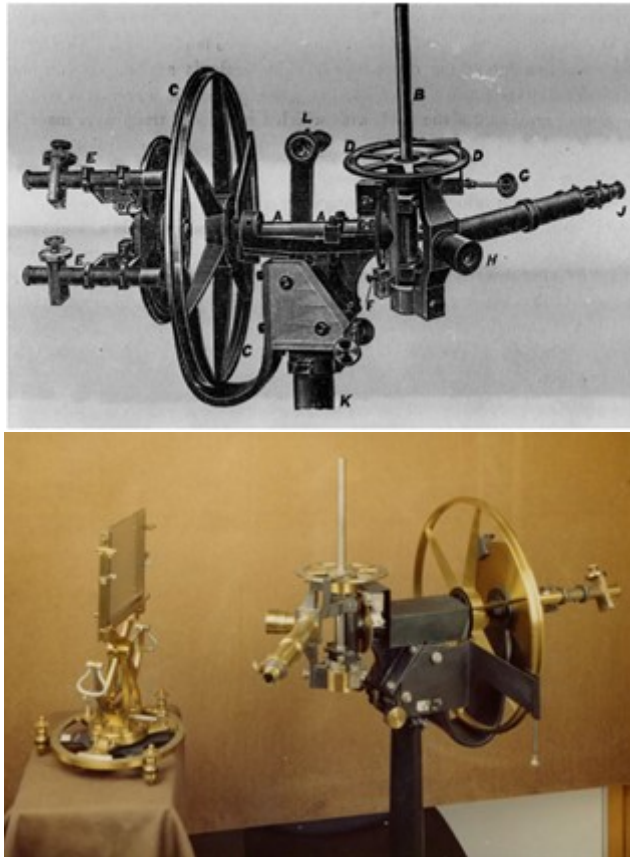


Figura 3.7: Lo strumento parallattico e il posizionamento del supporto per le lastre. La distanza non è di 137 cm ovvero la distanza richiesta per il metodo di misurazione. (Museo universitario di Groninga)

ripetute che ebbero luogo negli anni successivi. Henriette Hertzsprung-Kapteyn cita una lettera di Kapteyn a Gill nel giugno del 1892:

*“Finito! – Il lavoro di misurazione delle lastre è fatto, finito finalmente. Il lavoro è stato per me fonte di cose buone senza fine, ma comunque l’aver finalmente terminato è una delle migliori [...] il numero di osservazioni che abbiamo ricevuto deve essere superiore a un milione – e la verità è che trovo la mia pazienza quasi esaurita”.*

La risposta di Gill fu una breve nota, che arrivò a Kapteyn per posta:

*“Questo è solo un grido di giubilo – un evviva – un Dio ti benedica, ragazzo mio, – e possa tu continuare a prosperare a lungo!”*

### 3.7 La Stella di Kapteyn

In un articolo del 1890, Kapteyn concentrò l’attenzione del mondo astronomico sulla scoperta di alcune stelle variabili avvenuta nel corso del lavoro di misura delle lastre. Poiché ci sarebbero voluti anni prima che il lavoro fosse completato, indicò nove stelle che presentavano variabilità a beneficio di altri astronomi, e alcuni anni dopo, nel 1896, ne indicò altre otto.

In un articolo del 1893, Kapteyn reagì alla scoperta di una “nuova stella” nella costellazione del Regolo. La stella era stata scoperta dall’astronoma Williamina Paton Stevens Fleming (1857-1911) il 26 ottobre dello stesso anno, e riportata da lei e Edward Charles Pickering (1846-1919), direttore dell’Osservatorio di Harvard. La stella raggiungeva circa la settima magnitudine. A quei tempi, nessuno aveva idea di cosa fossero queste “nuove stelle” o “novae”, quindi era importante sapere come appariva la stella progenitrice. Così Kapteyn esaminò immediatamente le lastre CPD: su tre lastre prese nel 1887 la stella non era visibile, ma appariva circa di nona magnitudine in due lastre ad aprile e maggio del 1890: nel 1887 dunque doveva essere più debole. Questo dimostrò la grande utilità delle lastre CPD per indagare i fenomeni celesti dipendenti dal tempo.

Un’altra occasione che destò particolare attenzione fu la scoperta di una stella nel 1897 che venne poi conosciuta come la Stella di Kapteyn; il documento di scoperta, intitolato *Stern mit grösster bislang bekannter Eigenbewegung* (“Stella con il più grande moto proprio attualmente conosciuto”), conteneva solo cinque righe di testo e una tabella che riportava cinque misurazioni di posizione.

Il più antico riferimento ad essa con il nome di “Stella di Kapteyn” è di Agnes M. Clerke in un articolo del 1902 intitolato *Recent determinations of the Sun’s movement*



**Stern mit grösster bislang bekannter Eigenbewegung.**

Der Stern Cordoba Zone Catalogue 5<sup>h</sup>243 hat eine Eigenbewegung von 8.7 im<sup>o</sup> grössten Kreise, wie dies aus folgenden Beobachtungen hervorgeht :

	Grösse	Epoche	$\alpha$ 1875	$\delta$ 1875
Cord. ZC. (2 Beob.)	8	1873.04	5 <sup>h</sup> 6 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup> .61	-44° 58' 17.6
Cape Phot. DM.	9.2	1890.1	50.8	59.9
Cap Catalog Platte (geschätzt)	—	1893.9	53.8	60.2
Innes, Equatorial	8.2	1897.1	55.8	60.4
Cap, Merid. Beob.	—	1897.81	56.0	60.530

welche alle gut stimmen zu einer Eigenbewegung von +0.621 in gerader Aufsteigung, und von -5.70 in Declination.  
 Innes findet den Stern orange-gelb.  
 Die Entdeckung ist aus den Arbeiten für die C. P. D. hervorgegangen, also aus den Arbeiten der Cap-Astronomen (Innes) und meinen eigenen.  
 Groningen 1897 Dec. 14. J. C. Kapteyn.

Figura 3.8: La nota di Kapteyn sulla scoperta di una stella ad alto moto proprio nota come Stella di Kapteyn. Sono presenti cinque misurazioni di posizione: due provenienti dalle lastre CPD nel 1890 e nel 1893, una dal Cordoba Durchmusterung nel 1873 e due dall'Osservatorio del Capo effettuate da Robert Innes. (*Astronomische Nachrichten*, 1897)

*in space* (“Recenti determinazioni del movimento del Sole nello spazio”).

La stella di Kapteyn ha un moto proprio di circa 8,7 secondi d’arco all’anno. Ha una parallasse di circa 0,26 secondi d’arco e si trova quindi ad una distanza di 12,8 anni luce (3,9 parsec). Il moto proprio, quindi, corrisponde ad una velocità trasversale di circa 160 km/s. Ha anche un moto radiale di circa 245 km/s rispetto al Sole; quindi, la velocità spaziale totale relativa a noi è superiore a 290 km/s. Solo 25 stelle conosciute si trovano ad una distanza dal Sole inferiore a 4 parsec e la Stella di Kapteyn è quindi parte di esse. La sua massa è circa un quarto di quella del Sole e il suo raggio circa 0,3 volte quello del Sole. È interessante notare che la Stella di Kapteyn è l’esempio più vicino di stella di Popolazione II, e sta attualmente attraversando il disco della Via Lattea (vedi anche Fig. 8.3); fa parte quindi dell’alone della nostra Galassia, in cui le stelle hanno una scarsa abbondanza di elementi chimici oltre all’idrogeno e all’elio. Le stelle nell’alone possono avere velocità molto elevate l’una rispetto all’altra, poiché, come conseguenza del moto poco organizzato, le loro orbite hanno un’ampia varietà di orientamenti nello spazio.

Ad oggi, solo una stella ha superato il moto proprio della Stella di Kapteyn, ovvero la Stella di Barnard, con poco più di 10 secondi d’arco all’anno. Fu scoperta nel 1916 dall’astronomo americano Edward Emerson Barnard (1857-1923).

Nel 1960 si scoprì che la Stella di Kapteyn è in realtà parte di un insieme di stelle che si muovono insieme attraverso lo spazio. Esso divenne noto come “Kapteyn moving group” (o “Gruppo cinematico di Kapteyn”) e attualmente conta circa 33 oggetti. Queste stelle condividono con la Stella di Kapteyn il grande moto retrogrado nella dire-

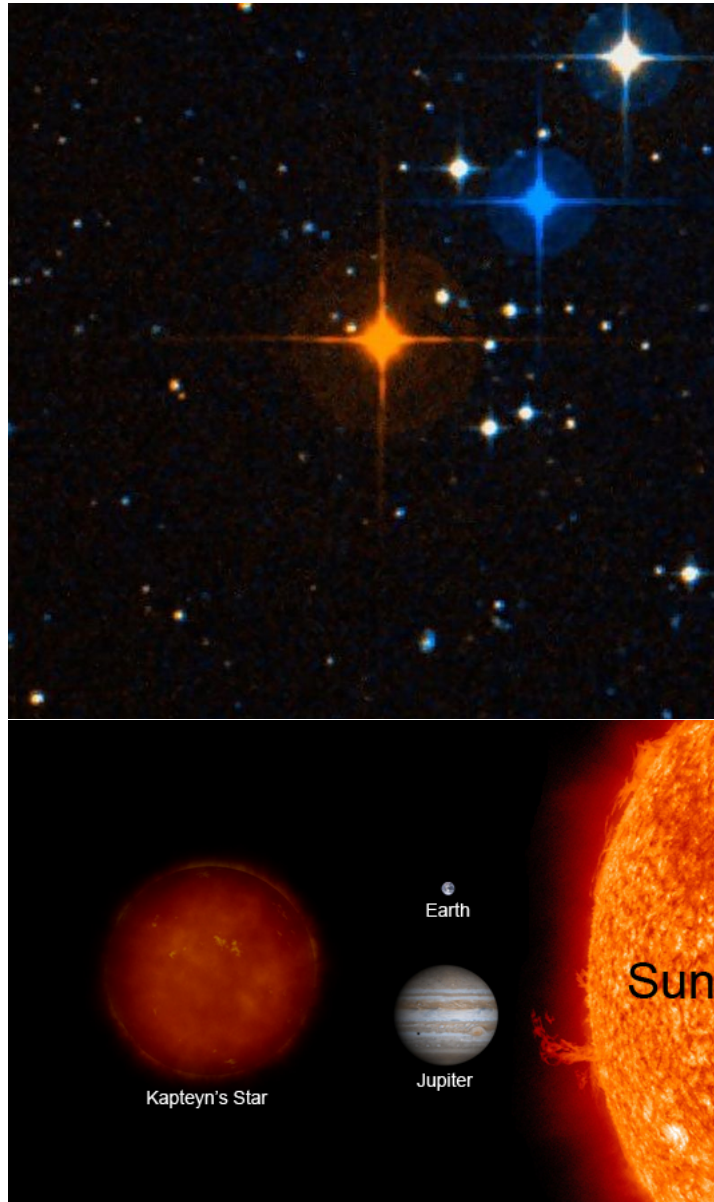


Figura 3.9: La Stella di Kapteyn (in alto); confronto con altri oggetti del Sistema Solare (in basso). (Crediti: Digital Sky Survey/Centre de Données astronomiques de Strasbourg (figura in alto); Peter Binter (figura in basso))



Figura 3.10: Il moto della Stella di Kapteyn sullo sfondo delle 'stelle fisse'. Le immagini sono state ottenute dal UK Schmidt Telescope in tre differenti occasioni: nel 1975 (in alto), nel 1990 (al centro) e nel 1996 (in basso). La stella si è mossa di circa 3 secondi d'arco in questo intervallo di tempo. (Crediti: Digital Sky Survey DSS2)

zione della rotazione galattica di circa 19 km/s, ma hanno deviazioni molto più grandi nella direzione lungo il Centro Galattico e perpendicolarmente al disco della Galassia. Per quel che è noto, hanno anche basse quantità di elementi chimici oltre all'idrogeno e all'elio.

Sono noti altri “gruppi cinematici” di questo tipo con un moto retrogrado sistematico molto meno estremo o assente, e si pensa che derivino da effetti di risonanza nel disco galattico (una risposta collettiva a qualche disturbo gravitazionale) o da piccole galassie satelliti che sono cadute nella Galassia e attualmente si stanno dissolvendo.

C'è un'ipotesi interessante fatta di recente per quanto riguarda l'origine della Stella di Kapteyn e di altre stelle del Gruppo di Kapteyn. Le stelle di Popolazione II nell'alone galattico sono per lo più distribuite uniformemente in tutto lo spazio, ma una piccola frazione di esse si concentra in aggregati che prendono il nome di “ammassi globulari” a causa della loro forma sferica. Le stelle del Gruppo di Kapteyn mostrano delle proprietà chimiche molto simili a una delle popolazioni nel più grande ammasso globulare conosciuto,  $\omega$  Centauri. Le straordinarie dimensioni e il numero di stelle di  $\omega$  Centauri suggeriscono che in realtà possa essere il residuo di una galassia nana che è caduta nella nostra galassia e si è mossa attraverso il disco galattico, perdendo in tal processo le sue stelle meno legate attraverso il meccanismo di stripping mareale. Questa ipotesi rende la stella di Kapteyn un oggetto di estremo interesse.

Nel 2014 (vedi [28]) sono stati scoperti due pianeti intorno alla stella di Kapteyn, entrambi aventi massa pari ad alcune volte quella della Terra, e uno in orbita nella “zona abitabile” dove è possibile la presenza di acqua liquida.

### 3.8 Produzione del CPD

*The Cape Photographic Durchmusterung* fu pubblicato in tre parti negli annali dell'Osservatorio del Capo: nel 1896 le zone di declinazione da  $-18^\circ$  a  $-37^\circ$ , nel 1897 da  $-38^\circ$  a  $-52^\circ$ , e nel 1900 da  $-53^\circ$  a  $-89^\circ$ , completando così il cielo australe.

La pubblicazione finale e il completamento del progetto avvennero poco prima dell'inizio del XX secolo e il cinquantesimo compleanno di Kapteyn, il 19 gennaio 1901. Nell'Introduzione al volume finale, Gill scrisse:

*“Ora mi rendo conto che i miei molti altri doveri, e la difficoltà di ottenere un'assistenza adeguata, mi avrebbero costretto a rinviare gran parte del lavoro agli anni del mio ritiro dalla vita ufficiale. Sono certo che Kapteyn non abbia lavorato invano e che gli astronomi apprezzeranno debitamente ciò che ha fatto per la scienza”.*

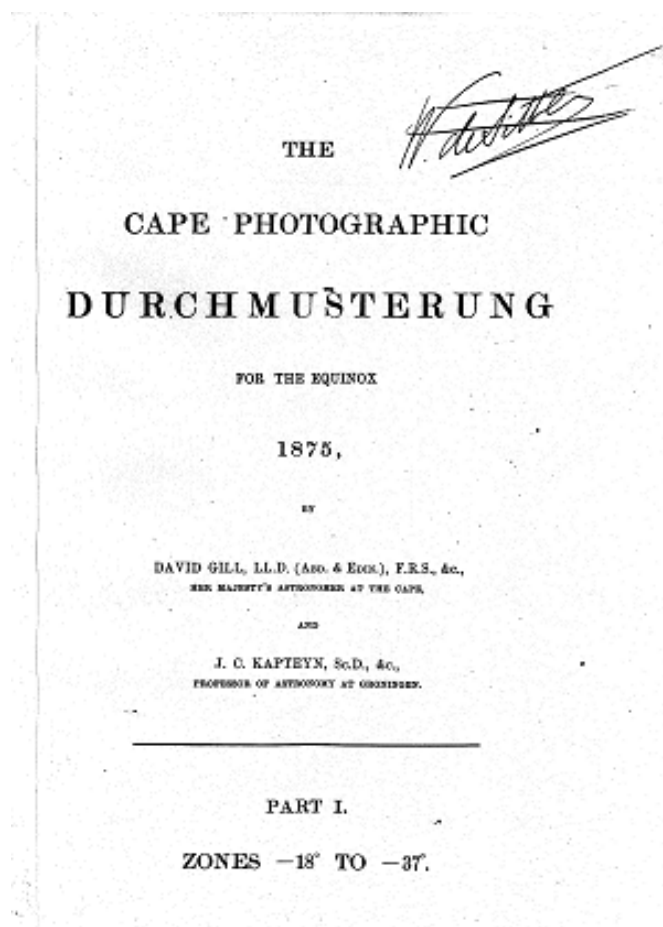


Figura 3.11: La copertina della prima parte del *Cape Photographic Durchmusterung* (1896) firmata da William De Sitter. (Biblioteca del Kapteyn Astronomical Institute)

Sempre nell'Introduzione Kapteyn fornì una lunga e dettagliata discussione sulla qualità generale del catalogo.

Le posizioni finali furono determinate con una precisione dell'ordine di circa 4 secondi d'arco in ascensione retta alle declinazioni più basse (e corrispondentemente di più a declinazioni più alte, perché le linee di uguale ascensione retta si stringono sempre di più), e circa 3 secondi d'arco in declinazione. Le magnitudini delle stelle furono determinate dai diametri delle immagini sulle lastre con una precisione di circa 0,06 magnitudini.

Dopo un'attenta discussione Kapteyn concluse scrivendo che il CPD è completo almeno fino alla magnitudine fotografica 9,2 con un numero totale di stelle pari a 454.875.

L'introduzione del CPD menzionava che era stata presa la decisione di conservare le lastre nel laboratorio di Kapteyn su base permanente. Si trovano infatti ancora oggi

a Groninga, conservate nel deposito del Museo dell'Università di Groninga presso il Campus di Zernike, non lontano da dove si trova attualmente l'Istituto Astronomico Kapteyn.



Figura 3.12: Una scatola contenente lastre CPD custodita all'università di Groninga. Tutte le lastre sono impilate in fila dentro scatole di legno marrone, ciascuna contenente circa 35-40 lastre. (Museo universitario di Groninga)

La pubblicazione delle misurazioni eseguite con lo strumento parallattico segnò un importante passo avanti per la carriera di Kapteyn. Nel 1901 fu il primo olandese a ricevere una medaglia d'oro dalla British Royal Astronomical Society. Kapteyn era membro di questa organizzazione dal 1892. Inoltre, lavorare con lo strumento contribuì ad ispirare le teorie di Kapteyn sulla struttura della Via Lattea.

### 3.9 Il lavoro all'osservatorio di Groninga

All'incirca nel momento in cui Kapteyn finì di misurare le tavole di Gill e iniziò i calcoli per il CPD, le autorità dell'Università di Groninga finalmente risposero alle sue richieste di sostegno, approvando la sua richiesta di strumenti per la misura di dati dalle lastre fotografiche. Il suo amico e professore di fisiologia Dirk Huizinga del dipartimento di psicologia gli permise di usare due stanze nel suo laboratorio e nel 1896 ricevette un intero edificio a sua disposizione. Il nuovo Laboratorio Astronomico di Groninga (oggi chiamato, in suo onore, il Laboratorio Astronomico Kapteyn) avrebbe contribuito non solo all'indagine del Capo, alla Carte du Ciel e all'analisi dei dati di parallasse di Helsingfors, ma anche alle ricerche avviate successivamente dagli astronomi di tutto il

mondo.

Nel suo discorso fatto all'inaugurazione dell'edificio disse:

*“In ogni osservatorio viene prodotto molto di più di quanto non possa essere analizzato, perché la forza lavoro disponibile per le misurazioni e tutto il resto del lavoro, sebbene adeguata alle registrazioni fotografiche, è insufficiente per la riduzione dei dati”.*

Prendendo in prestito una frase da Charles Darwin, descrisse lo scopo del suo laboratorio come *“la trasformazione di enormi masse di fatti in legge”*. Come predisse Kapteyn, i dati continuarono ad accumularsi molto più velocemente di quanto gli astronomi potessero analizzarli.

Gli anni intorno alla fine del XX secolo furono tra i più impegnati e produttivi della vita di Kapteyn. Nel 1900, iniziò a pubblicare aggiornamenti regolari sulle scoperte del suo laboratorio, spesso in inglese, che stava diventando la “lingua dell'astronomia”. Nel 1901, ebbe la soddisfazione di assistere alla laurea del suo primo studente di dottorato, Willem de Sitter<sup>9</sup>. I figli di Kapteyn, nel frattempo, si facevano strada nel mondo. Mandò sia suo figlio che le sue figlie in una scuola per ragazzi, e queste ultime contribuirono a creare un precedente per le donne studiando medicina e legge all'università.

### 3.9.1 Parallassi e moti propri

Nel suo lavoro scientifico, Kapteyn si attenne alla “trasformazione di enormi masse di fatti”, perseguendo in modo ostinato indagini sulle distanze e le distribuzioni delle stelle, anche se molti dei suoi contemporanei saltarono avanti al passo successivo e avanzarono ipotesi sulla natura del sistema stellare basate su scarse informazioni o analogie provvisorie, sostenendo tesi sia a favore che contro l'ipotesi dell'universo-isola.

La storica dell'astronomia Agnes Clerke (1842-1907) rappresentò un'opinione diffusa scrivendo nel 1886 che il sistema della Via Lattea era così vasto, come gli astronomi avevano appreso dalle misurazioni della parallasse, che l'idea di “universi-isola” su una scala paragonabile alla nostra era insostenibile. L'astronomo tedesco Julius Scheiner (1858-1913) mise in dubbio questa visione nel 1898 quando la sua fotografia a lunga esposizione dello spettro della nebulosa di Andromeda emerse come decisamente simile a una stella, suggerendo che potesse essere un “universo-isola”. Poco dopo la fine del secolo, lo scrittore scientifico olandese Cornelis Easton (1864-1929) suggerì che il nostro

---

<sup>9</sup>De Sitter divenne poi noto per i suoi studi sulla teoria della relatività generale e sulle applicazioni all'espansione dell'universo e alle sue origini.

sistema stellare somigliasse ad un sistema a spirale, ma sottolineò che la sua opinione si basava sulla speculazione e non su indizi osservativi.

In breve, la situazione era confusa e richiedeva più dati. Kapteyn aveva bisogno di sondare le maggiori distanze possibili e il maggior numero di distanze per determinare la struttura del sistema stellare. Inizialmente, pensò di procedere naturalmente accumulando le parallassi delle singole stelle. La misura delle parallassi era una sorta di industria in crescita in astronomia verso la fine del secolo: nel 1882 erano disponibili solo 34 parallassi, mentre al 1914, grazie agli sforzi di Kapteyn e di altri astronomi in tutto il mondo, ne erano state misurate centinaia. Ma neanche questa crescita nell'accumulo di dati di parallasse fu sufficiente per l'uomo che avrebbe risolto il "problema siderale". Kapteyn rivolse quindi la sua attenzione ai moti propri delle stelle.

