

УДК 52  
ББК 22.6  
Э-33

**Эйнасто, Ян Эльмарович.**

Э-33 Темная материя и темная энергия / Я. Эйнасто, А. Д. Чернин ; предисловие А. В. Засова. — 174 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-89818-131-4

Книга состоит из двух разделов, в которых подробно рассказывается о двух загадочных субстанциях нашей Вселенной, относительно которых до сих пор нет единой точки зрения.

Темная материя и темная энергия — две невидимые космические субстанции, на которые в сумме приходится более 95% полной массы/энергии наблюдаемой Вселенной. Их микроскопическая структура неизвестна. Это одна из фундаментальных проблем физики и астрономии XXI века.

УДК 52  
ББК 22.6

*На обложке: диаграмма состава наблюдаемой Вселенной.*

ISBN 978-5-89818-131-4

© Переиздание. ДМК Пресс, 2022  
© Оформление. Век 2, 2018

## Оглавление

Темные субстанции.....	5
<b>Сказание о темной материи.....</b>	<b>9</b>
1. Пролог.....	10
2. Эпик и природа галактик.....	11
3. Григорий Кузмин и проблема локальной темной материи.....	15
4. Населения Галактики.....	22
5. Тыравере в шестидесятих.....	25
6. Модели Галактики.....	32
7. Парадокс массы в галактиках.....	36
8. Массивные короны галактик.....	41
9. Борьба вокруг темной материи.....	47
10. Тыравере в семидесятих.....	55
11. Вопрос Зельдовича.....	58
12. Сверхскопления, пустоты и цепочки.....	66
13. В поисках новых подтверждений.....	70
14. Холодная темная материя.....	75
15. Тыравере в восьмидесятих.....	76
16. Темная энергия.....	81
17. Упорядоченность структуры.....	84
18. Тыравере в девяностых. Пробуждение масс-медиа.....	86
19. Эпилог.....	90

<b>Темная энергия и всемирное антитяготение .....</b>	<b>93</b>
1. Введение .....	94
2. Закон всемирного антитяготения .....	100
2.1. Вакуум Эйнштейна–Глинера .....	100
2.2. Проблема естественности.....	104
2.3. На ньютоновском языке.....	108
2.4. «Термодинамическое» уравнение Фридмана.....	114
2.5. Момент нулевого тяготения .....	115
2.6. Данные космического аппарата WMAP .....	121
3. Темная энергия в ближней Вселенной .....	123
3.1. Парадокс Хаббла–Сэндиджа .....	124
3.2. Регулярный поток.....	127
3.3. Вблизи Млечного Пути.....	130
3.4. Локальная космология.....	132
3.5. Малый взрыв .....	137
4. Внутренняя симметрия в космологии.....	140
4.1. Эйнштейн и Фридман о топологии мира.....	140
4.2. Дополнительные измерения .....	142
4.3. «Истинные» константы и темная энергия.....	148
4.4. Четыре энергии .....	150
4.5. Симметрия.....	155
4.6. Совпадение плотностей .....	159
4.7. Снова иерархия.....	161
4.8. Большие числа.....	165
4.9. Проблема Дикке.....	167
Список литературы.....	172

## Тёмные субстанции

Тёмная материя, тёмная энергия... Эти завораживающие словосочетания относятся к совсем разным понятиям, их нельзя путать, но что они означают? Здесь до сих пор нет единой точки зрения. Одни склонны воспринимать исследование этих «тёмных» субстанций как успешный прорыв науки в область неизведанного, другие видят в них свидетельство очевидной неполноты человеческих знаний, поскольку природа ни тёмной материи, ни тёмной энергии до сих пор толком неизвестна (хотя различных гипотез хватает)... Наконец, третьи сомневаются в самом существовании темной материи и/или энергии и видят причину их введения в науку в том, что используемые законы физики не известны с абсолютной точностью, и требуют определённых коррекций при их применении в необычных условиях — для описания больших и разреженных пространств Вселенной. Действительно, существование этих загадочных субстанций пока гипотетично и нуждается в доказательствах. Но, тем не менее, представления о них не высосаны из пальца, они хорошо обоснованы и базируются на анализе данных астрономических измерений, не входят с ними в конфликт и, главное, хорошо вписываются в общую современную картину эволюции Вселенной, и поэтому выглядят убедительными. Существование тёмной материи и энергии позволяет многое объяснить из того, что раньше казалось непонятным, в то время как немало научных гипотез, смелых предположений и теоретических разработок оказались отвергнутыми, поскольку вошли в конфликт с новыми данными наблюдений.