Lo sforzo principale di Kapteyn verso la fine del secolo fu quello di utilizzare questi dati sui moti propri che erano relativamente abbondanti per poter ricavare maggiori informazioni sulle distanze stellari. Tentò di correlare i moti propri delle stelle con le loro parallassi, in modo che, per le stelle per le quali era noto solo il moto proprio, potesse ricavare una stima della loro distanza. Il suo ragionamento era fondamentalmente simile a quello di Giuseppe Piazzi (1746-1826), l'astronomo italiano che per primo suggerì che 61 Cygni potesse essere nelle vicinanze, e un buon candidato per le misurazioni della parallasse, a causa del suo elevato moto proprio. Supponendo che le stelle abbiano movimenti casuali in tutte le direzioni, in generale un campione di stelle relativamente vicino avrà un moto proprio medio più alto rispetto a un gruppo di stelle lontane.<sup>10</sup>

Così Kapteyn applicando metodi statistici e lavorando con suo fratello Willem all'Università di Utrecht, confrontò i moti propri con le parallassi delle stelle per le quali erano state misurate entrambe le quantità e trovò una formula che le mise in relazione. Quindi, per una stella di cui era noto solo il moto proprio, fu in grado di calcolare quella che chiamò la "parallasse media".

Quello della parallasse media fu uno dei metodi con cui Kapteyn studiò la distribuzione delle stelle nello spazio e grazie a esso fu in grado di misurare distanze di circa 1500-3000 anni luce, mentre la tecnica della parallasse trigonometrica arrivava a circa 300 anni luce. Kapteyn senza dubbio si aspettava che la sua analisi della parallasse

---

<sup>10</sup>Analogamente al caso di un'osservatore che vede un'auto muoversi ad una certa distanza e sembra che abbia un moto proprio più elevato rispetto ad un'auto che si muove ad una distanza maggiore, poiché la prima copre un angolo maggiore nello spazio in una data unità di tempo. L'argomento non si applica alle singole stelle, perché si ipotizza che possano avere una velocità data casualmente. Una stella lontana potrebbe, per caso, avere una velocità più elevata e dimostrare lo stesso moto proprio di una stella più vicina e più lenta. Invece, il moto proprio medio di un campione di stelle tende a riflettere accuratamente la distanza delle stelle nel campione.



media avrebbe spinto i limiti dell'universo conosciuto in quanto poteva essere sondato con qualsiasi grado di precisione, aggiungendo stelle più distanti al campione di oggetti ben studiati. Con sua sorpresa, tuttavia, scoprì che i primi risultati non riguardavano le distanze stellari ma l'organizzazione delle stelle su larga scala. Contrariamente a tutte le aspettative, i moti delle stelle non erano casuali. Nel 1902, giunse alla conclusione che qualcosa non andava nel suo studio, o che l'universo non era quello che lui e i suoi colleghi astronomi avevano immaginato.

Kapteyn aveva l'abitudine di visualizzare i suoi dati tracciando punti o disegnando vettori su globi fatti di lavagna, e quando lo fece con le velocità delle stelle nel suo studio, vide emergere sulla sfera celeste un modello distinto.

Oggi comprendiamo che il fenomeno da lui scoperto è spiegato (in modo piuttosto complicato) dalla rotazione della nostra galassia, ma per Kapteyn, i risultati suggerivano semplicemente un moto sistematico su larga scala delle stelle. Fu una conclusione che definì *“bizzarra ma forse molto significativa”*.

Kapteyn aspettò fino al 1904 per presentare e spiegare le sue scoperte alla comunità astronomica e al pubblico.

# Capitolo 4

## Le correnti stellari

### 4.1 Ulteriori studi sui moti stellari: la legge delle velocità

A partire dal 1890, Kapteyn si convinse che i moti delle stelle fossero gli elementi chiave per comprendere la loro distribuzione. Questi studi portarono alla cosiddetta legge di velocità, una relazione che, secondo Kapteyn, non solo avrebbe permesso di conoscere il *sistema siderale*, ma avrebbe anche portato alla derivazione delle leggi di luminosità e di densità. A sua volta, quest'ultima avrebbe fornito una comprensione dettagliata della struttura della Via Lattea.

Kapteyn presentò il suo metodo per affrontare il problema della struttura del *sistema siderale*, sfruttando il moto delle stelle, in una presentazione che tenne alla Royal Academy il 31 maggio 1895.

Iniziò delineando i suoi obiettivi, ovvero determinare (1) la legge della distribuzione delle velocità lineari assolute; (2) la legge della densità stellare in funzione della distanza dal Sole; e (3) la legge della distribuzione delle luminosità assolute. Spiegò che per raggiungere questi obiettivi era necessario considerare tre ipotesi: (a) tra le direzioni in cui avvengono i moti delle stelle, non ce n'è una preferita; b) la legge della distribuzione delle velocità non cambia con la distanza dal Sole; e c) la forma della distribuzione delle velocità lineari ha un solo massimo. Le ultime due erano necessarie per la teoria matematica che stava sviluppando per derivare queste leggi.

Kapteyn sviluppò quindi gli strumenti matematici per ricavare informazioni dai moti propri. Non era un lavoro facile; comportava calcoli complicati, come la valutazione di integrali tripli, per cui chiese l'aiuto di suo fratello Willem che era un matematico.

Alla fine, la discussione completa di questa teoria fu pubblicata in dettaglio nel 1900 nel numero 5 della famosa serie delle Pubblicazioni di Groninga. Nell'Introduzio-

ne, veniva illustrato brevemente lo scopo: determinare la legge di velocità basandosi sull'ipotesi che i moti stellari fossero distribuiti in maniera casuale in ogni direzione.

*“Di seguito si cercherà di dedurre dalle osservazioni quella che, per brevità, chiamerò legge delle velocità, cioè la legge con cui si definisce il numero di stelle aventi velocità lineare pari al doppio, triplo, ..., metà, un terzo, ... di quella del sistema solare nello spazio, o inferiore: la legge con la quale la frequenza di una velocità lineare è data in funzione della sua grandezza. L'ipotesi fondamentale su cui poggia questa derivazione è la seguente...I moti veri degli astri sono ugualmente frequenti in tutte le direzioni.”*

Kapteyn proseguì poi esponendo il suo metodo per ricavare la legge della distribuzione delle velocità, aggiungendo che era importante non solo considerare la direzione dei moti propri ma anche la loro grandezza. Ogni moto poteva essere scomposto in una componente nella direzione dell'Apice (componente “parallattica”) e una componente perpendicolare ad esso. Misurando entrambi i valori e facendone il rapporto, era possibile conoscere la velocità media delle stelle espressa in unità solari. Il valore trovato da Kapteyn fu una velocità media pari a 1,86 volte quella del Sole.

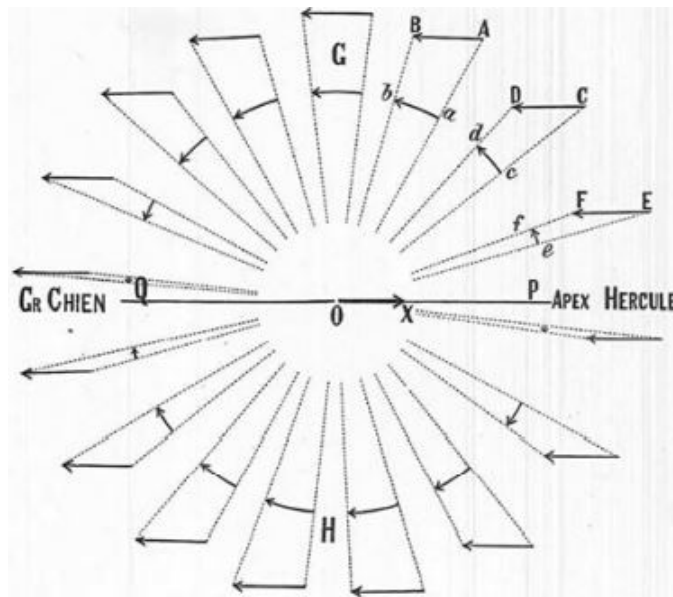


Figura 4.1: Illustrazione dell'effetto del moto del Sole sui moti propri rispetto alle altre stelle. Ogni moto proprio può essere scomposto in una componente nella direzione dell'Apice (o dell'Antiapice) e in una componente perpendicolare ad esso. La prima contiene una componente che dipende dal moto del Sole rispetto al Sistema di Riposo Locale e fu chiamata da Kapteyn “componente parallattica”, la seconda è interamente dovuta al moto “peculiare” della stella. Nella figura l'Apice Solare si trova a destra, nella costellazione di Ercole. (Kapteyn, [18])

Nello stesso contributo dimostrò che, conoscendo la legge della distribuzione delle velocità delle stelle, era possibile derivare la densità stellare per una determinata magnitudine apparente, in funzione della distanza. Ciò sfruttava il fatto che i moti propri avevano una componente sistematica (ovvero quella “parallattica”, dovuta al moto del Sole) e una casuale che in grandi campioni si annullava. Una volta determinata la densità stellare in funzione della magnitudine apparente e della distanza dal Sole, era possibile trasformarla in una distribuzione della densità stellare in funzione della distanza.

Kapteyn tenne un'altra presentazione alla Royal Academy nel 1897, e iniziò presentando un diagramma mostrato in Fig. 4.2, in cui mostrò come usava sia la direzione che la grandezza dei moti propri per determinare la “legge delle velocità cosmiche”. Il suo metodo fu il seguente: si definisce l'angolo compreso tra il moto proprio di una stella e la direzione verso l'Apice solare con “ $p$ ” e si considerano intervalli di  $15^\circ$ . Per prima cosa si considerano delle stelle ad una determinata distanza dal Sole. La linea SB ha una lunghezza proporzionale al moto proprio medio delle stelle nell'intervallo centrato in  $p=15^\circ$ , la linea SC per stelle nell'intervallo centrato in  $p=45^\circ$  ecc. I punti B, C ecc. formano una curva continua che punta verso l'Apice 'A' e ha una forma che dipende dalla distribuzione delle velocità spaziali delle stelle coinvolte. Se si prende un insieme di stelle ad una distanza maggiore e si fa lo stesso disegno, la curva risultante avrà la stessa forma ma sarà ristretta di una quantità uguale al rapporto tra le due distanze (se l'assunzione (b) è corretta, ovvero la legge di velocità non dipende dalla distanza dal Sole). Inoltre, il numero di stelle che contribuiscono nei punti B, C ecc. sarà nella stessa proporzione. Queste dipendenze potevano essere tutte espresse con un insieme complicato di formule matematiche.

Kapteyn raccolse più materiale possibile, arrivando ad un campione di almeno 2355 stelle. Iniziò poi a verificare la casualità del campione considerando la distribuzione degli angoli  $p$  e trovò una deviazione sistematica forte dalla simmetria assiale.

Quando comprese che l'evidenza era in contrasto con la sua teoria, formulò diverse ipotesi per spiegare la presunta discrepanza: 1) l'esistenza di moti stellari preferenziali 2) un valore incorretto dell'Apice e 3) dei valori incorretti per i moti propri. Le ultime due spiegazioni erano le uniche che potevano determinare il fallimento della sua teoria, ma alla fine concluse che sia i valori dell'Apice che dei moti propri erano stati calcolati correttamente.

Kapteyn respinse la teoria della velocità nel 1900 e appena due anni dopo scoprì le correnti stellari. Il fenomeno per cui le stelle tendevano a muoversi in due direzioni distinte e diametralmente opposte, per Kapteyn era dovuto alla presenza di due popo-

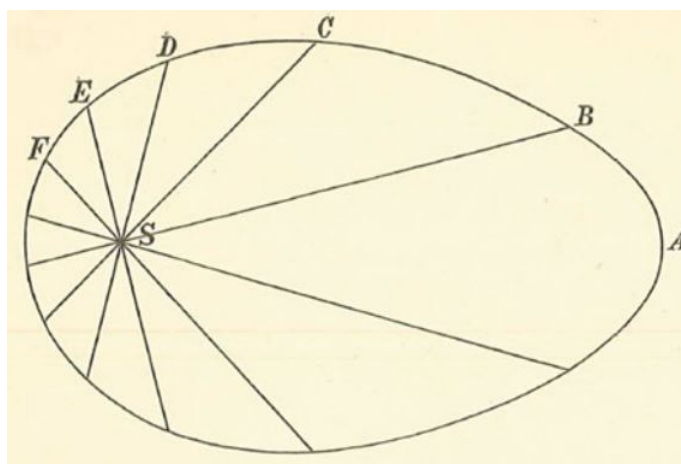


Figura 4.2: Figura tratta dalla presentazione di Kapteyn per la Royal Academy of Arts and Sciences. (Kapteyn, [12])

lazioni un tempo distinte, ma ora mescolate tra loro in movimento una verso l'altra. Questa scoperta portò Kapteyn all'Esposizione Universale di St. Louis nel 1904 e l'anno successivo ad un incontro coi membri dell'Associazione britannica per l'avanzamento della scienza (British Science Association), ed ebbe anche un grande impatto sul lavoro di diversi suoi contemporanei.

## 4.2 Determinare la distribuzione spaziale delle stelle

Uno degli obiettivi principali di Kapteyn nella sua ricerca per svelare la struttura dell'Universo Siderale era quello di trovare metodi per stimare la luminosità delle stelle e determinare la loro frequenza relativa nello spazio.

Il primo passo era di capire in che misura il moto proprio e la magnitudine apparente fossero degli indicatori della distanza. Un primo articolo a riguardo apparve nel 1900, con il titolo *On the mean parallax of stars of determined proper motion and magnitude* ("Sulla parallasse media di stelle di moto e magnitudine determinati"). Nella prefazione di tale pubblicazione, Kapteyn sottolineò che i suoi risultati erano solo provvisori, dal momento che nuovi dati stavano rapidamente diventando disponibili e ulteriori studi sulla distribuzione delle stelle nello spazio avrebbero ulteriormente posto dei limiti ai risultati.

Il numero di parallassi che Kapteyn misurò direttamente e considerò affidabili fu di 58, alle quali aggiunsero altre misure di parallasse ottenute dall'astronomo americano

Albert Stowell Flint (1853-1923), all'epoca inedite. Flint scrisse favorevolmente della pubblicazione di Kapteyn quando apparve per la prima volta, tanto che usò la tecnica dei passaggi meridiani che Kapteyn stesso aveva sperimentato all'Osservatorio di Washburn nel 1891. I risultati dell'uso del metodo parallattico per stimare le distanze permisero di ottenere informazioni sulle parallassi medie di stelle in funzione della magnitudine apparente.

Il risultato finale di Kapteyn fu un insieme di equazioni per calcolare la parallasse media delle stelle aventi una determinata magnitudine apparente e un determinato moto proprio per ciascun tipo spettrale (sia singolarmente che per gruppi di stelle). Sommando i moti propri si poteva anche trovare la parallasse media delle stelle aventi una determinata magnitudine apparente.

Assumendo la validità di tale risultato, esso avrebbe costituito uno strumento molto potente per studiare la distribuzione spaziale delle stelle in funzione del loro tipo spettrale e della loro luminosità.

8. *Summary of results. Tables.*

The following formulae may be considered as the final results of the preceding investigation :

(50) Type I	$\bar{\pi}_{\mu, m} = (0.905)^m - 5.5 \sqrt[1.11]{0.116 \mu}$	}	mean parallax of stars with determined proper motion and magnitude,
(51) Type II	$\bar{\pi}_{\mu, m} = (0.905)^m - 5.5 \sqrt[1.44]{0.0262 \mu}$		
(52) All the stars together	$\bar{\pi}_{\mu, m} = (0.905)^m - 5.5 \sqrt[1.405]{0.0387 \mu}$		

obtained by a combination of the formulae (16), (17), (18) with (21).

(53) . . . Type I . . . . .	$\pi_m = 0.0098 (0.75)^m - 5.5$	}	Mean parallax of all the stars of magnitude $m$ ,
(54) . . . Type II . . . . .	$\pi_m = 0.0223 (0.75)^m - 5.5$		
(55) . . All the stars together	$\pi_m = 0.01605 (0.75)^m - 5.5$		

by formula (26).

(56) . . . . .  $\varrho = \text{Probable amount of } \log \frac{\pi}{\pi_0} = 0.19$

(57) . . . . .  $\pi_0 = 0.810 \bar{\pi}$

for which consult article 7.

Figura 4.3: Sintesi conclusiva dei risultati riportata nell'articolo *On the mean parallax of stars of determined proper motion and magnitude* (1900). Le formule nella parte superiore forniscono la parallasse media di stelle con un dato moto proprio e con data magnitudine apparente. Le formule in basso definiscono la parallasse più probabile come 0,810 volte quella media, assumendo una determinata distribuzione delle parallassi. (Kapteyn Astronomical Institute)

Successivamente Kapteyn sviluppò una tecnica numerica che consisteva nel dividere le stelle in intervalli ristretti di moto proprio in funzione della magnitudine apparente, per i dati più affidabili che aveva a disposizione. Utilizzando le sue formule, Kapteyn calcolò le parallassi medie corrispondenti ad ogni intervallo e riuscì a determinarne la distribuzione in funzione del moto proprio e della magnitudine apparente.

Questo risultò in una tabella bidimensionale in cui veniva fornito un elenco di stelle catalogate in base alla magnitudine apparente e alla distanza media. Questa rappresentazione consente di sommare nella direzione orizzontale e di trovare la densità spaziale di stelle in funzione della distanza, o nella direzione verticale per trovare la “curva di luminosità”. Kapteyn introdusse tale termine nel linguaggio astronomico, definendola come il numero di stelle in un dato elemento di volume per varie magnitudini assolute.

TABLE 3. LOG. NUMBER OF STARS PER UNIT OF VOLUME.

Mean $\pi$	$M$	$r$															Density				
		-7.55	-6.55	-5.55	-4.55	-3.55	-2.55	-1.55	-0.55	0.45	1.45	2.45	3.45	4.45	5.45	6.45		7.45	8.45	9.45	10.45
	$\log L$	5.22	4.82	4.42	4.02	3.62	3.22	2.82	2.42	2.02	1.62	1.22	0.82	0.42	0.02	9.62	9.22	8.82	8.42	8.02	
0.00118	84.7	3.51	3.81	4.40	5.033	5.685	6.326	7.068	7.713												0.122
.00187	53.5	4.11	4.38	4.53	5.286	5.984	6.589	7.188	7.838	8.446											0.234
.00296	33.8			5.18	5.60	6.167	6.852	7.428	7.992	8.543	9.111										0.418
.00469	21.3				5.88	6.477	6.991	7.628	8.190	8.726	9.201	9.719									0.656
.00743	13.5		5.90	5.90	5.90	6.613	7.209	7.714	8.310	8.858	9.366	9.769	0.225								0.869
.0118	8.47						7.28	7.878	8.377	8.899	9.423	9.884	0.225	0.651							0.985
.0187	5.35							7.97	8.441	8.975	9.423	9.892	0.295	0.580	0.935						1.031
.0296	3.38							8.00	8.52	8.949	9.476	9.857	0.269	0.596	0.830	1.113					1.000
.0469	2.13							8.32	8.60	9.021	9.364	9.907	0.200	0.552	0.812	0.999	1.202				0.917
.0743	1.35								8.90	8.90	9.422	9.709	0.270	0.479	0.742	0.962	1.100	1.220			0.829
.118	0.85									9.51	9.51	9.71	0.980	0.560	0.688	0.863	1.097	1.164	1.201		0.742
.204	0.49									9.98	9.98	0.219	0.004	0.173	0.663	0.864	1.041	1.210	1.266	1.257	0.648
	apparent mag.												$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	

Figura 4.4: Riproduzione della Tabella 3 di Kapteyn (1902). Questa tabella ( $m, \log r$ ) riporta le densità spaziali in funzione della magnitudine assoluta  $M$  e della distanza  $r$ . Le distanze sono espresse in unità di 10 pc. I dati lungo le diagonalì hanno magnitudine costante. Le densità relative sono riportate nell'ultima colonna e derivate dai dati nella tabella. (Kapteyn Astronomical Institute)

La procedura di Kapteyn forniva quindi anche la distribuzione di densità relativa delle stelle vicine al Sole. Naturalmente i dati erano incompleti: furono utilizzate stelle fino ad una magnitudine limite di 9,5, e furono incluse stelle vicine che erano intrinsecamente più deboli di quelle

prese a distanze maggiori. Nonostante ciò, quella di Kapteyn può essere considerata una rappresentazione incompleta e tabellare dell'equazione fondamentale della statistica stellare.

È importante sottolineare i commenti dell'astronomo olandese Maarten Schmidt sull'importanza del metodo di lavoro di Kapteyn utilizzando la tabella riprodotta in Fig. 4.4. Schmidt si laureò all'Università di Groninga, dove Pieter van Rhijn gli insegnò i principi della statistica stellare, e divenne famoso per aver identificato i primi quasar. Queste “sorgenti radio quasi-stellari” furono notate negli anni 1950 e nei primi anni 1960 come sorgenti radio molto forti associate otticamente a oggetti simili a stelle. Schmidt notò nel 1963 che questi oggetti avevano redshift molto elevati e quindi grandi velocità radiali in allontanamento da noi, come risultato dell'espansione dell'Universo. Oggi è noto che corrispondono ai centri delle galassie massicce a distanze cosmologiche, dove vengono liberate enormi quantità di energia dai buchi neri. Schmidt ideò il cosiddetto test  $V/V_{max}$  per studiare la loro evoluzione cosmologica come naturale estensione dell'approccio di Kapteyn.

### 4.3 La definizione di magnitudine assoluta

Nei suoi studi sulla distribuzione delle stelle, Kapteyn si rese conto di aver bisogno di una base molto più solida per stabilire una guida affidabile per le distanze e le luminosità stellari. Nel lavoro che portò alla tabella 3 (mostrata in Fig. 4.4), le magnitudini apparenti venivano normalizzate attraverso la conversione in magnitudine assoluta, utilizzando una relazione pubblicata per la prima volta nel 1902 nell'articolo *On the luminosity of the fixed stars* (“Sulla luminosità delle stelle fisse”), e che è ancora in uso oggi.

Kapteyn definì la magnitudine assoluta, indicandola con la  $M$  maiuscola, come la magnitudine apparente che una stella avrebbe se la sua parallasse fosse 0,1”. Quanto segue è direttamente citato dall'articolo di cui sopra:

*“Se definiamo inoltre:*

*$L =$  luminosità, o potere illuminante totale di una stella di magnitudine apparente  $m$  e parallasse  $\pi$ , possiamo facilmente trovare attraverso [la definizione di scala di magnitudine]:*

$$\log L = 0,2000 - 0,4m - 2\log\pi$$

*Definiamo inoltre la magnitudine assoluta ( $M$ ) di una stella, di cui la parallasse è  $\pi$  e la distanza  $r$ , come la magnitudine apparente che quella stella avrebbe se fosse*



*trasferita ad una distanza dal Sole corrispondente ad una parallasse di 0,1". Si vede facilmente che*

$$M = m - 5 \log r = m + 5 + 5 \log \pi = 5,5 - 2,5 \log L$$

*. Per il Sole  $L = 1$ ; la formula dà quindi per la magnitudine assoluta del Sole  $M = 5,5$ , [...]"*



Figura 4.5: La stella di Kapteyn ha una magnitudine assoluta  $M_V = +10,89$  e una magnitudine apparente  $m = +8,85$ . (Crediti: Digital Sky Survey/Centre de Données astronomiques de Strasbourg)

Kapteyn non spiegò esplicitamente perché scelse una parallasse di 0,1" come distanza standard, ma una frase contenuta nella stessa pubblicazione suggerisce il motivo di tale scelta: la magnitudine assoluta del Sole è convenientemente la stessa della magnitudine apparente media delle stelle di Auwers-Bradley che usava così ampiamente.

*“Adotterò qui: luce del Sole = 40.000.000.000 × luce di Vega. Secondo le misure di Potsdam, la magnitudine apparente di Vega è 0,41. Da questi dati si può facilmente dedurre che il Sole, se trasferito ad una distanza corrispondente alla parallasse  $\pi = 0,10''$ , avrebbe la magnitudine apparente 5,048. Adotterò 5,5, che accidentalmente concorda esattamente con la magnitudine media delle stelle di Bradley”.*

Kapteyn non aderì sempre a questa definizione. Nella storica conferenza che tenne a St. Louis, negli Stati Uniti, nel 1904, definì la magnitudine assoluta come la magnitudine apparente di una stella a una parallasse di 0,01" o una distanza di 100 parsec, mentre negli articoli in cui presentò il suo attacco finale al Problema Siderale tra il 1920 e il 1922, finalmente accettò il parsec come unità di distanza, ma ridefinì la magnitudine assoluta a una distanza di 1 parsec.

La definizione originale di magnitudine assoluta di Kapteyn fu alla fine adottata dall'Unione Astronomica Internazionale nella sua prima riunione, nel 1922.

## 4.4 L'esposizione universale di St. Louis del 1904

Nel 1904 si tenne a St. Louis, nel Missouri, l'Esposizione Internazionale della Louisiana, nota anche come *Louisiana Purchase Exposition* o *St. Louis World's Fair*.

Il più importante dei congressi tenutisi a St. Louis fu il "Congresso internazionale delle arti e delle scienze", che si svolse nella settimana dal 19 al 24 settembre. Esso comprendeva un gran numero di conferenze su argomenti scientifici, tecnici, letterari e industriali ed era presieduto dall'astronomo Simon Newcomb.

Newcomb scrisse a Kapteyn a riguardo il 15 luglio 1903 e lo invitò a tenere un discorso assicurando che gli avrebbe pagato le spese per il viaggio (circa cinquecento dollari). Aggiunse poi che avrebbe trattato l'argomento su cui era più eminente ovvero i problemi riguardanti la statistica stellare, sottolineando il collegamento di quel ramo con altri rami della scienza e cosa ci si poteva aspettare da esso per ampliare la conoscenza dell'universo in generale. Così, in aderenza col loro modo di vivere modesto, Kapteyn e sua moglie Elise partirono dalla loro casa vicino Groninga, presero un treno e poi si imbarcarono a Rotterdam per il loro primo viaggio negli Stati Uniti.

Il "Congresso Internazionale" costituiva solo una piccola parte dell'Esposizione Mondiale, e la maggior parte dei visitatori probabilmente disertò la conferenza di Kapteyn. Tuttavia, essa fu probabilmente uno dei migliori esempi del tema ufficiale della Mostra.

Dopo una breve introduzione sulle questioni aperte a cui l'astronomia stellare cercava di rispondere, Kapteyn presentò due ipotesi determinanti per poter fare progressi in tal campo. La prima affermava che la distribuzione delle stelle in funzione della loro luminosità (intrinseca) è la stessa ovunque. La seconda riguardava la questione dell'estinzione o assorbimento della luce stellare nello spazio.

## 4.5 Le due correnti stellari

Durante la sua presentazione, tra lo stupore e l'ammirazione dei suoi contemporanei, Kapteyn rivelò la sua scoperta che il moto delle stelle non era casuale.

Egli si concentrò sull'ipotesi fondamentale che i moti delle stelle non avessero una direzione preferita nello spazio. Per spiegare ciò, usò una figura che dimostrava l'effetto del moto del Sole nello spazio, in cui le stelle sembravano allontanarsi dalla direzione verso cui il Sole è diretto. I moti delle stelle erano rappresentati come dei vettori su un diagramma. Non ci si aspettava che tali moti fossero casuali, venivano infatti paragonati all'apparente movimento all'indietro di alberi e edifici quando osservati da un treno in movimento. Inoltre, sovrapposto a quel ben noto effetto del moto solare, Kapteyn scoprì che le stelle tendevano a spostarsi lungo una di due sole direzioni. Una serie di stelle sembrava andare alla deriva in direzione della costellazione di Orione, mentre l'altra si muoveva nella direzione opposta a circa  $140^\circ$  rispetto alla prima, verso il Sagittario. Tutte le stelle sembravano appartenere all'uno o all'altro di questi due flussi.

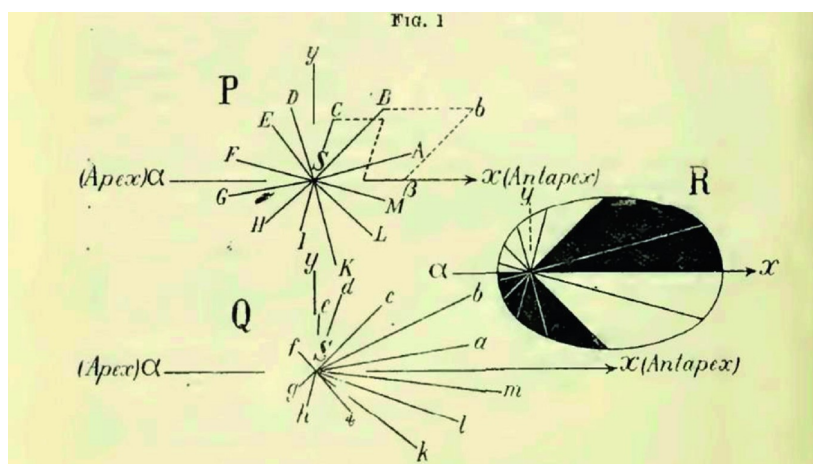


Figura 4.6: Immagine tratta dalla conferenza di Kapteyn del 1904 sui Metodi statistici nell'astronomia stellare all'Esposizione Purchase Louisiana tenutasi a St. Louis, Missouri. (Report of the seventy-fifth meeting of the British Association for the Advancement of Science, South Africa)

Nella figura 4.6, nella parte P viene illustrata l'ipotesi fondamentale: i moti propri sono, in media, uguali in termini di dimensioni e distribuiti uniformemente su tutte le direzioni. Se osservati da un punto di riferimento che si muove con il Sole nello spazio, la distribuzione dei moti viene modificata come in Q: deformata nella direzione dell'Antiapice Solare lungo la linea orizzontale  $x$ . Kapteyn sosteneva che in questa direzione, i moti propri fossero "più numerosi e maggiori in quantità". Non lo sottolineò, ma l'illustrazione si riferisce a stelle alla stessa distanza, per le quali il moto proprio

parallattico è di dimensioni uguali. Se ci fossero stelle a distanze diverse la figura reale sarebbe una sovrapposizione di tali diagrammi. Il punto era, naturalmente, che qualunque fosse la distribuzione delle distanze, le proprietà di simmetria fossero conservate nel risultato finale. Nella parte R divise le direzioni dei moti propri in 12 settori di 30 gradi, di cui quattro ombreggiati.

*“Se la nostra ipotesi fondamentale fosse soddisfatta e di conseguenza, la simmetria delle nostre figure fosse completa, le parti annerite della figura sarebbero state uguali alle corrispondenti parti più chiare.”<sup>1</sup>*

Decise successivamente di riprodurre tali ipotesi usando le oltre 2400 stelle di Bradley<sup>2</sup>, che coprivano un'area pari a oltre i due terzi dell'intero cielo. Suddivise tale area in 28 regioni, ma mostrò i risultati solo per un piccolo sottoinsieme di dieci stelle, in cui si vedeva subito che *“le divergenze (rispetto al caso ideale della fig. 4.6) sono sorprendentemente sistematiche. Vicino al Polo Nord le parti annerite sono invariabilmente molto più grandi; al Polo Sud il caso è invertito”*.

Kapteyn non si fermò qui, ma continuò a eseguire alcune analisi più quantitative, facendo uso di proprietà di simmetria. Ipotizzò che se ogni moto proprio fosse decomposto in una direzione orizzontale  $x$  e una verticale  $y$ , si dovrebbero avere due condizioni: 1) la somma di tutte le componenti  $y$  dovrebbe essere zero; 2) la somma di tutte le componenti  $x$  su un lato dell'asse  $x$  dovrebbe essere uguale alla somma delle componenti sull'altro lato. Per quanto riguarda quest'ultimo punto Kapteyn dimostrò che esisteva una chiara e sistematica differenza in funzione della latitudine galattica.

Ciò che può essere più difficile da vedere in Fig. 4.7 è che per ogni sotto-diagramma aveva disegnato quattro frecce (vettori); due di esse vuote e due piene. Le frecce piene si riferivano ai moti propri “diretti”, cioè solo quelli che erano in gran parte diretti lontano dall'Apice. Quelle vuote erano dirette generalmente verso l'Apice e si riferivano ai moti “retrogradi”.

Si poteva osservare che i moti diretti convergevano molto bene verso un punto sul cielo a circa  $20^\circ$  dall'Apice. Per quelli retrogradi l'effetto era meno chiaramente definito, ma in generale sembravano esserci due direzioni nel flusso a circa  $125^\circ$  di distanza. Ovviamente, queste non erano, come sottolineò Kapteyn, direzioni verso cui le stelle

---

<sup>1</sup>Come in figura 4.6, che rappresenta un caso ideale.

<sup>2</sup>Si tratta di un insieme di stelle che fanno parte di un catalogo pubblicato dal matematico e astronomo tedesco Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846), che riportava le posizioni di circa 3000 stelle osservate dall'astronomo inglese James Bradley (1693–1762) da Greenwich tra il 1750 e il 1765. Bradley era Astronomo Reale e lo scopritore dell'aberrazione della luce e della nutazione dell'asse terrestre.

si muovevano esclusivamente, ma direzioni per le quali esisteva “solo una decisa preferenza”. Il fatto che non fossero diametralmente opposte era dovuto al moto generale del Sole rispetto al sistema stellare, ma conoscendo la velocità media delle stelle si poteva correggere per questo effetto e individuare due punti opposti nel cielo indicati dalle lettere 'V' in Fig. 4.7. Kapteyn usò la parola “Vertice” per questi punti per distinguerli dall'Apice.

Kapteyn, esaminando le velocità radiali concluse che sebbene le prove fossero limitate dal piccolo numero di stelle disponibili in questo contesto, confermavano comunque l'esistenza di correnti stellari e dei loro vertici.

L'attenta analisi di Kapteyn, che coinvolse migliaia di stelle, convinse i suoi associati che l'effetto dei “due flussi” era reale, anche se ci sarebbero voluti ulteriori studi fino al 1927 per comprenderlo correttamente come una conseguenza della rotazione delle stelle, con vari tipi di orbite circolari ed ellittiche, attorno al centro della galassia. Il grande matematico e astrofisico inglese Arthur S. Eddington (1882-1944) scrisse in seguito che lo studio di Kapteyn “rivelò per la prima volta una sorta di organizzazione nel sistema delle stelle e iniziò una nuova era nello studio delle relazioni di questi individui ampiamente separati”.

Per Kapteyn, l'effetto dei due flussi suggerì che il nostro sistema stellare fosse costituito da due nubi giganti di stelle in movimento l'una verso l'altra. Le stelle della prima nube si mescolano nello spazio con le stelle della seconda, ma ogni stella mantiene la propria velocità e direzione originali. Così i suoi studi sulla struttura del sistema stellare lo portarono a mettere in dubbio anche la storia evolutiva del sistema, con l'obiettivo di risalire ad un'epoca in cui le due nubi stellari potevano essersi avvicinate per la prima volta.

## 4.6 Il successo del modello

Le presentazioni di Kapteyn sulle correnti stellari non solo suscitarono un interesse generale, ma portarono anche “nuova acqua ai mulini” di diversi suoi colleghi. Nei tre anni successivi (dal 1906 al 1908), apparvero tre articoli sul tema delle correnti stellari che stabilirono rapidamente il fenomeno come generalmente accettato. Ciò fu dovuto principalmente al fatto che si trattava di articoli pubblicati da astronomi le cui opinioni pesavano molto nella comunità scientifica.

Il primo fu Arthur S. Eddington nel 1906, il quale giudicò la delucidazione e la descrizione matematica del fenomeno delle correnti stellari come un problema critico per l'astronomia del ventesimo secolo (molti astronomi trovarono i suoi scritti sulle

correnti stellari più comprensibili di quelli di Kapteyn). Nell'articolo, *The systematic motions of the stars*, Eddington formulò un test quantitativo applicato a una serie di stelle del Catalogo di Groombridge<sup>3</sup> per le quali erano stati determinati i moti propri da Frank Watson Dyson (1868-1939) e William Grasett Thackeray (1853-1936) a Greenwich. Kapteyn utilizzò le stelle più luminose in tutto il cielo, ma Eddington scelse più stelle su una porzione limitata di cielo, che erano anche più deboli (tra la decima e la nona magnitudine). I suoi risultati furono fortemente a sostegno di Kapteyn e dell'ipotesi delle due correnti stellari, in particolare il numero di stelle appartenente a ciascuna corrente era approssimativamente lo stesso.

Eddington disse quanto segue nel suo discorso introduttivo in occasione della celebrazione del centenario della Royal Astronomical Society nel 1922. Elencò quelli che riteneva fossero i “punti di riferimento eccezionali in questi cento anni”. Il quinto di questi punti affermava:

*“1904 – la scoperta di Kapteyn delle due correnti stellari, l’inizio dell’era moderna delle indagini sul Sistema Siderale [...]. Le due correnti stellari [...] sono state per noi la prima indicazione di qualcosa di simile a un’organizzazione tra la miriade di stelle. Per quanto paradossale possa sembrare, la dualità dell’universo stellare è stata la prima chiara indicazione della sua unità.”*

La seconda persona fu Karl Schwarzschild (1873-1916), all’epoca direttore dell’osservatorio di Gottinga, in un articolo intitolato *Über die Eigenbewegungen der Fixsterne* (“Sui moti propri delle stelle fisse”). Schwarzschild non era convinto dell’idea di dividere il sistema stellare in due flussi distinti e cercò di combinare il tutto in un’unica immagine. Notò che Eddington aveva descritto il sistema come composto da due flussi ciascuno con una distribuzione “maxwelliana”, riferendosi ai moti delle molecole in un gas descritti da James Clerk Maxwell (1831-1879). Ciò significa che in ogni flusso le velocità casuali delle stelle sono sovrapposte al moto sistematico secondo una distribuzione gaussiana (“a campana”), che ha quindi un valore medio che è lo stesso in tutte le direzioni. Schwarzschild sosteneva che esistesse davvero un solo sistema e che le velocità casuali fossero effettivamente distribuite in maniera gaussiana, ma anche che la velocità media avesse due direzioni preferite. In effetti, descrisse la distribuzione come “ellissoidale”: la curva del moto medio in funzione della direzione tracciava un’ellisse. I dati di Eddington portavano infatti a una distribuzione delle velocità che era approssimativamente ellissoidale. Sebbene concettualmente diverso, l’approccio di Schwarzschild non distingueva comunque due flussi separati in termini osservativi.

---

<sup>3</sup>Le stelle di Groombridge costituivano tutte le stelle circumpolari viste dall’Inghilterra, raccolte in un catalogo (e pubblicato postumo) da Stephen Groombridge. In effetti, le circa 4.500 stelle sono tutte a meno di 52° dal Polo Nord Celeste.

In realtà quella di Schwarzschild rappresenta la visione attuale e il concetto di una distribuzione della velocità ellissoidale venne infine incorporato nella teoria dinamica della Via Lattea di Jan Hendrik Oort (1900-1992). Secondo questa teoria, la Via Lattea ruota in modo differenziale, vale a dire che le regioni esterne impiegano progressivamente più tempo per effettuare una rotazione completa rispetto alle regioni più vicine al centro, e il rapporto degli assi dell'ellissoide di velocità è determinato dalla quantità di questa rotazione differenziale.

La terza persona fu Frank Dyson, che analizzò solo i moti delle stelle con grande moto proprio (tra 30" e 80" per secolo) in un articolo sempre dal titolo *The systematic motions of the stars*, confermando sia i risultati di Kapteyn che quelli di Eddington e Schwarzschild. Il modello delle correnti stellari di Kapteyn fu quindi rapidamente accettato.

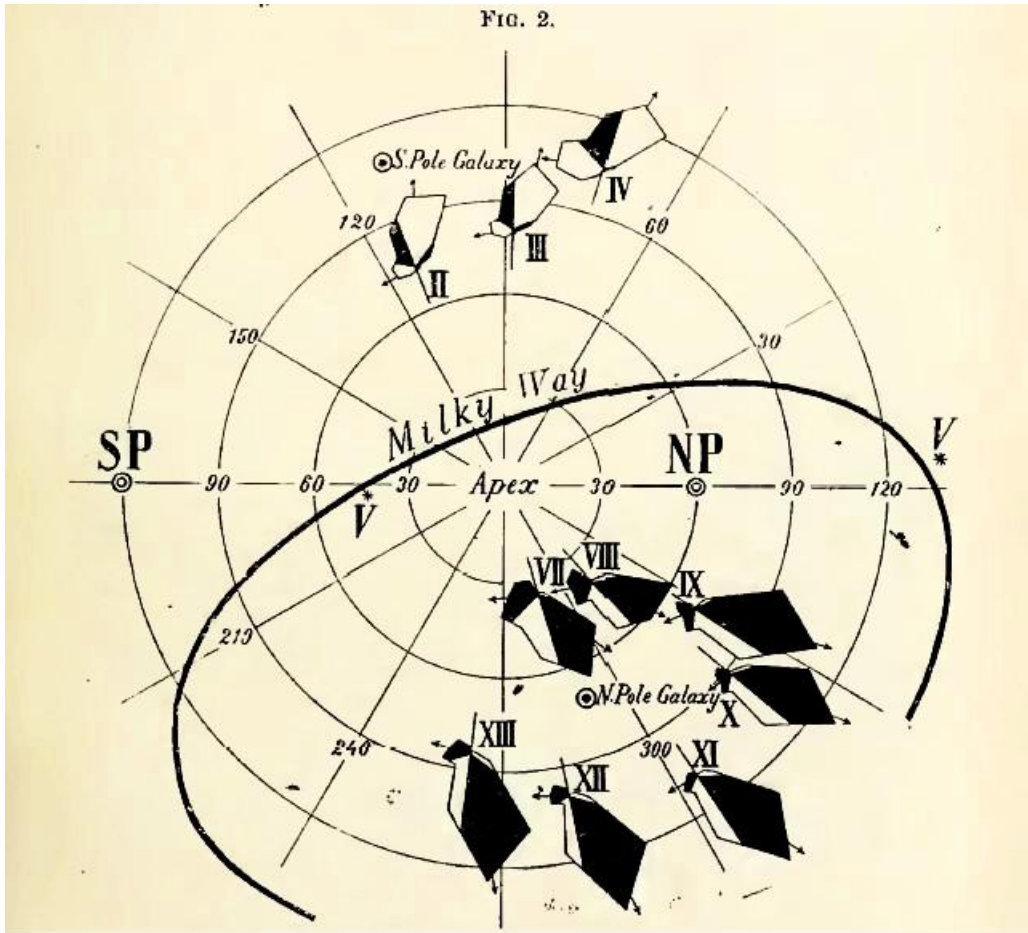


Figura 4.7: Immagine tratta dalla conferenza di Kapteyn del 1904 sui Metodi statistici nell'astronomia stellare all'Esposizione Purchase Louisiana tenutasi a St. Louis, Missouri. (Report of the seventy-fifth meeting of the British Association for the Advancement of Science, South Africa)



# Capitolo 5

## Il Progetto delle Aree Selezionate

### 5.1 La proposta del Progetto delle Aree Selezionate

Il modello delle correnti stellari lasciò il pubblico di Kapteyn con molti spunti di riflessione, ma prima di concludere la sua conferenza lanciò una proposta ai suoi colleghi per affrontare il problema della struttura dell'universo in modo coordinato. L'inaspettata scoperta delle correnti stellari richiedeva un'indagine rinnovata e sistematica sul *sistema siderale*. L'idea che Kapteyn contemplò in quel periodo, e che probabilmente contemplava da tempo, fu di fare un censimento completo del cielo osservando stelle molto deboli in regioni accuratamente scelte. Quest'idea portò al cosiddetto "Progetto delle Aree Selezionate", che fu pubblicato nel 1906. Nella sua Introduzione, Kapteyn scrisse:

*“Lo scopo è quello di riunire, per quanto possibile con tale sforzo, tutti gli elementi che al momento attuale devono sembrare più necessari per una soluzione efficace del problema siderale, cioè il problema della struttura del mondo siderale. [...]”*

La sua proposta fu di riunire insieme i dati completi delle stelle più deboli, più di quanto fosse stato possibile fino ad allora, sfruttando le capacità di misurazione del Laboratorio Astronomico di Groninga. Poiché era impossibile farlo per tutto il cielo, propose di definire un insieme di circa duecento aree, scelte strategicamente per poter campionare il cielo in modo sistematico, escludendo aree che per un motivo o per l'altro sarebbero state problematiche. Ricordò anche che la sua prima proposta di fare un *Durchmusterung* per le parallassi non fu accolta con grande entusiasmo e che all'epoca Gill suggerì di limitarlo a un certo numero di aree piccole per renderlo gestibile. Kapteyn decise di utilizzare quest'ultima idea per il suo Progetto.

Kapteyn era alla ricerca di 200.000 stelle in tutto, per le quali misurare posizioni approssimative e magnitudini (fotografiche e visuali) nettamente definite. Inoltre, per

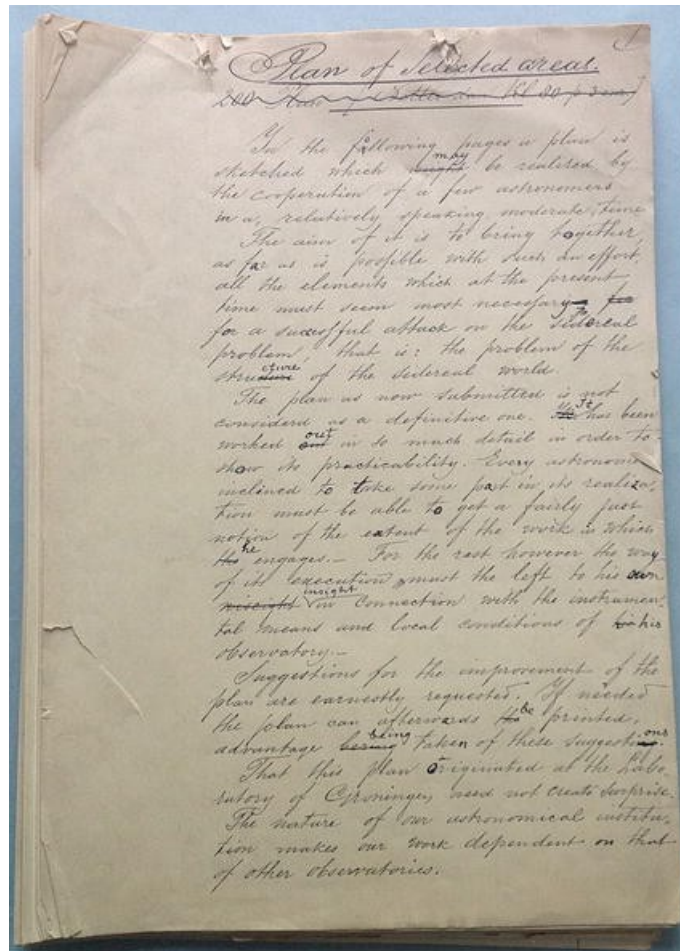


Figura 5.1: Prima pagina dell'introduzione scritta a mano del Progetto delle Aree Selezionate nel manoscritto finale di Kapteyn. (Kapteyn Astronomical Institute)

un insieme di circa 20.000 stelle “opportunamente distribuite in magnitudine”, sarebbero stati determinati anche moti propri (accurati fino a 0,01” all’anno), parallassi (accurate fino a 0,02”), tipi spettrali e velocità radiali.

Sapendo che bisognava arrivare a magnitudini deboli, Kapteyn propose uno sforzo coordinato da parte di diversi osservatori restringendo il lavoro a 206 piccole aree distribuite regolarmente sul piano del cielo, la cui dimensione dipendeva dalla densità superficiale di stelle, per le quali sarebbero stati misurati parametri di quante più stelle possibili. A questo aggiunse anche l’importanza e l’utilità di determinare la quantità totale di luce proveniente da stelle deboli in diverse parti del cielo. Kapteyn presentò il Progetto come segue:

*“Consiste semplicemente in questo: per 206 aree, regolarmente distribuite sul cielo e*

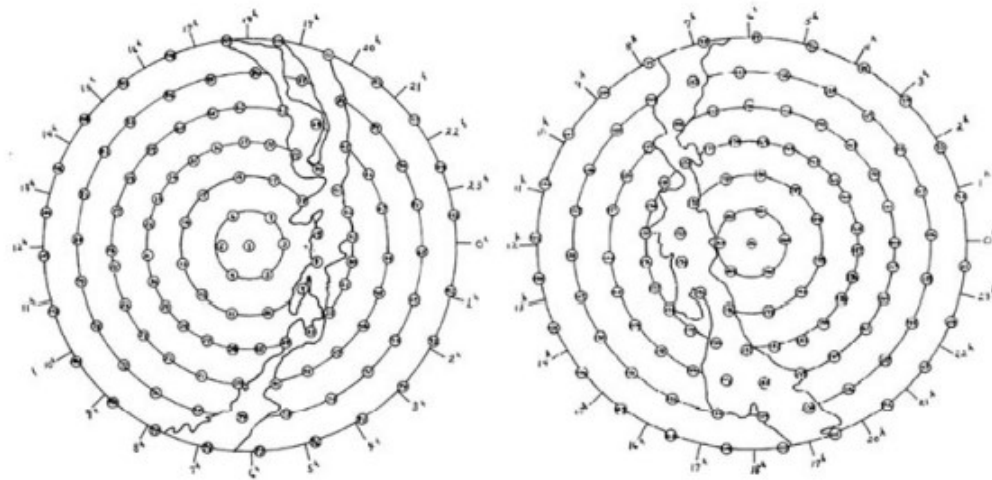


Figura 5.2: La disposizione sistematica delle Aree Selezionate. I campi sono distribuiti lungo linee di declinazione costante distanti  $15^\circ$ . I poli sono al centro, mentre l'equatore nel cerchio più esterno. La banda irregolare è la Via Lattea. (Kapteyn Astronomical Institute)

*per un'altra, meno estesa serie di regioni particolarmente interessanti, per ottenere dati astronomici di ogni genere, per stelle fino a una debolezza tale da poterli ottenere in un tempo ragionevole”.*

Kapteyn riteneva che raccogliere informazioni sulle stelle più deboli in modo imparziale da tutte le aree del cielo, avrebbe contribuito a consolidare l'affidabilità della visione degli astronomi sulla “costruzione dei cieli”. Il tipo di approccio proposto faceva un uso efficiente del tempo di osservazione degli astronomi, poiché garantiva una serie completa di misurazioni prese in parti ampiamente sparse del cielo, senza duplicazioni o lacune nella copertura. Laboratori come quello di Kapteyn a Groninga avrebbero effettuato l'analisi dei dati raccolti negli osservatori di tutto il mondo.

I colleghi di Kapteyn accolsero favorevolmente la sua proposta, anche se ci vollero alcuni anni prima che la comunità astronomica concordasse sulle specifiche del progetto.

## 5.2 La collaborazione con Hale al monte Wilson

L'effetto più immediato della presentazione di Kapteyn fu sul gran maestro della costruzione di telescopi americani, George Ellery Hale (1868-1938), che sedeva nel pubblico. Giovane astronomo dallo spirito imprenditoriale, Hale ascoltò queste idee innovative e coinvolgenti e si sentì attratto da Kapteyn come da uno spirito affine.

Hale era allora direttore dell'Osservatorio Yerkes, il più grande telescopio rifrattore del mondo. Il suo interesse principale era il Sole, e aveva organizzato un incontro a St.

Louis, insieme al Congresso Scientifico Internazionale, specificamente per sollecitare la cooperazione internazionale in questo campo. Nello stesso anno della conferenza di St. Louis, Hale ottenne una dotazione dal Carnegie Institute di Washington per un nuovo osservatorio solare sul Monte Wilson. Il telescopio principale di questo osservatorio solare (*“Telescopio Hale”*) divenne operativo nel 1908, e con i suoi 60 pollici fu a sua volta il più grande del mondo fino al 1917, quando Hale raccolse fondi per un telescopio da 100 pollici<sup>1</sup> di diametro (*“Telescopio Hooker”*) da erigere vicino quello già esistente in cima al Monte Wilson.



Figura 5.3: L'Osservatorio del Monte Wilson illustrato nella biografia di Kapteyn di Henriette Hertzprung-Kapteyn.

Nella carriera di Kapteyn, tre persone furono essenziali, ognuna delle quali fornì opportunità in un momento critico. Il primo fu ovviamente David Gill, che “invitò” Kapteyn a lavorare al Cape Photographic Durchmusterung. Il secondo fu l'astronomo finlandese Anders Donner (1854-1938), che per primo – quando la *Carte du Ciel* respinse l'idea di Kapteyn di misurare le parallassi con esposizioni multiple – fornì materiale fotografico per verificare il metodo e in seguito contribuì con altro materiale fotografico per gli studi di Kapteyn. Il terzo fu George Hale, che offrì non solo supporto al progetto delle Aree Selezionate ma, come vedremo, propose anche a Kapteyn di trascorrere gran parte del suo tempo al Monte Wilson per un certo numero di anni.

Kapteyn, tuttavia, anche se avrebbe misurato volentieri tutte le stelle del cielo, riconobbe la necessità di limitare i suoi sforzi. Per questo decise di fare un appello

---

<sup>1</sup>Questo telescopio rimase il più grande del mondo fino alla costruzione nel 1948 di un telescopio da 200 pollici all'Osservatorio di Monte Palomar, California.

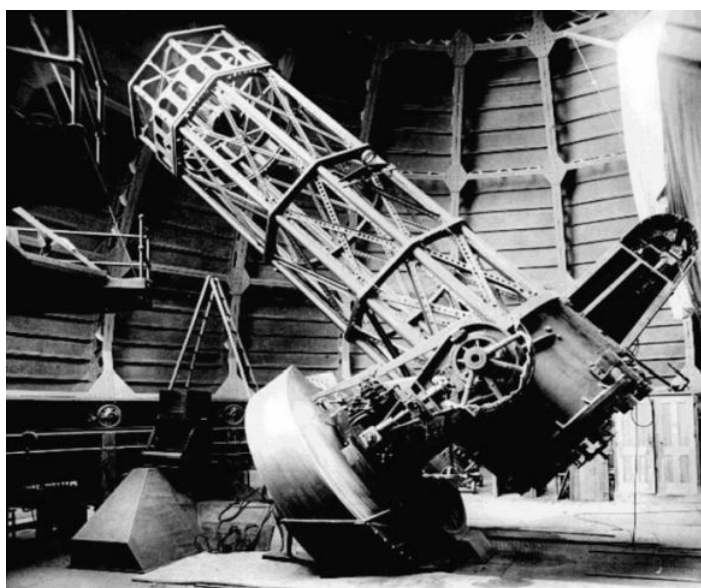


Figura 5.4: Il telescopio da 60 pollici dell'Osservatorio del Monte Wilson. (Huntington Digital Library)

alla cooperazione internazionale, consapevole che era impossibile intraprendere la leadership e il coordinamento da solo. Così chiese a Sir David Gill, al Prof. Edward C. Pickering, al Prof. George E. Hale, al Prof. Karl Kustner, al Prof. Karl Schwarzschild, Sir Frank Dyson e Walter S. Adams, uomini che rappresentavano il mondo astronomico di quei tempi, di entrare a far parte di un comitato, un invito che ognuno di loro accettò. Questo comitato fu infatti costituito nell'estate del 1907, composto inizialmente da Gill (Cape), Pickering (Harvard), Hale (Mt. Wilson), Kustner (Bonn) e Kapteyn. Nel 1910 fu ampliato nominando Schwarzschild (Gottinga), Dyson (Edimburgo e Greenwich dal 1910 in poi) e Adams.

Il comitato si riunì due volte nelle fasi iniziali: la prima volta a Parigi nel 1909 in occasione di una riunione della Commissione permanente del progetto Carte du Ciel, e la seconda volta con tutti i membri presenti al Monte Wilson nel 1910 durante una riunione dell'Unione Solare.

Negli anni successivi apparirono dei "rapporti sui progressi", ovvero raccolte di contributi da parte dei vari membri: il primo e il secondo di questi apparvero nel 1911. Il terzo rapporto fu pubblicato solo nel 1923, dopo la morte di Kapteyn, da Pieter van Rhijn, mentre il quarto apparve nel 1930 nel "Bollettino degli Istituti Astronomici dei Paesi Bassi".

Come vedremo, Hale seguì la sua inclinazione ad aiutare Kapteyn, e durante la riunione di St. Louis prese decisioni che alla fine avrebbero legato non solo Kapteyn, ma generazioni di astronomi olandesi, all'Osservatorio del Monte Wilson.

### 5.3 La produzione del Progetto delle Aree Selezionate

Nel 1906, Kapteyn fu in grado di pubblicare il Progetto delle Aree Selezionate, dopo essersi assicurato il sostegno di diversi astronomi importanti. Per raggiungere questo obiettivo dovette certamente adattare le proprie idee. Ad esempio, Henriette Hertzsprung-Kapteyn scrisse che Pickering aveva proposto di indagare su altre 46 aree speciali che mostravano delle peculiarità, come zone vuote o insolitamente dense, per lo più nella Via Lattea, le quali furono poi aggiunte al Progetto. Si ritiene che Kapteyn non fosse troppo d'accordo con questa idea ma l'aiuto di Pickering era essenziale, così accettò.

Nel 1907, tornato a casa a Groninga, Kapteyn si era assicurato tutta la cooperazione che poteva sperare di ricevere. Il Laboratorio Astronomico di Kapteyn così prese vita. L'astronomo americano Frederick Seares (1873-1964), che lavorò per anni all'Osservatorio di Monte Wilson, osservò:

*"Kapteyn presentò la figura unica di un astronomo senza telescopio. Più precisamente, tutti i telescopi del mondo erano suoi".*

Kapteyn, nel frattempo, tornò al problema di determinare le caratteristiche fondamentali del sistema stellare, ma stavolta senza fare l'ipotesi che i moti delle stelle fossero casuali. Trascorse più tempo a discutere con i direttori degli Osservatori e i loro dipendenti, facendo capire loro che avrebbero contribuito a svelare l'architettura dell'Universo. Le vacanze estive di tre mesi che iniziò a trascorrere sul Monte Wilson su invito di Hale, si rivelarono l'occasione ideale per lui di fare un passo indietro e prendere la "visione lunga".

Kapteyn fece la sua prima visita al Monte Wilson nel 1908. Gli uffici principali dell'Osservatorio si trovavano allora, come oggi, nella città di Pasadena, vicino alle pendici dei Monti San Gabriel nel sud della California. Dalla periferia della città una strada accidentata conduceva al Monte Wilson, il cui punto più alto è a quasi 1800 metri sul livello del mare, dove si trovavano la cupola che riparava il telescopio da 60 pollici di diametro e a un edificio dormitorio in legno per gli osservatori.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>Non c'erano alloggi per le famiglie, per cui la prima volta si accampò con Elise, che l'aveva accompagnato in quel viaggio, in una tenda. L'anno successivo, tuttavia, scoprirono, con loro sorpresa



Figura 5.5: Il “Kapteyn Cottage” all’Osservatorio di Monte Wilson nel periodo in cui soggiornarono Kapteyn e la moglie, illustrato nella biografia di Henriette Hertzprung-Kapteyn.

## 5.4 Il Durchmusterung di Harvard-Groninga

Il Progetto delle Aree Selezionate fu portato avanti molto attivamente nei vari osservatori dei diversi paesi, soprattutto nel corso dei primi decenni dopo il suo inizio.

Una parte importante del lavoro riguardò la collaborazione con Edward Pickering ad Harvard, con il quale Kapteyn completò un Durchmusterung delle Aree Selezionate, anche noto come *Harvard-Groningen Durchmusterung*. L’obiettivo era quello di ottenere un catalogo di stelle nelle Aree Selezionate con posizioni e magnitudini relativamente accurate fino alla sedicesima magnitudine.

Kapteyn propose inizialmente di lavorare considerando aree di  $75' \times 75'$ , ma per evitare di prolungare eccessivamente il processo di misura e di riduzione, propose di limitare tali aree nelle zone di cielo con densità maggiori di stelle.

Il lavoro fu eseguito utilizzando fotografie ottenute con il telescopio Metcalf da 16 pollici all’Osservatorio di Harvard (tra il 1910 e il 1912) per la parte settentrionale, e con il telescopio Bruce da 24 pollici all’Osservatorio Boyden ad Arequipa, in Perù (tra il 1906 e il 1916) per la parte meridionale, e misurate al Laboratorio Astronomico di Groninga da Kapteyn, e in seguito da van Rhijn e dai suoi collaboratori. Il numero totale di stelle catalogate fu di 231.118.

Inizialmente le magnitudini venivano calibrate attraverso una serie di osservazioni speciali, per poter poi misurare le magnitudini delle stelle in ciascun campo, portando

---

e gioia, che Hale aveva ordinato di costruire per loro una piccola casa di legno sulla cima della montagna. Il Kapteyn Cottage, come divenne noto, è ancora oggi in piedi, dopo essere stato ampliato e modernizzato nel 1995.

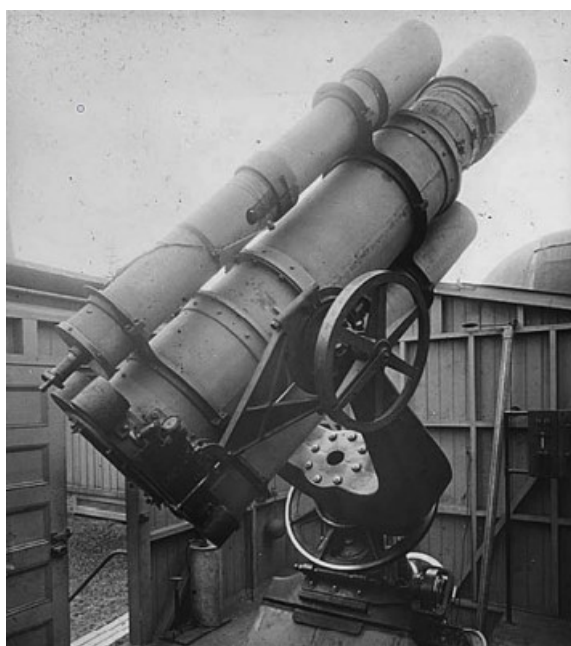


Figura 5.6: Il telescopio Metcalf da 16 pollici dell'Osservatorio di Harvard, che è stato usato per la parte settentrionale del Durchmusterung per le Aree Selezionate. (Harvard College Observatory)

alla definizione di una cosiddetta “sequenza di stelle standard”. Si trattava di una procedura molto rigorosa. Per prima cosa, si prendeva in considerazione una serie di magnitudini adottate per 96 stelle vicino al Polo Nord. Usando questa “Sequenza Polare Nord” e le regioni standard di Harvard ad essa correlate, tutte le altre magnitudini venivano messe su una scala uniforme. Di conseguenza, le magnitudini risultanti costituivano quella che fu definita la “Scala internazionale delle magnitudini”. A tal fine, furono utilizzate esposizioni della Sequenza Polare Nord e di una o due regioni standard di Harvard e alcune delle Aree Selezionate di Kapteyn. Tutte queste lastre vennero poi sviluppate insieme e misurate. Le immagini risultanti portarono a definire una sequenza composta da almeno una dozzina di “stelle standard” con magnitudini note per ciascuna delle Aree Selezionate dalla 1 alla 115. Nell'Introduzione di Pickering questo lavoro è accreditato all'astronoma americana Henrietta Swan Leavitt<sup>3</sup> (1868-1921) e ai suoi assistenti.

---

<sup>3</sup>Henrietta Leavitt faceva parte del gruppo di astronome di Harvard (“harem di Pickering”); divenne famosa per la sua scoperta della relazione periodo-luminosità delle Cefeidi, ovvero stelle pulsanti nelle fasi avanzate dell'evoluzione stellare, in cui la luminosità cambia periodicamente durante la pulsazione. Poiché la magnitudine assoluta di una Cefeide può essere derivata dal periodo della sua variazione di luminosità, queste stelle si sono dimostrate cruciali per la determinazione delle distanze in astronomia.



Kapteyn e Pickering firmarono nel 1918 il primo “fascicolo” del risultante *Harvard-Groningen Durchmusterung*, che ricopriva le aree del cielo settentrionale, mentre la parte meridionale fu pubblicata da van Rhijn nel 1924, quando Pickering e Kapteyn erano deceduti.

## 5.5 Ulteriori progressi del Progetto

La magnitudine limite di 16 era troppo luminosa, secondo Kapteyn. Mentre si trovava al monte Wilson, organizzò quindi un *Durchmusterung* delle Aree Selezionate per ottenere le magnitudini di stelle più deboli della sedicesima magnitudine e a tal fine fu cruciale l'adozione del Progetto da parte di Hale come programma di osservazione principale per l'allora nuovo telescopio da 60 pollici. Questo richiese il coinvolgimento di Kapteyn, che, quando il telescopio divenne operativo nel 1908, venne nominato Ricercatore Associato del Carnegie Institution. Iniziò quindi a fare delle visite annuali al monte Wilson finché la Prima Guerra Mondiale non gli impedì di tornare dopo il 1914. Nonostante questo, rimase Ricercatore Associato fino alla sua morte nel 1922.

A partire dal 1908 vennero fornite lastre di tutte le Aree Selezionate settentrionali (dalla 1 alla 139), ma i risultati furono pubblicati solo nel 1930 in un catalogo intitolato *Mount Wilson Catalogue of Photographic Magnitudes in Selected Areas 1-139*.

Walter Adams (1876-1926), assistente del direttore fino al 1923, usò il telescopio da 60 pollici per la parte spettroscopica, in particolare per determinare le velocità radiali. Frederick Seares, capo fotometrista, si occupò della parte fotometrica. Il *Durchmusterung* delle Aree Selezionate progredì in maniera relativamente rapida. Ciò fu dovuto in parte al forte sostegno di Pickering e Hale, e in parte al coinvolgimento personale di Kapteyn e del suo Laboratorio a Groninga. Tuttavia, fu in gran parte perché questa era la parte più semplice e meno dispendiosa in termini di tempo del lavoro e ovviamente la più urgente. Le misure accurate di posizioni, magnitudini e colori fondate sulle stelle standard, erano invece molto dispendiose in termini di tempo e furono eseguite a un ritmo molto più lento. Inoltre, poiché questo lavoro fu svolto da vari osservatori in molti luoghi diversi, richiese ovviamente molto più tempo per essere completato.

Si rese anche necessario ottenere un inventario affidabile e uniforme delle stelle più luminose, poiché le Aree Selezionate coprivano solo una piccola frazione del cielo e i loro centri erano scelti in modo tale che il campo fosse dominato da stelle poco luminose. A tal fine, Kapteyn raccolse i conteggi stellari da tutti i cataloghi e le fonti disponibili e pubblicò i risultati nel 1908 nell'articolo *On the number of stars of determined*

*magnitude and determined Galactic latitude* (“Sul numero di stelle di magnitudine determinata e latitudine galattica determinata”). Decise di fornire tali dati in una scala di magnitudini uniforme, ovvero la “Scala di Harvard”, definita utilizzando la Sequenza Polare Nord, ma diversa dalla “Scala Internazionale” illustrata precedentemente, anche se le due scale erano legate tra loro da relazioni semplici.

### 5.5.1 Il Durchmusterung di Bergedorf

Il Laboratorio Astronomico di Groninga giocò il ruolo centrale che Kapteyn aveva previsto. Oltre al Durchmusterung di Harvard-Groninga e al Mount Wilson Catalogue e alle misure di parallassi e di moti propri, il Laboratorio fu coinvolto in un altro grande progetto riguardante le classificazioni spettrali. Venne proposto da van Rhijn a Friedrich Karl Arnold Schwassmann (1870-1964) dell’Osservatorio di Bergedorf (Amburgo, Germania). L’indagine, che divenne nota come il *Bergedorfer Durchmusterung*, mirava a determinare le classi spettrali di stelle nell’intervallo di magnitudini da 8,5 a 11. Il metodo richiedeva di ottenere immagini fotografiche del cielo con un prisma posto davanti all’obiettivo primario del telescopio (un cosiddetto “prisma obiettivo”), in modo che ogni immagine stellare fosse sostituita con un piccolo spettro sulla lastra fotografica. I risultati vennero pubblicati in cinque volumi (*Bergedorfer Spektral-Durchmusterung der 115 nordlichen Kapteynschen Eichfelder*, 1935-1953).

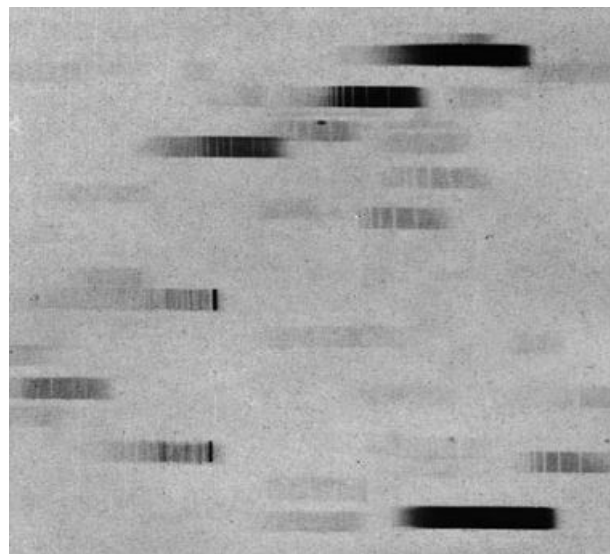


Figura 5.7: Riproduzione di una lastra con immagini prodotte con un prisma-obiettivo per il Durchmusterung di Bergedorf. (Kapteyn Astronomical Institute)

Il lavoro sul *Durchmusterung* di Bergedorf non fu comunque un buon uso di tempo e risorse. L'astronomo olandese Adriaan Blaauw (1914-2010) sottolineò spesso il fatto che era stato uno sforzo così grande che si poteva fare poco altro al Laboratorio. Era anche solito lamentarsi del fatto che l'opera non fosse stata nemmeno onorata con l'inserimento della città di Groninga nel nome. Va tuttavia riconosciuto che la determinazione di van Rhijn della "curva di luminosità" in un articolo del 1925, intitolato *On the frequency of the absolute magnitudes of the stars* ("Sulla frequenza delle magnitudini assolute delle stelle"), fu un risultato importante. Sopravvisse per molto tempo come la "funzione di luminosità di van Rhijn" standard.

Nel frattempo, l'astronomia aveva preso una svolta verso l'astrofisica e la ricerca di interpretazioni piuttosto che la raccolta e la catalogazione di dati. Leida, in gran parte attraverso l'influenza di Kapteyn, si riorganizzò in un centro di ricerca in senso lato, non essendo più occupata esclusivamente con l'astronomia posizionale come lo era stata sotto Kaiser e van de Sande Bakhuyzen. Le posizioni di rilievo a Leida furono presto occupate da protetti di Kapteyn, in particolare Willem de Sitter, Ejnar Hertzsprung e Jan Oort, mentre Kapteyn stesso tornò brevemente a Leida come vicedirettore dopo il suo pensionamento formale. Il laboratorio di Groninga entrò in un profondo declino fino alla nomina di Adriaan Blaauw a direttore nel 1957.

## 5.6 La fine non ufficiale del progetto

Il Progetto delle Aree Selezionate fu mai completato? Non in maniera ufficiale, ma in fondo il Progetto non aveva un obiettivo finale specificato se non quello di raccogliere quanti più dati di quante più stelle possibili nelle aree designate. Il suo impatto non dipendeva in alcun modo dal suo "completamento". Prima di tutto, l'esecuzione relativamente rapida del *Durchmusterung* di Harvard-Groninga fornì un censimento molto importante per quanto riguarda la distribuzione stellare nel cielo. E le stelle che furono usate come calibratori di magnitudine, determinate ad Harvard e al monte Wilson, rappresentarono un sistema uniforme "a tutto cielo" di calibrazione standard. Un importante risultato del Progetto delle Aree Selezionate fu proprio il fatto che portò gli astronomi degli osservatori sparsi nel mondo a cooperare e concordare un programma di ricerca, cosa che si rivelò di cruciale importanza in varie occasioni.

La Seconda Assemblea Generale dell'Unione Astronomica Internazionale, che si tenne a Cambridge, Inghilterra, nel luglio 1925, invitò il professore van Rhijn a formare un nuovo Comitato sulle Aree Selezionate sotto gli auspici dell'Unione. Egli suggerì che il comitato dovesse essere riorganizzato e che sarebbe stato vantaggioso avere un resoconto ogni tre anni sui progressi del lavoro. Da allora in poi il ruolo del comitato venne assunto dalla Commissione 32 ("Aree selezionate") dell'Unione Astronomica

Internazionale, e in seguito, nel 1958, in un Sottocomitato sulle Aree Selezionate della Commissione 33 (“Struttura e Dinamica del Sistema Galattico”).

La fine non ufficiale del Progetto delle Aree Selezionate può essere considerata il Simposio n. 1 dell’Unione Astronomica Internazionale sul “Coordinamento della ricerca Galattica”, organizzato dal Laboratorio Astronomico Kapteyn nel giugno 1953, presso la tenuta Vosbergen vicino a Groningen, che era di proprietà dell’Università. Lo “Scopo e il carattere della conferenza”, è stato descritto come segue:

*“Durante il primo terzo di questo secolo un’importante concentrazione di lavoro sulla struttura e sui moti galattici è stata promossa dal Progetto delle Aree Selezionate, iniziato nel 1906 da Kapteyn. Sebbene lo schema delineato nel 1906 non abbia perso il suo significato, è opinione diffusa che ulteriori ricerche sulla struttura e la dinamica della Galassia dovrebbero essere estese oltre il Progetto originale. Allo stesso tempo, molti sentono che un qualche tipo di coordinamento degli sforzi rimane altamente auspicabile, se non altro perché il valore di molte osservazioni può essere notevolmente migliorato se i dati possono essere combinati con altri dati per le stesse stelle [...].”*



Figura 5.8: Jacobus Kapteyn

**Parte II**  
**L'Universo di Kapteyn**

## Capitolo 6

# Harlow Shapley e gli studi sugli ammassi

Nel 1917, un giovane astronomo laborioso e risoluto di nome Harlow Shapley scrisse una nota sul suo lavoro al Monte Wilson a Kapteyn, che aveva incontrato durante l'ultima visita di quest'ultimo, ormai anziano, a Pasadena. Nella nota, Shapley esprimeva la sua fiducia nell'ottenere dei risultati interessanti dallo studio degli ammassi globulari: *“Il lavoro sugli ammassi procede in maniera monotona – monotona per quanto riguarda il lavoro, ma i risultati sono un piacere continuo. Dammi abbastanza tempo e otterrò qualcosa dal problema”*. La previsione di Shapley non fu solo corretta, ma apparve modesta in quanto i suoi risultati andarono ben oltre essa.

Nello stesso anno, sintetizzando il suo lavoro sulle distanze degli ammassi globulari e mappando la loro distribuzione nello spazio, affermò che il Sole non si trovava al centro del sistema stellare, ma apparteneva a un angolo indistinto di una galassia nuovamente ridefinita. In questo modo, Shapley, come lui stesso ritenne, fomentò una rivoluzione copernicana, spostando ancora una volta il posto dell'uomo nel cosmo dal centro alla periferia.

Prima di arrivare a queste importanti conclusioni, è opportuno capire le circostanze che portarono entrambi gli astronomi all'Osservatorio di Monte Wilson nell'autunno 1914.

Harlow Shapley nacque nel Missouri nel 1885, e nello stesso periodo in cui Hale e Kapteyn partecipavano al congresso astronomico del 1904 a St. Louis, lavorava ancora dall'altra parte dello Stato come reporter per un giornale. Non ebbe l'opportunità di frequentare il liceo, tuttavia, riuscì a ricevere una rudimentale istruzione secondaria, per poi studiare astronomia all'Università del Missouri. Successivamente vinse una borsa di studio all'Osservatorio di Princeton, dove ottenne quasi diecimila misure fotometriche per l'analisi di 90 binarie ad eclissi, aumentando così di un ordine di grandezza

il numero di orbite di binarie ad eclissi conosciute.

Mentre Shapley completava la sua tesi, Seares, il suo insegnante universitario che nel frattempo si era trasferito all'Osservatorio di Monte Wilson, organizzò per il giovane un incontro con Hale, che sarebbe passato per New York mentre era diretto verso una conferenza in Russia. Shapley, non volendo perdersi questo importante incontro con il direttore dell'Osservatorio, partì per Manhattan il giorno prima e alla fine ottenne il posto. Arrivò a Pasadena nella primavera del 1914, e presto divenne un osservatore regolare con il riflettore da 60 pollici. Divise il suo sforzo tra binarie a eclissi, variabili Cefeidi e fotometria di stelle in ammassi, sia galattici che globulari.

Nell'autunno di quell'anno Shapley incontrò Kapteyn sul Monte Wilson, un incontro che anni dopo descrisse nelle sue memorie, *Through Rugged Ways to the Stars: "Portai a Kapteyn le mie prime misure sulla distanza degli ammassi globulari [...] Le guardò e mi suggerì di controllare di nuovo le mie osservazioni. In altre parole, non accettò il risultato. Ma era gentile al riguardo, perché io ero un bravo giovane e lui era un simpatico vecchio."*

Nel giro di pochi anni dal suo arrivo al Monte Wilson, Shapley si affermò come un autore prolifico, pubblicando una serie intitolata *Studies of the Magnitudes in Star Clusters* nei *Proceedings of the National Academy of Sciences* ("Atti dell'Accademia Nazionale delle Scienze") e un'altra intitolata *Studies Based on the Colors and Magnitudes in Stellar Clusters* nella raccolta *Contributions from the Mount Wilson Observatory* ("Contributi dall'Osservatorio Solare di Monte Wilson") e nell'*Astrophysical Journal*.

L'8 gennaio 1918, Shapley scrisse a Eddington di una nuova svolta arrivata "con sorprendente rapidità e precisione" e che "sembrava aver chiarito l'intera Struttura Siderale". Secondo Shapley, i risultati più importanti per il problema del Sistema Galattico venivano dagli studi sugli ammassi: in particolare la determinazione delle distanze e della distribuzione spaziale degli ammassi.

*"Gli ammassi globulari delineano il Sistema Siderale, ma "evitano" il piano della Via Lattea. [...] Tutte le nostre stelle visibili ad occhio nudo, le nebulose irregolari, le binarie a eclissi, tutto ciò che conosciamo e chiamiamo remoto, [appartengono a questo sistema] tranne quegli ammassi globulari compattamente formati, alcune variabili esterne di tipo ammasso, le Nubi di Magellano, [e] forse, le nebulose a spirale. Gli ammassi globulari possono formarsi ed esistere solo nelle parti dell'universo in cui il materiale stellare è meno denso e le forze gravitazionali meno potenti che lungo il piano galattico. Questa visione del sistema generale, temo, richiederà alterazioni nelle nostre idee sulla distribuzione e la densità stellare nel*



*Sistema Galattico. Quanto sopra è abbozzato e arrogante, lo so, e non ho molte scuse per questo. Sarai in grado di vedere tutte i risultati che ho, e probabilmente molti altri; quindi, non c'è alcun bisogno urgente per me di riassumere ulteriormente”.*

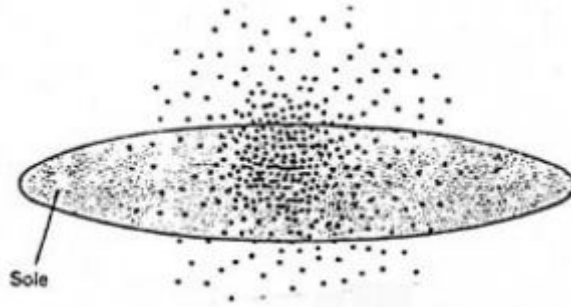


Figura 6.1: Distribuzione degli ammassi globulari nell'Universo di Shapley, in cui si nota la posizione eccentrica del Sole. (Crediti: [49])

L'astronomo tedesco Walter Baade (1893-1960), in seguito, commentò questo risultato: *“Ho sempre ammirato il modo in cui Shapley concluse l'intero problema in un tempo molto breve, finendo con un'immagine della Galassia che distrusse quasi tutte le idee della vecchia scuola sulle dimensioni Galattiche.”*

Shapley non diede questa notizia così prontamente a Kapteyn. Era chiaro che si sentisse molto più vicino a Eddington, forse in parte perché erano quasi coetanei, e ad ottobre, dopo che Eddington ebbe letto i risultati non ancora pubblicati di Shapley, rispose: *“Penso che non sia eccessivo dire che questo segna un'epoca nella storia dell'astronomia, quando il confine della nostra conoscenza dell'universo è ritornato indietro di cento volte il suo limite precedente”*. Shapley ammirava il libro di Eddington, *Stellar Movements and the Structure of the Universe*, in cui il modello delle correnti stellari era spiegato molto più chiaramente di quanto Kapteyn avesse fatto.

Pochi mesi dopo aver descritto la sua nuova visione della Via Lattea a Eddington, Shapley scrisse a Kapteyn, ma non così arditamente. Nella lettera descrisse quello che era un sistema vagamente definito di nubi nella Via Lattea attraversato da un ammasso di stelle di tipo B, similmente alla situazione delle correnti stellari presentate da Kapteyn nel suo discorso del semicentenario della National Academy of Sciences. Shapley concluse dicendo: *“Tutto sembra indicare una preferenza per le tue interpretazioni originali sul flusso locale rispetto alle più recenti ipotesi generali.”*

Shapley pubblicò una serie di dodici articoli, intitolata *Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters*, di cui gli ultimi sette (articoli 6-12) furono pre-

pubblicati nella raccolta *Contributions from the Mount Wilson Observatory* (numeri 151-157). Questi sette articoli rappresentarono uno sforzo congiunto volto a stabilire le distanze degli ammassi globulari, della Piccola Nube di Magellano e della stessa Via Lattea. L'ultimo articolo di questa parte della sequenza (il numero 12), datato aprile 1918, apparve anche nell'*Astrophysical Journal* del giugno 1919. Con quell'articolo Shapley sconvolse la visione tradizionale del sistema della Via Lattea e mise in moto le idee che hanno plasmato la concezione moderna della nostra Galassia.

## 6.1 L'Universo di Shapley

La visione comunemente accettata della Via Lattea nel 1918 era quella di un sistema stellare di forma lenticolare con un diametro dell'ordine di 10.000 anni luce e con il Sole vicino al centro del sistema. Questa era anche la visione sostenuta da Kapteyn, ma poiché le pubblicazioni definitive sulla Struttura Siderale sarebbero uscite anni dopo nell'*Astrophysical Journal* nel 1920 e nel 1922, Shapley non ne fece menzione nel suo articolo del 1919.

In contrasto con la visione tradizionale, nella prima parte dell'articolo 12, Shapley immaginò un grande sistema stellare con un diametro equatoriale di circa 300.000 anni luce e con un centro distante circa 50.000 anni luce dal Sole. Queste distanze, come oggi è noto, erano tra due e tre volte troppo grandi, in gran parte perché, in assenza di qualsiasi evidenza di assorbimento interstellare generale, non erano state apportate correzioni al riguardo.

In quanto tempo Kapteyn scoprì l'audace e la speculativa visione di Shapley della Via Lattea? Mentre Eddington ricevette la serie di articoli a ottobre del 1918, non sembrò esserci alcuna corrispondenza esistente che suggerisse una reazione immediata da parte di Kapteyn. Quest'ultimo scrisse alcune lettere a Hale nei mesi successivi, ma in ogni caso, non vi fu alcuna menzione di Shapley e del suo lavoro, inoltre la guerra ritardava l'arrivo della posta al continente americano. Solo nel giugno del 1919, Kapteyn scrisse finalmente una risposta ponderata e molto interessante a Shapley riguardo la sua nuova concezione della Via Lattea:

*“Ho finalmente letto con una certa cura tutta la tua serie di 12 articoli. [...] Non oso dire di aver padroneggiato il tutto. Allo stato attuale della mia memoria devo leggere più volte documenti ampi e con molte sfaccettature come questi prima di poter dire questo. Quello che posso dire è che ho letto il tuo lavoro con il massimo piacere e che lo ammiro molto. La grande quantità di lavoro svolto, le generalizzazioni audaci e la pienezza di risorse che ti fanno trovare il modo di affrontare ogni difficoltà, sono molto belle da vedere. Nel frattempo, anche se almeno nell'ultimo articolo si tratta*

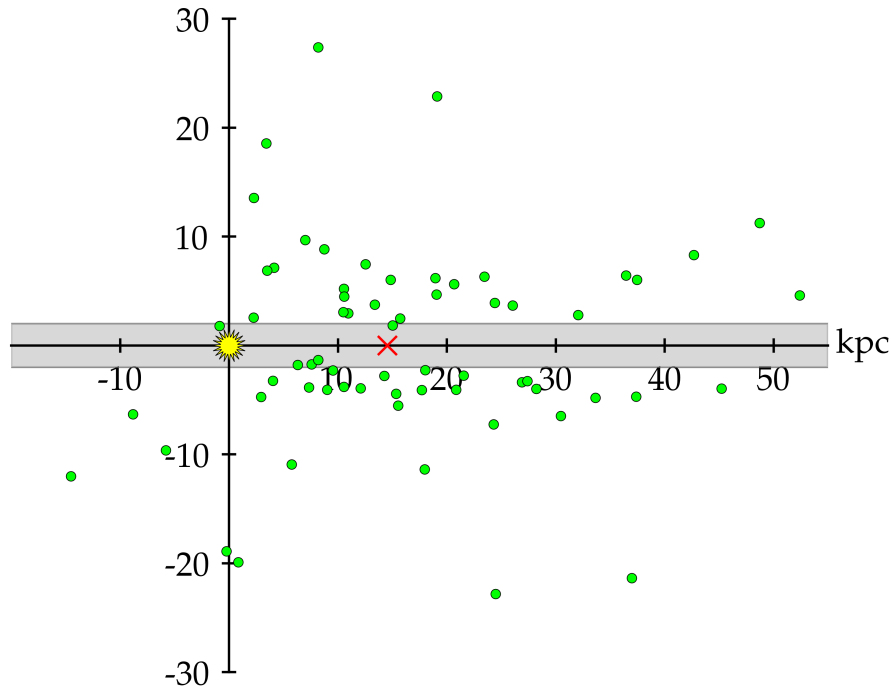


Figura 6.2: Grafico basato sui dati originali di Shapley sugli ammassi globulari del 1918. Il sole si trova nell'origine degli assi, indicato dal simbolo giallo, mentre il centro della Via Lattea calcolato dalla distribuzione degli ammassi globulari è indicato dalla X rossa a circa 15 kpc dal Sole. La banda grigia orizzontale è una regione di oscuramento notata da Shapley. (Crediti: Richard W. Pogge, Ohio State University)

*della disposizione generale dell'Universo Siderale, l'argomento che, più di ogni altro, costituisce il soggetto del lavoro del nostro Laboratorio, il tuo lavoro incontra molto poco il nostro. Devo ripetere ciò che, all'epoca, dissi a Easton. Tu stai costruendo dall'alto, mentre noi andiamo in alto dal basso. Tu parti dal sistema generale nella sua massima estensione, noi cerchiamo di farci strada faticosamente dai nostri dintorni più vicini. [...] Non ti aspetterai quindi che io entri in una discussione seria, piuttosto generale, del tuo lavoro. Non mi sento in grado di farlo. Sempre a riprova del mio grande interesse, potrei forse fare alcune osservazioni scollegate."*

Kapteyn continuò osservando come il lavoro di Shapley dimostrasse l'assenza di assorbimento (sul quale aveva grande motivo di preoccupazione). Inoltre, menzionò la funzione di luminosità stellare, e poi si rivolse alla calibrazione della relazione periodo-luminosità delle variabili Cefeidi. *"Non sarebbe di grande importanza rafforzare la determinazione della distanza delle variabili Cefeidi, che ora, in ultima istanza, si basa su undici stelle?"* chiese, e poi procedette a delineare come ottenere moti propri per

più Cefeidi.

L'argomento finale di Kapteyn fu:

*“Sulla tua teoria generale del sistema stellare non mi permetto di dire molto. Finora trovo la simmetria del sistema in tutte le direzioni di uguale latitudine galattica tale che per me sarebbe davvero molto difficile ammettere la posizione enormemente eccentrica postulata da te. Per questa volta, mi sento di fare queste osservazioni sparse. [...] Quanto sarebbero più facili le cose se potessimo parlare”.*

# Capitolo 7

## Kapteyn e van Rhijn

La ricezione della vasta raccolta di articoli di Shapley, e la pressione del suo imminente pensionamento, devono aver spronato Kapteyn in uno sforzo urgente di pubblicare almeno alcuni risultati preliminari dalle sue ricerche. Nei mesi che seguirono, Kapteyn e van Rhijn completarono un articolo intitolato *On the distribution of the stars in space especially in the high Galactic latitudes* (“Sulla distribuzione delle stelle nello spazio in modo particolare nelle alte latitudini Galattiche”), che divenne il breve, classico contributo che illustrò definitivamente quello che oggi è noto come Universo di Kapteyn.

*“Ora che, dopo così tanti anni di preparazione, i nostri dati sembrano finalmente essere sufficienti allo scopo [di rendere possibile un trattamento elaborato della disposizione delle stelle nello spazio], non siamo stati in grado di frenare la nostra curiosità e abbiamo deciso di portare a termine completamente una piccola parte del lavoro, anche se, così facendo, le regole per una rigida economia del lavoro non possono essere del tutto rispettate”.*

Come rivela il titolo stesso dell’articolo, gran parte del lavoro di Kapteyn e van Rhijn riguardava i conteggi stellari alle latitudini più elevate, prendendo in considerazione la distribuzione delle stelle in funzione della magnitudine apparente e del moto proprio. Questo risultò nella curva di luminosità mostrata in 7.1.

Il metodo di Kapteyn e van Rhijn prevedeva che questa curva fosse indipendente dalla distanza dal Sole e richiedeva di convertire i conteggi stellari in densità spaziali, usando metodi analitici sviluppati da Karl Schwarzschild nel 1910 per il caso in cui la curva di luminosità avesse una forma gaussiana.

Questo portò quindi a una formula che esprime la densità delle stelle in funzione della distanza. Entro 20 pc è più o meno costante (0,0451 stelle per parsec cubico) e poi scende, prima rapidamente, raggiungendo la metà di questo valore a circa 200 pc, e

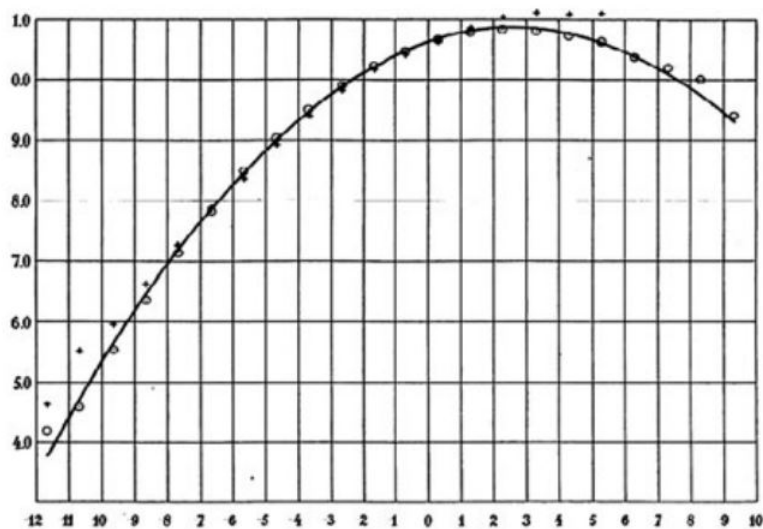


Figura 7.1: La distribuzione delle magnitudini assolute delle stelle o la “curva di luminosità”, derivata da Kapteyn e van Rhijn. L’asse verticale è il logaritmo del numero di stelle per unità di volume, e l’asse orizzontale è la magnitudine assoluta (a 1 pc). (Kapteyn & van Rhijn, [33])

poi più lentamente a un decimo di quel valore a circa 800 pc dal Sole. La densità vicino al Sole corrispondeva a una separazione media tra stelle di 2,8 parsec (8,7 anni luce).

Questo lavoro fu eseguito su dati molto meno completi per le latitudini galattiche  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , usando la stessa curva di luminosità, assunta essere la stessa ovunque nello spazio. Per facilitare i calcoli si avvicinarono al *sistema siderale* in questo primissimo tentativo usando una figura di rivoluzione con il Sole al centro.

Quindi, per completezza le ipotesi utilizzate per la modellizzazione possono essere riassunte nel seguente modo: (1) la distribuzione di luminosità delle stelle è la stessa ovunque nel *sistema siderale*, (2) la distribuzione è circolarmente simmetrica rispetto ad un asse perpendicolare alla Via Lattea, (3) il Sole è vicino al centro della distribuzione, e naturalmente come sempre (4) non c’è assorbimento di luce nello spazio. Tutte queste questioni avrebbero dovuto essere riesaminate, osservarono, in futuro con tentativi migliorati.

La visione preliminare risultante della distribuzione delle stelle nello spazio fu quella della 7.2. La distribuzione arrivava ad una densità pari a un centesimo di quella vicino al Sole e a questo punto il Sistema misurava circa  $3500 \times 18000$  parsec. Le parti esterne erano ovviamente molto incerte, ma l’analisi non si fondava ancora sul conteggio delle

stelle deboli che sarebbe stato fornito dall'indagine del Monte Wilson nel contesto del Progetto delle Aree Selezionate.

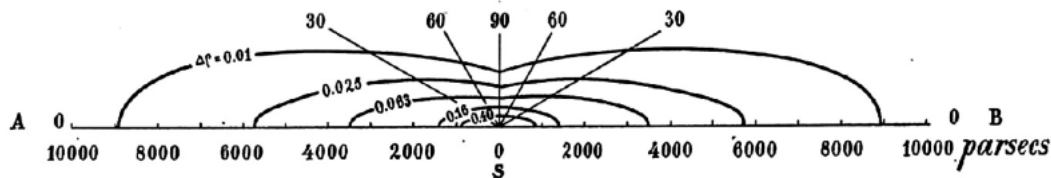


Figura 7.2: Il modello della distribuzione spaziale delle stelle nella nostra galassia, derivato da Kapteyn e van Rhijn nel 1920 dall'analisi dei conteggi stellari. Il sistema è assunto simmetrico, per cui è mostrata solo la "metà superiore" della galassia. La linea AB rappresenta il piano della Via Lattea. Il Sole si trova in S, il centro del sistema. Le distanze sono indicate lungo l'asse  $x$  in parsec. Le linee rappresentano i contorni di equidensità. (Kapteyn & van Rhijn, 1920)

Quanto si sarebbero rivelati accurati questi conteggi stellari? Confrontando i conteggi stellari pubblicati da van Rhijn nel 1929 (*Distribution of stars according to apparent magnitude, Galactic latitude and Galactic longitude*), includendo tutti i dati delle indagini di Harvard e del Monte Wilson per il Progetto delle Aree Selezionate, con un modello moderno per la distribuzione delle stelle nella Galassia, pubblicato da J.N. Bahcall e R.M. Soneira nel 1980 (vedi [44]), si osserva che per le magnitudini più luminose i dati sarebbero simili a quelli utilizzati da Kapteyn e van Rhijn nel 1920. La pubblicazione di van Rhijn è molto dettagliata e di essa vengono mostrati alcuni dati in figura 7.3 per magnitudini selezionate.

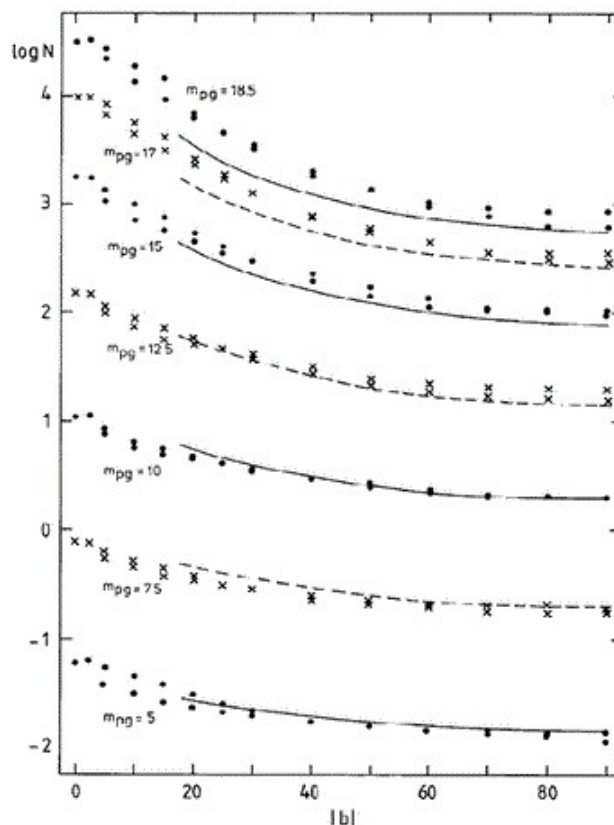


Figura 7.3: Conteggi stellari di van Rhijn (1929), messi a confronto con un modello moderno per la distribuzione delle stelle nella Galassia di Bahcall e Soniera (1980). L'asse verticale mostra il numero di stelle per grado quadrato (in scala logaritmica). L'asse orizzontale mostra la latitudine galattica. Le linee tratteggiate e i simboli a croce corrispondono ai conteggi di van Rhijn per diversi valori di magnitudine. Le linee continue e i simboli circolari corrispondono ai conteggi di Bahcall e Soniera. Per ogni magnitudine il numero di stelle è rappresentato da due simboli corrispondenti alle latitudini nord e sud. Si nota come le linee e i simboli mostrano molto da vicino lo stesso andamento, il che indica che i conteggi sono relativamente consistenti. Per le stelle più deboli (in alto), tuttavia, le magnitudini di Groninga diventano sistematicamente troppo luminose di oltre mezza magnitudine. (P. C. van der Kruit, 1986)



## Capitolo 8

# Le critiche alla calibrazione della relazione periodo-luminosità

Pochi giorni dopo aver ultimato l'articolo insieme a van Rhijn alla fine di febbraio 1920, Kapteyn inviò uno schema di ricerca a Hale e contemporaneamente scrisse a Shapley, ribadendo brevemente e chiarificando alcune delle domande che aveva sollevato sette mesi prima, chiedendogli anche di consultare la lettera più lunga a Hale.

*“I punti su cui vorrei richiamare in modo particolare la tua attenzione”, scrisse ad Hale, “sono relativi a:*

*A. La struttura dell'universo come discussa da me e van Rhijn nel manoscritto ora a Pasadena,*

*B. La struttura dell'ancora più vasto universo di Shapley”.*

Kapteyn aggiunse un ampio promemoria numerato con 14 osservazioni, aggiungendo che *“le distanze trovate da Shapley sono circa 8 volte maggiori di quelle, trovate con un altro metodo, da un mio allievo, il signor Schouten. Ho tutte le speranze che le osservazioni proposte siano ampiamente sufficienti per decidere da che parte sta la verità”.*

Sotto l'osservazione 10, Kapteyn fece quella che si percepisce come una critica della calibrazione della relazione periodo-luminosità di Shapley per le variabili Cefeidi:

*“Considererò brevemente quali obiezioni potrebbero essere fatte contro entrambi gli autori. Ciò porterà naturalmente al modo in cui possiamo sperare di riconciliare alla fine i due metodi. Shapley distingue le variabili Cefeidi in due classi, quelle che hanno periodo  $< 1$  giorno (tipi cluster) [e le  $\delta$  Cefeidi, con periodi  $> 1$  giorno]. Per il momento preferirei definirle come: variabili  $\delta$  Cefeidi di Classe P con periodi compresi tra 0,36 e 0,66 giorni, e  $\delta$  Cefeidi di Classe Q con periodi  $> 1$  giorno.*

Kapteyn notò che le variabili di classe P (di breve periodo) mostravano le stesse caratteristiche sia dentro che fuori gli ammassi: l'argomento di Kapteyn, implicitamente, era dunque che la calibrazione doveva essere fatta considerando solo le variabili di classe

P (di breve periodo) e non anche le  $\delta$  Cefeidi di lungo periodo come fece Shapley.

L'efficacia di questo argomento fu riconosciuta per la prima volta da Walter Baade nel 1952, dimostrando che in effetti le variabili a lungo periodo all'interno e all'esterno degli ammassi non sono le stesse. Baade distinse tra due popolazioni separate di Cefeidi: le Cefeidi "classiche", ovvero stelle più giovani di popolazione I e massicce che hanno come prototipo la stella  $\delta$  Cephei, e le Cefeidi di tipo II, storicamente definite W Virginis, più vecchie e deboli, generalmente distribuite nell'alone galattico e negli ammassi globulari.

Il metodo di Shapley portò a una sovrastima delle dimensioni della nostra galassia, attribuendole un'estensione di 90 kpc, pari a quasi tre volte il valore reale (circa 30 kpc). Tale sovrastima risultava dal fatto che Shapley sovrastimò sistematicamente tutte le distanze degli ammassi globulari, commettendo due errori: il primo dovuto all'assunzione che le variabili in ammasso fossero dello stesso tipo di quelle di campo; il secondo dovuto all'aver trascurato l'assorbimento interstellare della luce.

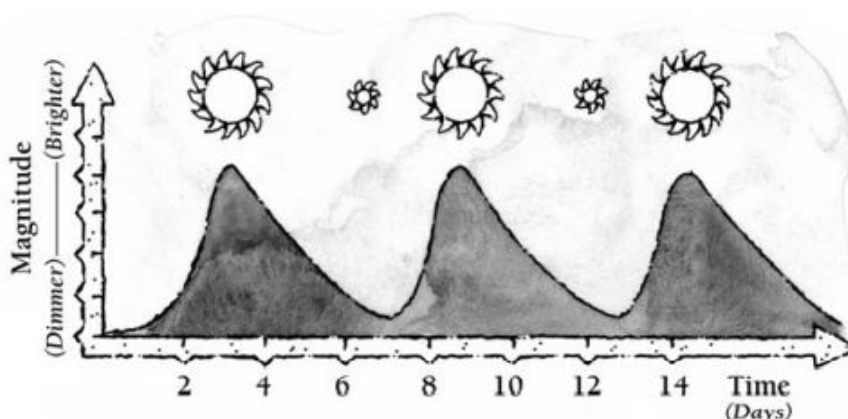


Figura 8.1: Le variabili Cefeidi, chiamate così dalla stella prototipo  $\delta$  Cephei che mostra lo stesso comportamento, sono stelle che pulsano aumentando e diminuendo il loro diametro e producendo delle variazioni in luminosità. Al massimo delle loro dimensioni, raggiungono il massimo di luminosità. Il fatto che la massima luminosità di una variabile Cefeide sia legata al periodo con cui si ripete il comportamento della stella, le ha rese degli indicatori di distanza. (Crediti: Layne Lundström)

Kapteyn continuò affermando che esistevano prove convincenti che le stelle in ammasso erano molto più vicine di quanto Shapley pensasse, e che non erano confinate alla Via Lattea, a differenza delle  $\delta$  Cefeidi di lungo periodo. Anche questo era vero,

ma la spiegazione corretta sarebbe arrivata solo nella seconda metà del XX secolo.

Nell'osservazione 11, Kapteyn menzionò il metodo della funzione di luminosità usato (su suo suggerimento) dal suo studente Willem Schouten (1893–1971) per misurare le distanze di alcuni degli ammassi utilizzati da Shapley, e che aveva portato a dei valori più piccoli di quasi un ordine di grandezza. “*L’obiezione contro il metodo*”, affermò, “*è che parte dal presupposto che la luminosità negli ammassi sia la stessa che fuori dagli ammassi.*” Kapteyn raccomandò di pianificare un programma di osservazione per trovare la funzione di luminosità di alcuni ammassi come Messier 3, 5 e 13. Poiché riteneva erroneamente che le distanze relativamente vicine di Schouten fossero corrette, Kapteyn fallì gravemente nei suoi calcoli. In ogni caso, come oggi è noto, la popolazione stellare all’interno degli ammassi globulari è piuttosto diversa dalle stelle di campo, e il confronto tra le funzioni di luminosità sarebbe stato un percorso insidioso da intraprendere.

## 8.1 Due modelli di universo a confronto

Verso la fine del 1920 Kapteyn comunicò ad Hale i successi delle ricerche condotte con il telescopio da 100 pollici al Monte Wilson, sottolineando inoltre come il suo modo di approcciarsi alla ricerca fosse diverso da quello degli altri suoi colleghi astronomi:

*“Questo dimostra spero a sufficienza quello di cui mi occupo e il genere di cose per cui sono stato qui 20 anni. Ma tali questioni si risolvono in maniera terribilmente lenta e questo senza dubbio è il motivo per cui sono praticamente lasciato solo nel farle. Certo, so che uomini come Eddington e Schwarzschild svolgono o hanno svolto un lavoro simile. Ma loro lavorano con formule matematiche, che, in quasi tutti i casi, sono stravaganti estrapolazioni del poco che conosciamo empiricamente e quindi certamente. Se potessi paragonare le cose piccole a quelle grandi, lo farei così: loro hanno molto di Newton in sé, il mio lavoro è del tipo Keplero. Newton è, naturalmente, di gran lunga l’uomo più grande, ma Keplero deve comunque venire prima di Newton. Il lavoro di Keplero, tuttavia, (se hai mai letto i suoi lavori un po’ più a fondo) è terribilmente lungo e paziente. Sono piuttosto orgoglioso della mia ostinata persistenza, ma comunque. [...] Spero che nella mia prossima incarnazione io possa rivelarmi un fisico, essendo la fisica ora più vicina a una fase newtoniana, o, se non lo concedi, è almeno una scienza che richiede esperimenti definiti, non ricerche statistiche interminabili. In breve, quello che vi chiedo di nuovo è che abbiate un po’ più di pazienza. Tutto quello che sto facendo ora è davvero allo scopo di poter scrivere quello che chiedi e scriverlo bene. Mi permetto di dire che prima di venire a Mnt Wilson la prossima volta (per il quale comincio a provare un grande desiderio) pubblicherò almeno un primo articolo sulla questione Contributo n.188, e quello che ormai ho quasi finito è in realtà solo propedeutico a tale pubblicazione.”*

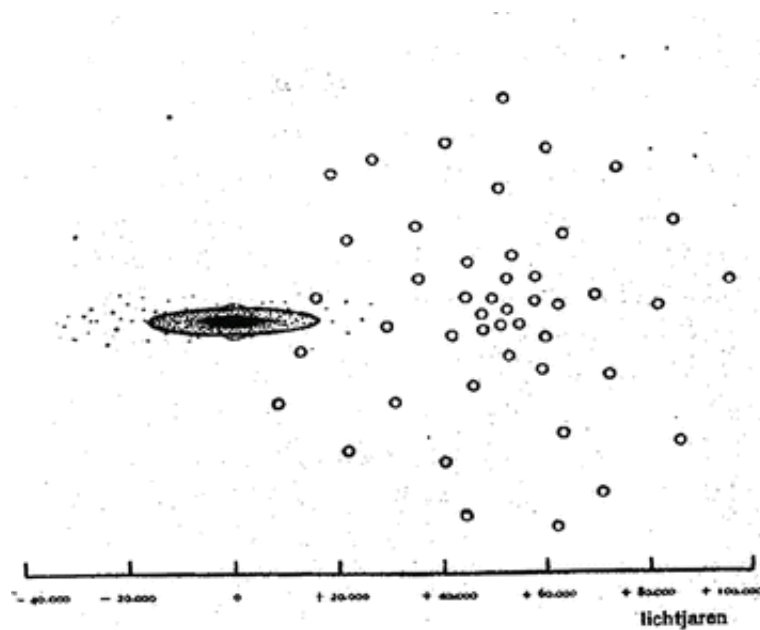


Figura 8.2: La distribuzione spaziale delle stelle nell'Universo di Kapteyn messa a confronto con quella degli ammassi globulari determinata da Shapley. L'immagine è tratta dal libro di W. de Sitter *Kosmos*, pubblicato nel 1934, ed è attribuita a Jan H. Oort.

Mentre Shapley pubblicò i grafici della distribuzione degli ammassi globulari sul piano della Galassia, non disegnò un quadro di come il suo universo potesse apparire. Tuttavia, divise il suo articolo sulla disposizione dell'Universo Siderale in due parti, la prima su *“Il Sistema Galattico Generale”* e la seconda su *“Il Sistema Locale”*. Se il Contributo n.188 di cui Kapteyn parlava nella sua lettera fosse stato già pubblicato, Shapley avrebbe senza dubbio cercato di identificare il suo *sistema locale* con l'Universo Kapteyn; nel frattempo, tentò audacemente di conciliare l'idea delle correnti stellari nel suo *sistema locale*, spronando probabilmente Kapteyn a fare lo stesso nel suo articolo finale, più teorico.

Non è chiaro come Shapley considerasse nel 1920 la relazione tra l'Universo di Kapteyn e la sua visione più ampia, ma divenne molto più evidente verso la fine di quel decennio, quando nel 1930 pubblicò un articolo intitolato *The Super-Galaxy Hypothesis*, che identificò con il grande sistema della Via Lattea.

*“Alcuni anni fa”, scrisse, “ho suggerito come ipotesi di lavoro che il nostro Sistema Galattico, che avevo appena dimostrato essere inaspettatamente esteso e popolato, è nato dalla fusione di ammassi stellari e nubi stellari, e sta crescendo attraverso l'assimilazione e lo smembramento di sistemi esterni. [...] Il sistema locale è stato considerato simile per dimensione e composizione alle Nubi di Magellano e le singole*

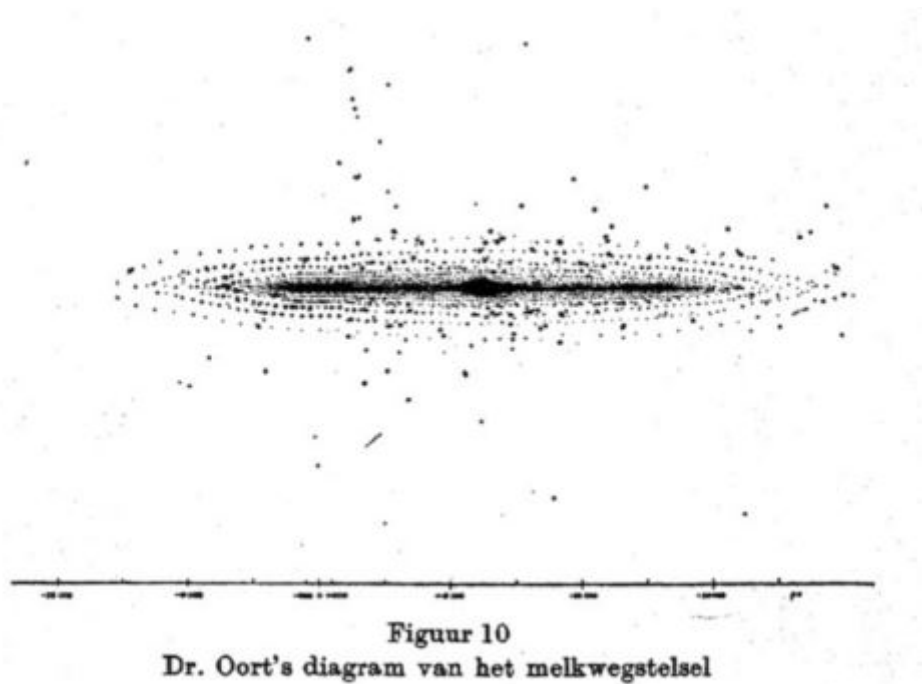


Figura 8.3: Un disegno abbozzato della struttura della Via Lattea, in cui è possibile osservare una struttura piatta, ovvero il disco di stelle di popolazione I, e un alone sferico di stelle di popolazione II, alcune delle quali sono presenti singolarmente, altre sono concentrate nei cosiddetti ammassi globulari. L'immagine è tratta dal libro di W. de Sitter *Kosmos* (1934).

*nubi stellari che compongono la Via Lattea, ed è stato visualizzato come uno dei sistemi minori all'interno di un'organizzazione più grande, un'unità irregolare racchiusa e in moto attraverso strati di stelle galattiche.*” Così rese abbastanza esplicita la sua idea che il Sistema della Via Lattea fosse in realtà un grande agglomerato di più Universi di Kapteyn, ma ancora una volta, non c'è un'immagine che lo illustri.

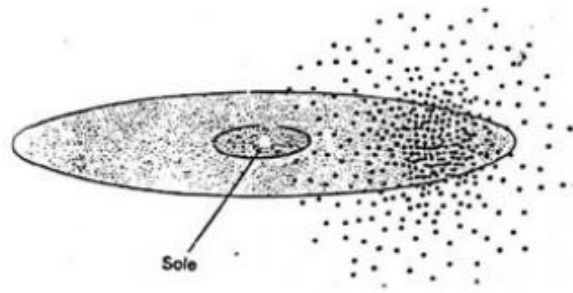


Figura 8.4: Posizione eccentrica degli ammassi globulari rispetto all'universo di Kapteyn. (Crediti: [49])

## Capitolo 9

# Il “primo tentativo”: l’Universo di Kapteyn

La lettera di Kapteyn a Hale non ebbe come conseguenza né la visita al Monte Wilson né la pubblicazione sperate dall’autore. Per quanto riguarda la visita al Monte Wilson, questa possibilità svanì come conseguenza della forte convinzione di Kapteyn che l’astronomia non dovrebbe conoscere confini politici. Poco dopo la fine della Prima guerra mondiale, infatti, il sentimento anti-tedesco crebbe e quando fu proposto nel 1919 di formare una nuova organizzazione internazionale, l’*International Research Council*, la Germania e le altre nazioni facenti parte degli Imperi centrali vennero escluse. I Paesi Bassi furono invitati a far parte dell’organizzazione, ma Kapteyn non approvava l’esclusione degli scienziati tedeschi che riteneva non fossero responsabili per le decisioni dei loro governi. Questo allontanò alcuni suoi colleghi “anti-tedeschi”, tra cui Hale, che gli scrisse ma senza invitarlo all’Osservatorio.

Per quanto riguarda l’articolo che cita come quasi finito, se si suppone che sia il Contributo n.230, che apparve quasi postumo sull’*Astrophysical Journal* del maggio 1922, allora la pubblicazione definitiva non fu mai portata a compimento. In quella che alla fine si rivelò essere la pubblicazione finale sul suo modello derivato statisticamente, intitolata *First attempt at a theory of the arrangement and motion of the Sidereal System* (“Primo tentativo di una teoria della disposizione e del moto del Sistema Siderale”), Kapteyn sviluppò il suo Universo sulla base dei conteggi stellari, mostrando che la distribuzione delle stelle può essere rappresentata piuttosto bene da dieci gusci ellissoidali concentrici di uguale densità con un rapporto assiale di 1:5,1.

Per ognuno di questi ellipsoidi determinò poi le forze gravitazionali prodotte. Il vantaggio di questa configurazione è che la forza gravitazionale totale di tutte le stelle in un punto all’interno di un determinato guscio è zero. Questa è una generalizzazione del “teorema del guscio sferico” di Isaac Newton: la forza gravitazionale esercitata da

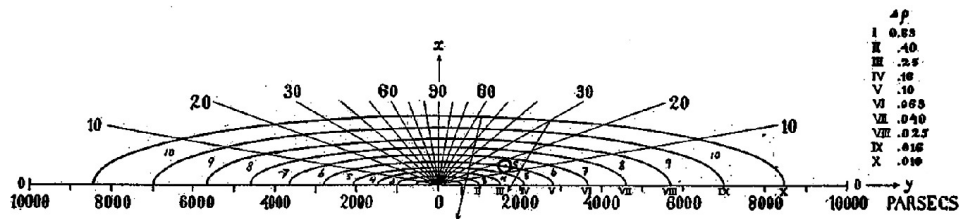


FIG. 1

Figura 9.1: L’Universo di Kapteyn: questo è il modello derivato da Kapteyn e van Rhijn nel 1922 in cui il Sole non è più posizionato al centro del sistema, ma ad una distanza di 6500 parsec o circa 2000 anni luce (il Sole è a circa 26000 anni luce dal centro della galassia; l’assunzione di un assorbimento interstellare della luce trascurabile portò fuori strada Kapteyn). L’Universo di Kapteyn è circa cinque volte più ampio del suo spessore, e include circa 50 miliardi di stelle. (Kapteyn & van Rhijn, 1922)

un guscio sferico avente densità uniforme su una particella posta al suo interno è nulla. Quindi qualsiasi punto del sistema stellare risente della gravità prodotta dai gusci al suo interno, i cui diversi contributi possono essere calcolati in modo relativamente semplice.

Kapteyn notò che un sistema appiattito poteva essere in uno stato stazionario solo se dotato di un moto sistematico e da ciò dedusse che dovesse esserci “una sorta di rotazione attorno all’asse X” (vedi 9.1, in basso) per mantenerlo in quella forma; lungo quell’asse quindi potevano esserci solo moti peculiari (random).

Calcolando per un determinato guscio la forza gravitazionale e confrontandola con il moto medio delle stelle lungo l’asse verticale (circa 10 km/s, ottenuto dalla misura delle velocità radiali), risultò che affinché il sistema si trovi in uno stato di equilibrio, la massa media di una stella nelle vicinanze del Sole deve essere tra 1,4 e 2,2  $M_{\odot}$  (a seconda di quale guscio si utilizza per l’analisi). Kapteyn notò inoltre che questo è in ottimo accordo con la presenza di stelle binarie con una massa combinata di 1,6  $M_{\odot}$ . Dunque, se tutte le stelle fossero binarie, la gravità totale può essere spiegata dalle sole stelle senza ricorrere alla materia oscura, che non contribuisce alla massa luminosa.

Come stimare il contributo della materia oscura? Assumendo una distribuzione gaussiana delle velocità stellari, la relazione tra dispersione di velocità e distribuzione di densità con la latitudine galattica fornisce direttamente la densità di massa nel piano della Galassia. Confrontando la densità di massa calcolata in questo modo con quella ottenuta dai conteggi stellari, egli concluse di avere i mezzi per stimare la massa della materia oscura nell’Universo: *“allo stato attuale delle cose sembra che questa massa non possa essere eccessiva”*.



Il metodo seguito da Kapteyn fu perfezionato non molto più tardi da Jan Oort nel 1932, in un'articolo intitolato *The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems*, in cui la densità di massa totale risultante nei dintorni del Sole venne definita come il "limite di Oort".

La situazione attuale non è molto differente dalle conclusioni di Kapteyn, ad esempio il fatto che tutta la massa dedotta da questi studi dinamici può essere attribuita a della materia nota presente all'interno del disco della Galassia. In un certo senso il modello di Kapteyn in termini di distribuzione lungo la direzione verticale non era affatto incorretto. In termini moderni, usando la descrizione del "foglio isoterma" di van der Kruit e Searle (1981), la distribuzione di densità stellare di Kapteyn è fittata abbastanza bene da una distribuzione di luminosità ad una distanza di 650 pc dal disco, piuttosto vicino al valore moderno di 700 pc.

Per quanto riguarda i moti sul piano della Via Lattea, invece, Kapteyn riteneva fossero una conseguenza del suo modello delle correnti stellari: la direzione dei flussi era perpendicolare al centro di rotazione e avveniva in due direzioni, una delle quali era la costellazione della Carena, situata nell'emisfero meridionale in una regione molto luminosa della Via Lattea. Deducendo che dovesse esserci un effetto significativo di forza centrifuga, ricavò che la velocità di rotazione richiesta, per diverse posizioni sia sul piano che a due latitudini rispetto al centro ( $30^\circ$  e  $57^\circ$ ), doveva essere attorno a 18-20 km/s (adottò un valore di 19,5 km/s). Assumendo poi che le stelle fossero libere di muoversi intorno al centro in due direzioni opposte, ottenne una velocità relativa di circa 39 km/s, molto vicina ai 40 km/s delle sue due correnti stellari. Così nella direzione radiale la distribuzione delle stelle è tenuta in equilibrio dalla gravità delle stelle, insieme a una forza centrifuga dovuta a un effetto sistematico di rotazione, metà in una direzione e metà nell'altra.

In questo modello il Sole non poteva trovarsi al centro del *sistema siderale*. Kapteyn sosteneva che si dovesse trovare a una distanza di 1,5 kpc, ma per ragioni riguardanti dei dettagli nelle soluzioni nelle distribuzioni di densità, decise per un valore di 650 pc dal centro del Sistema nella direzione della Croce del Sud. Dagli studi di Hertzsprung sulla distribuzione delle variabili Cefeidi, inoltre, il Sole si doveva trovare a 38 pc a nord rispetto al piano della Via Lattea, risultato che Kapteyn condivise.

Si può affermare quindi che l'adozione di questo modello da parte di Kapteyn aveva anche un fondamento dinamico, in parte corretto (nella direzione verticale). Oggi, tuttavia, si sa che la parte restante del suo modello era sbagliata per due motivi: (1) i moti sistematici nelle stelle non erano le correnti stellari, ma effetti di anisotropia nelle distribuzioni dei moti casuali delle stelle oltre che una rotazione molto più gran-

de attorno a un Centro Galattico molto più distante, e (2) a causa dell'assorbimento interstellare era campionata solo una piccola parte della Galassia. Lo spostamento del Sole dal centro sarebbe stato comunque sufficientemente grande da qualificare la sua posizione come "non molto speciale".

L'Universo di Kapteyn poggiava su due ipotesi sbagliate, ma era in buona compagnia: l'assenza di assorbimento era stata suggerita da Shapley sulla base dei colori delle stelle negli ammassi globulari, questo aspetto costituiva una prova molto convincente e fu ampiamente condiviso. La tesi delle correnti stellari sembrava anche ben giustificata dalla composizione molto diversa dei due flussi e convinse, almeno a quel tempo, molti astronomi, tra cui Eddington.

In generale, il prodotto finale di Kapteyn fu un quadro coerente in cui la distribuzione spaziale delle stelle e i loro moti casuali e sistematici (rotazionali) corrispondevano tra loro come richiesto per un sistema in equilibrio, o "stazionario", per usare un termine a lui caro. I difetti che necessitavano di miglioramenti erano secondo Kapteyn che gli ellissoidi erano stati determinati assumendo che il Sole si trovasse al centro e che la massa media delle stelle era assunta uguale in tutti i gusci. Quest'ultima assunzione sarebbe sbagliata se le distribuzioni di massa fossero diverse per classi spettrali diverse (*"quindi o le ipotesi o le conclusioni sono sbagliate"*).

## Capitolo 10

# Il problema dell'assorbimento interstellare

Per Kapteyn, la questione dell'assorbimento interstellare è sempre stata di grande importanza. La completa trasparenza dello spazio era un presupposto vitale nelle sue analisi e i recenti sviluppi sull'argomento erano per lui motivo di grave preoccupazione. Aveva sempre esplicitamente dichiarato di presumere la trasparenza e di non essere a conoscenza di alcuna prova contraria, ma allora la questione sembrava aperta.

Nel 1847, quando Wilhelm Struve ipotizzò l'esistenza di materiale assorbente nei suoi *Etudes d'Astronomie Stellaire*, gli astronomi ignorarono in gran parte i suoi commenti, o li rifiutarono. John Herschel inoltre scoprì delle macchie scure nei cieli dell'emisfero australe che sembravano indicare la presenza di spesse nubi interstellari e, nel primo decennio del XX secolo, l'astronomo americano Edward Barnard (1857-1923) fotografò delle "nebulose scure" simili nell'emisfero settentrionale. La nebulosa "Sacco di carbone" vicino alla costellazione della Croce del Sud, visibile attraverso binocoli o piccoli telescopi, è un esempio di una di queste nubi scure. Tuttavia, la presenza di nubi oscuranti, la cui esistenza non era messa in discussione, non implicava necessariamente che il materiale assorbente o nebuloso fosse diffuso nello spazio, velando tutte le stelle in una certa misura. In altre parole, l'esistenza di un certo oscuramento non era messa in dubbio, ma gli astronomi non erano d'accordo su quanto fosse diffuso il problema.

Kapteyn affrontò la questione nel 1904 in un articolo intitolato *Remarks on the determination of the number and mean parallax of stars of different magnitude and the absorption of light in space* ("Osservazioni sulla determinazione del numero e della parallasse media di stelle di diversa magnitudine e sull'assorbimento della luce nello spazio"). Nell'articolo, mostrò come una piccola quantità di estinzione avrebbe cambiato sensibilmente le distribuzioni stellari dedotte. Usò una semplice approssimazione, in cui la densità stellare dipendeva solo dalla distanza dal Sole (non dalla direzione) e



Figura 10.1: La Nebulosa “Sacco di Carbone” presa dallo strumento WFI (Wide Field Imager) montato sul telescopio da 2,2 metri dell’MPG/ESO. La polvere di questa nebulosa assorbe e diffonde la luce delle stelle sullo sfondo. (Crediti: ESO)

la curva di luminosità era la stessa ovunque. Kapteyn tabulò i risultati dei suoi calcoli, che possono essere visualizzati nei due grafici in figura 10.2.

Il risultato non è del tutto sorprendente: i conteggi stellari potevano essere spiegati da un significativo calo di densità con la distanza dal Sole (come si può osservare in figura 10.3) o da una sostanziale estinzione della luce stellare. O, naturalmente, una combinazione dei due. Inoltre, non c’era modo di distinguere i due effetti senza ulteriori informazioni indipendenti. Kapteyn scrisse: *“in conclusione, penso che si ammetterà che, né nel numero di stelle di varia magnitudine, né nella loro parallasse media, abbiamo la minima indicazione di un apprezzabile assorbimento della luce.”*

È quindi evidente come l’assunzione di uno spazio trasparente, che Kapteyn usò in questo lavoro e in quello precedente – e che avrebbe continuato ad usare – si tradusse in una densità spaziale sostanzialmente decrescente di stelle con il Sole situato vicino

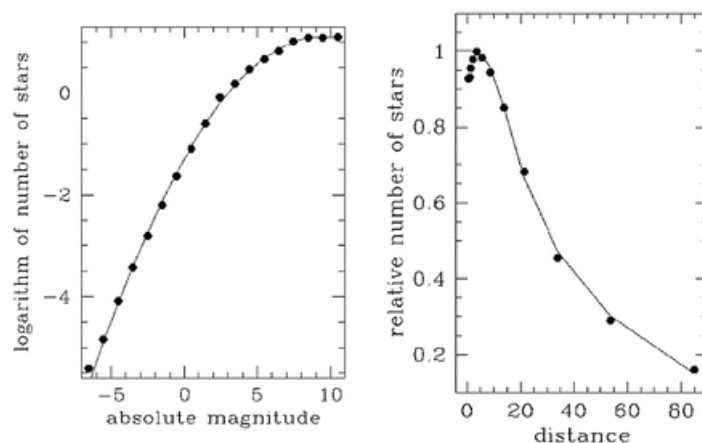


Figura 10.2: Rappresentazione grafica delle curve fondamentali assunte da Kapteyn nella sua discussione sui conteggi stellari. A sinistra la curva di luminosità di Kapteyn, che fornisce la frequenza relativa di occorrenza delle stelle in funzione della loro luminosità intrinseca; per magnitudini assolute più deboli il numero di stelle per unità di volume aumenta. A destra la distribuzione della densità spaziale delle stelle in funzione della distanza dal Sole. I punti sono le migliori determinazioni di Kapteyn, le linee la funzione matematica adottata. Le unità di volume e di distanza sono corrispondenti ad una parallasse di 0.01 (10 parsec o 32.6 anni luce in unità moderne). I valori sull'asse verticale sono logaritmici, in modo che una variazione di 1 significhi una variazione di un fattore 10. (Kapteyn, [17])

al punto più denso (vedi 10.3). Quest'ultima cosa può sembrare molto sospetta, ma non sembra averlo affatto infastidito. Quello contro cui obiettava erano i valori estremamente grandi di Comstock, che implicavano che il Sole fosse vicino a un minimo pronunciato di densità stellare: *“bisogna ammettere che abbiamo già a che fare con densità che sono nel più alto grado improbabili, tanto più che ci impongono di assumere per il sole una posizione molto eccezionale nello spazio”*.

## 10.1 Densità stellare o estinzione?

Nel suo articolo del 1904, Kapteyn discusse di come si potesse sfuggire al problema della degenerazione tra la densità stellare decrescente e la presenza dell'assorbimento interstellare nell'interpretazione del conteggio delle stelle.

Il metodo che propose fu quello di guardare la “curva di luminosità” e confrontarla a varie distanze. L'assunzione è che la curva di luminosità non sia una curva in continuo aumento come in 10.2 (a sinistra), ma che abbia un massimo ben definito. Se è indipendente dalla distanza dal Sole, questo massimo si sposterà verso una magnitudine

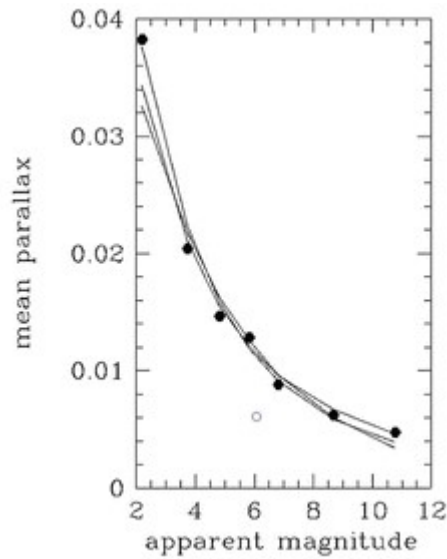


Figura 10.3: Rappresentazione grafica dei risultati dei calcoli di Kapteyn sulla parallasse media in funzione della magnitudine apparente. Una delle curve quasi identiche rappresenta la modellizzazione di Kapteyn assumendo uno spazio trasparente (la più alta a sinistra) e un'altra (al centro a sinistra) il modello di Comstock che include l'estinzione interstellare. Quella inferiore viene da Kapteyn, [13]. (Kapteyn, [17])

apparente più debole quando lo determineremo a distanze sempre più grandi. L'entità dello spostamento in magnitudine si può determinare in questo modo: se la distanza di una stella raddoppia, essa appare quattro volte meno luminosa e di conseguenza 1,51 magnitudini più debole. Se c'è assorbimento, lo spostamento in magnitudine appare più grande.

Prevedibilmente, i risultati ottenuti da Kapteyn non furono molto accurati: la curva di luminosità in realtà non presentava un massimo e aveva troppe poche misure di parallasse a sua disposizione. In termini semplici, gli spostamenti di magnitudine che trovò per varie parti delle curve di luminosità erano generalmente poco più grandi del previsto rispetto a un modello senza assorbimento, ma comunque inferiori a quanto sarebbero risultati considerando i valori per l'estinzione di Comstock.

*“Allo stato attuale delle cose”, scrisse Kapteyn, “non sembra sicuro trarre conclusioni più definitive delle seguenti: i nostri numeri non supportano la teoria di un assorbimento della quantità trovata da Comstock. Sono ben conciliabili con un assorbimento, diciamo, di un terzo della quantità. Non sono incline, tuttavia, ad ammettere nemmeno un assorbimento di quest'ultima quantità, almeno, prima di possedere ragio-*

*ni molto più convincenti”.*

La sua riluttanza ad accettare l’assorbimento interstellare deriva dalla sua argomentazione che anche una quantità relativamente piccola si tradurrebbe in un aumento sostanziale della densità stellare allontanandosi dal Sole. Anche per un terzo dell’assorbimento di Comstock la densità stellare aumenta di un fattore di circa 5 ad una parallasse di 0,003”.

Chiaramente, la soluzione al problema doveva essere cercata ricavando moti propri affidabili per un gran numero di stelle deboli. Il motivo per cui sembrava rifiutare l’opzione che la densità stellare potesse effettivamente essere costante e insistere su una densità stellare in declino (con il Sole in una posizione speciale), non è chiaro.

Kapteyn per molti anni non cercò di migliorare la sua determinazione della distribuzione e della densità delle stelle nello spazio. Quello su cui si impegnò fu migliorare la determinazione dei conteggi stellari, ritenendo che i conteggi esistenti non fossero su una “scala fotometrica affidabile” e che l’intervallo in magnitudini apparenti fosse troppo piccolo. L’intento era migliorare tale lavoro combinando tutte le informazioni disponibili in un unico prodotto. Nel 1908, Kapteyn compilò i conteggi delle stelle in un sistema uniforme, in un articolo intitolato *On the number of stars of determined magnitude and determined Galactic latitude* (“Sul numero di stelle di determinata magnitudine e determinata latitudine galattica”).

Nello stesso anno, Kapteyn presentò i risultati sulla distribuzione delle stelle (di cui all’articolo [24]) alla Royal Academy di Amsterdam. Lo scopo principale dell’articolo era quello di mostrare l’andamento della densità stellare a distanze dal Sole più grandi di quanto fosse possibile fino ad allora. La sua analisi mostrò che il crollo della densità a distanze molto grandi era molto più lento di quello determinato nel 1904 con un’extrapolazione. In questa soluzione la densità diminuisce in maniera costante fino a raggiungere lo zero a 10 kpc (circa 32 anni luce). Non c’è stata, tuttavia, alcuna discussione da parte di Kapteyn su questo risultato nella sua pubblicazione.

## 10.2 Sull’assorbimento della luce nello spazio

Nel 1909 apparvero due articoli di Kapteyn sull’assorbimento nell’*Astrophysical Journal*. Queste furono le sue prime pubblicazioni dopo la sua nomina (part-time) come ricercatore associato al Monte Wilson e facevano anche parte della raccolta *Contributions of the Mount Wilson Observatory*. Gli articoli, entrambi intitolati *On the absorption of light in space* (“Sull’assorbimento della luce nello spazio”), costituirono

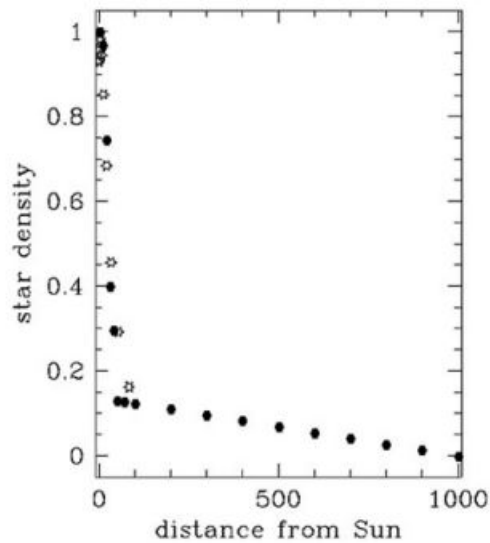


Figura 10.4: Distribuzione della densità stellare derivata da Kapteyn usando i conteggi stellari determinati nella Pubblicazione 18 di Groninga. I simboli vuoti rappresentano la sua determinazioni del 1904 (vedi 10.2). (Kapteyn, [25])

un grande sforzo da parte di Kapteyn per affrontare questa questione urgente: *“ora ci possono essere pochi dubbi, a mio parere, sull’esistenza dell’assorbimento nello spazio”*.

Le prove per l’assorbimento, secondo Kapteyn, erano due. Per prima cosa, affermò che “lo spazio contiene un’enorme massa di materia meteorica”, senza però indicare alcuna prova di questo. Successivamente, si riferì al suo articolo del 1904, in cui dimostrò che i conteggi stellari potevano essere ugualmente ben rappresentati da una densità decrescente con la distanza dal Sole o da una densità costante con una quantità relativamente piccola di assorbimento.

*“La scelta”, scrisse, “tra le due probabilità non sembra essere molto difficile [...] Da questo possiamo concludere che, se c’è un assottigliamento delle stelle all’aumentare della distanza dal Sole, deve essere così in qualsiasi direzione dal Sole procediamo. Ciò assegnerebbe al nostro Sole un posto molto eccezionale nel Sistema Stellare, cioè il luogo di massima densità. D’altra parte, se assumiamo che l’assottigliamento delle stelle sia semplicemente apparente e dovuto all’assorbimento della luce, l’apparente assottigliamento in qualsiasi direzione arbitraria è perfettamente naturale. Quest’ultima alternativa è quindi senza dubbio la più probabile, [...]”*

Questo era sicuramente un punto di vista molto più fermo di quello espresso nel suo articolo del 1904. Sugerì però un’altra possibilità, che funzionerebbe se l’assorbimento



fosse più o meno selettivo, ovvero che il gas lascerebbe prove della sua esistenza sotto forma di linee di assorbimento negli spettri stellari.

Il primo articolo di Kapteyn del 1909 trattava l'assorbimento in generale negli spettri stellari, affidandosi ai lavori di Antonia Maury (1866-1952), una delle astronome che lavorarono ad Harvard sotto la direzione di Edward Pickering. Maury notò che alcune stelle mostravano un leggero "assorbimento generale nella regione avente lunghezza d'onda inferiore a 4307 Å, come ad esempio in  $\alpha$  Bootis (la stella luminosa Arturo), o un assorbimento "più evidente", come in  $\alpha$  Cassiopeiae. Tuttavia, non c'era un'evidenza convincente di assorbimento da parte del gas.

Nel secondo articolo Kapteyn esaminò i colori delle stelle e concluse che se ci fosse stato un assorbimento significativo (e se fosse selettivo), le stelle a distanze maggiori sarebbero dovute apparire più rosse. Il principio di usare i colori per studiare l'arrossamento delle stelle dovuto all'assorbimento interstellare, può essere illustrato tramite la 10.5.

La presenza di arrossamento non poteva indicare naturalmente la quantità di estinzione totale della luce stellare. Per arrivare a determinare questa proprietà Kapteyn fece un'assunzione, ovvero che "quasi tutta la perdita di luce è dovuta allo scattering e che quindi i suoi risultati erano limiti inferiori". In particolare, assunse che fosse scattering di Rayleigh e dedusse che dovesse essere inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda.<sup>1</sup>

In conclusione, per quanto riguarda l'assorbimento e l'arrossamento, Kapteyn ottenne valori corrispondenti a 0,001 magnitudini per parsec nella banda fotografica e 0,0005 in quella visuale, non troppo lontani dai valori attuali di 0,013 e 0,0010. Tuttavia, molto presto trovò un errore importante nel suo articolo e pubblicò un'errata corrige solo pochi mesi dopo. Il problema fu che aveva commesso un errore nel trasformare le parallassi medie in distanze medie. L'effetto fu sostanziale, dimezzando la quantità di assorbimento che aveva derivato in magnitudini. Questo significava che l'apparente diminuzione delle stelle mentre ci si allontana dal Sole è in parte dovuta all'estinzione e in parte all'effettiva distribuzione delle stelle nello spazio. Questo deve aver lasciato Kapteyn con un dilemma. O non c'era estinzione e il Sole sarebbe finito in un posto "molto speciale" (nelle sue parole), o c'era assorbimento ma aveva un effetto troppo piccolo nel senso che il Sole era comunque nella posizione speciale vicino alla

---

<sup>1</sup>Lo scattering di Rayleigh è dovuto a particelle molto più piccole della lunghezza d'onda. In realtà bisogna tener conto della distribuzione delle dimensioni delle particelle di polvere (alcune paragonabili alla lunghezza d'onda) e l'estinzione interstellare è in prima approssimazione linearmente, inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda. Pertanto, Kapteyn aveva assunto una dipendenza dalla lunghezza d'onda troppo ripida

densità massima. La posizione speciale del Sole vicino al centro del sistema stellare doveva quindi essere accettata indipendentemente dagli effetti dell'estinzione.

Kapteyn tornò sulla questione nel 1914 in un articolo dal titolo *On the change of spectrum and color index with distance and absolute brightness. Present state of the question* (Sul cambiamento di spettro e indice di colore con la distanza e la luminosità assoluta. Stato attuale della questione).

Nell'articolo, concluse che esiste un effetto reale di arrossamento con la distanza, ma rimase indeciso tra la possibilità che ciò derivasse da una correlazione del colore con la magnitudine assoluta o “un assorbimento selettivo (o scattering) della luce nello spazio”. Il lavoro con cui cercò di separare i due effetti (ad esempio studiando la distribuzione dei tipi spettrali per stelle più deboli) rimase inconcludente.

In ogni caso, ci si chiede cosa spinse Kapteyn a supporre che la possibilità di uno spazio completamente trasparente fosse ancora praticabile, sebbene ci fossero alcune indicazioni, anche se non del tutto convincenti, del contrario. Per trovare una risposta bisogna rivolgersi alla tesi di dottorato che van Rhijn scrisse sotto Kapteyn nel 1915. La tesi era intitolata *Derivation of the change of colour with distance and apparent magnitude together with a new determination of the mean parallaxes of the stars with given magnitude and proper motion* (“Derivazione del cambiamento di colore con distanza e magnitudine apparente insieme ad una nuova determinazione delle parallasse media delle stelle con magnitudine e moto proprio dati”) e non fu mai completamente pubblicata<sup>2</sup>.

Van Rhijn determinò il cambiamento di colori delle stelle con la distanza, scoprendo che ammontava a circa solo 0,000195 magnitudini per parsec, circa la metà di quello che Kapteyn aveva trovato. È interessante notare che non vi fu assolutamente alcuna discussione su questa differenza nei valori, né nell'articolo, né nella tesi stessa. In ogni caso, la quantità dedotta di estinzione era di nuovo inferiore a quanto Kapteyn avesse ipotizzato e forse questo gli fece dubitare della gravità del problema dell'estinzione.

---

<sup>2</sup>Anche se la tesi completa non venne mai pubblicata, il lavoro di van Rhijn portò a tre articoli tra il 1917 e il 1920, di cui due in collaborazione con Kapteyn. Un articolo breve con lo stesso titolo della tesi apparve invece nel 1916.

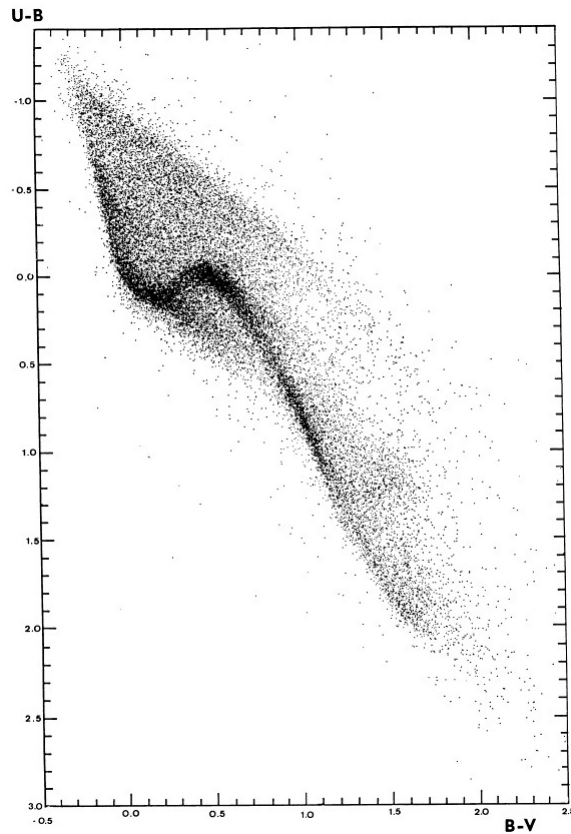


Figura 10.5: Il “diagramma a due colori”. L’asse orizzontale e l’asse verticale mostrano rispettivamente gli indici di colore B-V e U-B. Il grafico è in scala logaritmica, per cui i valori rappresentano il rapporto tra la luminosità della stella nelle due bande. Dato che i colori sono principalmente indicatori della temperatura di superficie della stella, il diagramma a due colori per le stelle di un ammasso rappresenta una curva continua sulla quale si situano tutte le stelle. La curva ha una forma a S a causa della presenza di linee di assorbimento dell’idrogeno neutro molto forti per le stelle di tipo spettrale A, che genera un aumento nell’indice di colore U-B. (Nicolet, 1980)

# Capitolo 11

## L'eredità di Kapteyn: gli anni successivi

L'Universo di Kapteyn (un termine coniato da James Jeans) fu presto sostituito da un modello diverso e molto più esteso in seguito al lavoro di Harlow Shapley sugli ammassi globulari, alla scoperta della rotazione galattica da parte dell'astronomo svedese Bertil Lindblad (1895-1965) e, in modo particolare, di Jan Oort, e a quella dell'estinzione interstellare da parte di Robert Julius Trumpler (1886-1956) nel 1930.

L'entusiasmo di Kapteyn e il suo modo di approcciarsi ai problemi furono tra le cause immediate per cui Oort si interessò all'astronomia e alla struttura della Galassia; l'articolo di Kapteyn del 1922 fu probabilmente per lui una grande fonte di ispirazione. Questo costituì ancora di più il culmine e il coronamento della sua dedizione al Problema Siderale.

Kapteyn morì ad Amsterdam il 18 giugno 1922 all'età di 71 anni. È incerto ipotizzare cosa sarebbe successo se avesse vissuto almeno un altro decennio quando furono determinati l'assorbimento interstellare e la rotazione differenziale galattica.

Gran parte dei progressi furono il risultato delle indagini di Oort. Già nel novembre 1926, quest'ultimo tenne una conferenza inaugurale quando venne nominato *privaat docent* a Leida, in cui discusse la disparità tra l'Universo di Kapteyn e il sistema di ammassi globulari di Shapley, concludendo che *“esiste la possibilità che si trovi una spiegazione completamente diversa, ma per il momento quella di un assorbimento di luce è la meno artificiosa”*. Questo avvenne solo poco più di quattro anni dopo la morte di Kapteyn e quattro anni prima che Trumpler fugasse ogni dubbio stabilendo osservativamente l'esistenza di assorbimento interstellare dalla misura delle distanze degli ammassi stellari aperti tramite la magnitudine apparente delle stelle e i diametri

angolari medi.

Trumpler, nel libro scritto insieme all'astronomo americano Harold F. Weaver (1917-2017), *Statistical Astronomy*, accolse l'articolo del 1920 come "il risultato finale di una vita di magistrali indagini statistiche".

Il professore e autore americano Erich Robert Paul (1943-1994) scrisse nel suo libro *The Milky Way Galaxy and Statistical Cosmology*: "Sebbene la curva di luminosità [stellare] sia stata derivata solo nei dintorni del Sole con un raggio di 630 parsec, entro cui si assumeva che fosse completamente valida, era ovviamente necessario assumerne l'applicabilità universale per trattare l'intero universo stellare. [...] Ai fini della loro discussione, [Kapteyn e van Rhijn] chiamarono la derivazione oltre 630 parsec la "seconda soluzione". Combinando sia la prima che la seconda soluzione, completarono il loro modello più completo (statico) dell'universo stellare. [...] Nell'articolo del 1920, descrissero un sistema stellare ellissoidale trasparente in cui la densità stellare, alle basse latitudini galattiche, diminuisce in tutte le direzioni con l'aumentare della distanza dal sistema centrato sul Sole. [...] Al suo perimetro, a circa 9.000 parsec dal Sole, la densità stellare era inferiore all'1% rispetto alla regione solare. Alle alte latitudini galattiche, i risultati di Kapteyn rappresentavano da vicino i dati osservativi. Sebbene Kapteyn e van Rhijn ammisero comunque che la loro soluzione non era altro che "provvisoria", molti altri considerarono i loro risultati quasi completi. Eventuali dati empirici aggiuntivi avrebbero perfezionato solo i dettagli e non i loro risultati generali.

Nel 1927, solo cinque anni dopo la scomparsa di Kapteyn, Oort e Lindblad scoprirono la rotazione galattica e Oort nel 1928 descrisse la dinamica di un disco galattico in rotazione differenziale, in cui le correnti stellari di Kapteyn furono sostituite dall'"ellissoide delle velocità" di Schwarzschild.

Nel 1932, Oort migliorò l'analisi dinamica svolta da Kapteyn sulla quantità di massa totale nelle vicinanze del Sole, rivelando che la densità totale di massa supera considerevolmente la densità di massa "visibile". Si trattò di un risultato importante che, reso ancora più grande su larghe scale, rimane tutt'oggi uno dei problemi centrali non risolti dell'astronomia moderna. Un modo per derivare la quantità di questa "materia oscura" oggi è quello di analizzare la curva di rotazione delle galassie, tecnica che lo stesso Oort sviluppò.

L'astronomo olandese Lodewijk Woltjer (1930-2019) si riferì ad esso come "l'universo sfortunato di Kapteyn", a causa del "momento sfortunato in cui Kapteyn presentò il suo universo e dell'interpretazione forse un po' non fisica che diede alle due correnti

*stellari, che avevano contribuito così tanto alla sua fama”.*

Si potrebbe concludere che Kapteyn morì in un momento storico ideale, lasciando dietro di sé non solo un'immagine coerente, ma anche gli ingredienti necessari all'espansione e al miglioramento delle proprie idee. I suoi lavori hanno contribuito molto alla conoscenza attuale della Via Lattea, in particolare durante gli anni prima che la radioastronomia e gli studi infrarossi rendessero l'intera Galassia “visibile”, non ostacolata dall'assorbimento interstellare. L'eredità di Kapteyn ebbe benefici anche in altre aree di ricerca, come i metodi dell'astronomia statistica e i principi dell'analisi dinamica, ma anche su personalità come lo stesso studente di Kapteyn, Jan Oort, e in generale sull'astronomia olandese, grazie alle sue numerose amicizie e connessioni, specialmente negli Stati Uniti, portando l'Olanda fuori da un certo isolamento.

# Bibliografia

- [1] P.C. van der Kruit, *Jacobus Cornelius Kapteyn: Born Investigator of the Heavens*, *Astrophysics and Space Science Library 416*, Springer (2015)
- [2] L. Belkora, *Minding the Heavens: The Story of Our Discovery of the Milky Way*, IOP Publishing (2003)
- [3] P. C. van der Kruit, K. van Berkel, *The Legacy of J.C. Kapteyn*, *Astrophysics and Space Science Library 246*, Kluwer Academic Publishers (2000)
- [4] P. Focardi, *L'Uomo e il Cosmo. Breve viaggio nella scienza che ci ha resi infinitamente piccoli*, Bononia University Press (2019)
- [5] T. Hockey, V. Trimble, T.R. Williams, K. Bracher, R.A. Jarrell, J.D. MarchéII, F.J. Ragep, J. Palmeri, M. Bolt, *The Biographical Encyclopedia of Astronomers*, Springer (2007)
- [6] Annalen van de Sterrewacht te Leiden, *Beschreibung der Registrir-Apparate der Sternwarte in Leiden*, A, 2, 6–18. (1870)
- [7] J.C. Kapteyn, *Onderzoek der trillende platte vliezen*, PhD. dissertation at the University of Utrecht under the supervision of Professor C.H.C. Grinwis. (1875)
- [8] J.C. Kapteyn, *Bestimmung von Parallaxen durch Registrir-Beobachtungen am Meridiankreise*, Annalen van de Sterrewacht te Leiden 7, 117–244. (1891)
- [9] J.C. Kapteyn, D. Gill, *The Cape Photographic Durchmusterung for the equinox 1875. Part I. Zones  $-18^{\circ}$  to  $-37^{\circ}$* , Annals of the Cape Observatory, South Africa, 3, 1-845. (1896)
- [10] J.C. Kapteyn, *Stern mit grösster bislang bekannter Eigenbewegung*, *Astronomische Nachrichten*, volume 145, p.159 (1897)

- [11] J.C. Kapteyn, D. Gill, *The Cape Photographic Durchmusterung for the equinox 1875. Part II. Zones  $-38^\circ$  to  $-52^\circ$* , Annals of the Cape Observatory, South Africa, 4, 1-702. (1897)
- [12] J.C. Kapteyn, *Verdeeling der kosmische snelheden. Toevoegsel aan de mededeeling van 5 Mei 1895.*, Akademie van Wetenschappen, Zittingsverslag 29 Mei 1897, 10 pages. (1897)
- [13] J.C. Kapteyn, *On the mean parallax of stars of determined proper motion and magnitude*, Publications of the Astronomical Laboratory at Groningen, 8, 1-31. (1900)
- [14] J.C. Kapteyn, D. Gill, *The Cape Photographic Durchmusterung for the equinox 1875. Part III. Zones  $-53^\circ$  to  $-89^\circ$* , Annals of the Cape Observatory, South Africa, 5, 1-757. (1900)
- [15] J.C. Kapteyn, *On the luminosity of the fixed stars*, Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings, Series B. Physical Sciences 3, 658-689. (1901)
- [16] J.C. Kapteyn, *On the luminosity of the fixed stars*, Publications of the Astronomical Laboratory at Groningen 11, 3-32. (1902)
- [17] J.C. Kapteyn, *Remarks on the determination of the number and mean parallax of stars of different magnitude and the absorption of light in space*, Astronomical Journal 24, 115-122. (1904)
- [18] J.C. Kapteyn, *Courants dans la Systéme Stellaire*, Archives Neerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles (Hollandsche Maatschappij der Wetenschappen), Ser. II, Tome XI, 32-54. (1906)
- [19] A. S. Eddington, B.A., M.Sc., *The Systematic Motions of the Stars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 67, Issue 1, November 1906, Pages 34-63, <https://doi.org/10.1093/mnras/67.1.34> (1906)
- [20] J.C. Kapteyn, *Plan of Selected Areas*, Astronomical Laboratory at Groningen, Hoitsema Brothers, Groningen. (1906)
- [21] K. Schwarzschild, *Über die Eigenbewegungen der Fixsterne*, Nachrichten der Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse. (1907)
- [22] F. Dyson, *The Systematic Motions of the Stars*, The Observatory, Vol. 31, p. 200-204. (1908)



- [23] J.C. Kapteyn, *On the number of stars of determined magnitude and determined Galactic latitude*, Publications of the Astronomical Laboratory at Groningen, 18, 1-54. (1908)
- [24] J.C. Kapteyn, *On the number of stars of determined magnitude and determined Galactic latitude*, Publications of the Astronomical Laboratory at Groningen 18, 1-54. (1908)
- [25] J.C. Kapteyn, *On the mean star-density at different distances from the solar system*, Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences 10, 626-635. (1908)
- [26] J.C. Kapteyn, *On the absorption of light in space*, Astrophysical Journal 29, 46-54. Also: Contributions from the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington No. 31. (1909)
- [27] J.C. Kapteyn, *On the absorption of light in space*. Second Paper. Astrophysical Journal 30, 284-317. Also: Contributions from the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington No. 42. (1909)
- [28] J.C. Kapteyn, *On the change of spectrum and color index with distance and absolute brightness. Present state of the question.*, Astrophysical Journal 40, 187-204. Also: Contributions from the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington No. 83. (1914)
- [29] P.J. van Rhijn, *The change of color with distance and apparent magnitude together with a new determination of the mean parallaxes of the stars of given magnitude and proper motion.*, Astrophysical Journal, 43, 36-42. Also: Contributions from the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington No. 110. (1916)
- [30] P.J. van Rhijn, *On the number of stars of each photographic magnitude in different Galactic latitudes.*, Publications of the Kapteyn Astronomical Laboratory at Groningen, 27, 1-63. (1917)
- [31] J.C. Kapteyn, P.J. van Rhijn, H. Weersma, *The secular parallax of the stars of different magnitude, Galactic latitude and spectrum.*, Publications of the Astronomical Laboratory at Groningen 29, 1-63. (1918)
- [32] H. Shapley, *Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. XII. Remarks on the arrangement of the sidereal universe*, Astrophysical Journal, 49, 311-336. (1919)

- [33] J.C. Kapteyn, P.J. van Rhijn, *On the distribution of the stars in space especially in the high Galactic latitudes*, Astrophysical Journal 52, 23–38. Also: Contributions from the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington No. 188. (1920)
- [34] J.C. Kapteyn, P.J. van Rhijn, *Numbers of stars between definite limits of magnitude, proper motion and Galactic latitude for each spectral class, together with some other investigations.*, Publications of the Astronomical Laboratory at Groningen 30, 1–110. (1920)
- [35] J.C. Kapteyn, *First attempt at a theory of the arrangement and motion of the Sidereal System*, Astrophysical Journal 55, 302–328. Also: Contributions from the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington No. 230. (1922)
- [36] A. Pannekoek, *J.C. Kapteyn en zijn astronomisch werk*, Wetenschappelijke Bladen Vol. I, 257-295. (1923)
- [37] P.J. van Rhijn, *On the frequency of the absolute magnitudes of the stars*, Publications of the Kapteyn Astronomical Laboratory at Groningen, 38, 1–77. (1925)
- [38] H. Hertzsprung-Kapteyn, *J.C. Kapteyn: zijn leven en werken*, P. Noordhoff (1928) (English translation by P.C. van der Kruit)
- [39] P.J. van Rhijn, *Distribution of Stars According to Apparent Magnitude, Galactic Latitude and Galactic Longitude*, Publications of the Kapteyn Astronomical Laboratory Groningen, vol. 43, pp.1-104. (1929)
- [40] H. Shapley, *The Super-Galaxy Hypothesis*, Harvard College Observatory Circular, vol. 350, pp.1-7. (1930)
- [41] J.H. Oort, *The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems*, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, Vol. 6, p.249. (1932)
- [42] F.K.A. Schwassman, P.J. van Rhijn, *Bergedorfer Spektral-Durchmusterung der 115 nordlichen Kapteynschen Eichfelder da F.K.A. Schwassmann and P.J. van Rhijn*, Hamburger Sternwarte, Bergedorf. (1935-1953)
- [43] H. Shapley, *Through Rugged Ways to the Stars*, Scribner. (1969)
- [44] J.N Bahcall, R.M. Soneira, *The universe at faint magnitudes. I. Models for the Galaxy and the predicted star counts.*, Astrophysical Journal, Suppl. Ser., Vol. 44, p. 73-110. (1980)

- [45] A. Blaauw, J.A. de Boer, E. Dekker, J. Schuller tot Peursum-Meijer, *In Sterrenkijken bekeken*, Groningen University Museum. (1983)
- [46] P.C. van der Kruit, *Surface photometry of edge-on spiral galaxies. V. The distribution of luminosity in the disk of the Galaxy derived from the Pioneer 10 background experiment.*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 157, p. 230-244. (1986)
- [47] O.J. Eggen, *Star Streams and Galactic Structure*, *Astronomical Journal* v.112, p.1595 (1996)
- [48] E. Kotoneva, E., K. Innanen, K., P.C. Dawson, P.R. Wood, M. de Robertis, *A study of Kapteyn's star*, *Astronomy and Astrophysics*, 438, 957–962. (2005)
- [49] D. Azzaro, G. Battisti, C. Del Sole, *Atlante Grafico delle Galassie*, Unione Astrofili Italiani. (2007)
- [50] R.B. Orellana, M.S. de Biasi, I.H. Bustos Fierro, J.H. Calderon, *A revisit to the region of Collinder 132 using Carte du Ciel and Astrographic Catalogue plates*, *Astronomy and Astrophysics*, 521, A39. (2010)
- [51] E. Wylie-de Boer, *Evidence of Tidal Debris from  $\omega$  Cen in the Kapteyn Group*, *Astronomical Journal*, v.139, Issue 2, pp. 636-645. (2010)
- [52] R. Schönrich, J. Binney, W. Dehnen, *Local kinematics and the local standard of rest*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403, pp. 1829–1833. (2010)
- [53] Koen, C. et al., *UBV(RI)<sub>C</sub> JHK observations of Hipparcos-selected nearby stars*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403 (4), 1949–1968. (2010)
- [54] G. Anglada-Escudé, P. Arriagada, M. Tuomi, M. Zechmeister, J.S. Jenkins, A. Ofir, S. Dreizler, E. Gerlach, C.J. Marvin, A. Reiners, S.V. Jeffers, R.P. Butler, S.S. Vogt, P.J. Amado, C. Rodríguez-López, Z.M. Berdiñas, J. Morin, J.D. Crane, S. A. Shectman, I.B. Thompson, M. Díaz, E. Rivera, L.F. Sarmiento, H.R.A. Jones, *Two planets around Kapteyn's star: a cold and a temperate super-Earth orbiting the nearest halo red dwarf*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 443, Issue 1, 1 September 2014, Pages L89–L93, <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slu076> (2014)

- [55] E.F. Guinan, S.G. Engle, A. Durbin, *Living with a Red Dwarf: Rotation and X-Ray and Ultraviolet Properties of the Halo Population Kapteyn's Star*, The Astrophysical Journal, 821 (2): 14. (2016)