Чтобы легче понять, на чём основаны существующие представления о темной материи и энергии, самое правильное – проследить рождение и развитие идей об их существовании, и показать, к каким следствиям они приводят. Именно это читатель найдёт в двух предлагаемых разделах книги. Оба раздела написаны признанными специалистами – астрофизиками, внёсшими большой вклад в развитие представлений о тёмной материи и энергии. При этом эти разделы книги сильно различаются не только по содержанию, но и по стилю изложения.

Раздел «Сказание о тёмной материи» Яана Эйнасто – это легко читаемая история не только о том, как пробивала себе дорогу в науке идея о массивных невидимых гало («коронах») тёмной материи вокруг нашей и других галактик, но и рассказ о становлении и истории в советский и пост-советский периоды эстонской обсерватории в Тыравере, где эта идея родилась и вызрела. Работы по распределению масс в галактиках, выполненные в Эстонии под руководством Яана Эйнасто действительно оказались пионерскими, при этом сама идея о привлечении темной массы для объяснения динамики галактик и формирования крупномасштабной ячеистой структуры Вселенной далеко не сразу получила поддержку и признание. В этом рассказе читатель не найдёт описания результатов исследования ожидаемых характеристик тёмной массы и её роли в эволюции галактик и их систем, полученные за последнее десятилетие,<sup>1</sup> однако зарождение и драматическое развитие идеи о преобладании во Вселенной невидимой материи описано живо, наглядно и поучительно.

В ином стиле написан раздел А.Д. Чернина «Тёмная энергия и всемирное антитяготение». Здесь читателя ждёт встреча с другой нерешённой научной проблемой, связанной с эволюцией окружающего мира. Автор с физической точки зрения аргументирует существование такой субстанции, таких сил, которые определяют ускоренный характер расширения Вселенной в современную эпоху, в отличие от того, что имело место миллиарды лет назад. Читатель узнает, как родилось и на чём основано представление о космической энергии, условно называемой «тёмной», которая, несмотря на низкую плотность, пре-

---

<sup>1</sup>Интересующимся можно порекомендовать обзор «Тёмная масса в Галактиках А.В. Засова и др. в УФН, том 187, № 1, с. 3-44.

обладает над всеми другими видами энергии на больших масштабах, и обладает свойствами «антигравитации», то есть способностью своим давлением расталкивать не связанные между собой объекты. Эта идея оказалась удивительно плодотворной и хорошо вписалась в общую картину расширения мира галактик, так что многие считают существование темной энергии доказанным. Однако до сих пор идёт дискуссия о природе этой энергии и её правильном физическом описании. Ограничиваясь самыми простыми формулами, автор объясняет, откуда возникла необходимость введения «антигравитации» в теорию расширяющейся Вселенной и рисует физическую картину взаимодействия тёмной энергии с обычной материей и те выводы, которые из неё следуют.

Обе части книги роднит то, что они показывают в динамике, каким путём происходят в науке поиски решения фундаментальных проблем формирования и эволюции окружающего мира, к каким неожиданным и далеко идущим выводам приводит анализ совокупности наблюдательных данных. Книга может быть хорошим подарком любителям астрономии, интересующимся яркими идеями и нерешёнными проблемами, с которыми встретилась современная наука об эволюции Вселенной — космология.

А. В. Засов,  
профессор физического факультета  
МГУ им. М. В. Ломоносова

# СКАЗАНИЕ О ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

**Яан Эйнасто**

Перевод с эстонского В. Пустынского

## 1. Пролог

Случилось мне как-то прочесть книгу Томаса Куна «Структура научных революций». Дело происходило в середине 1970-х годов, проблема темной материи была актуальна, и борьба сторонников и противников этой концепции была в самом разгаре. Я обратил внимание на то, что открытие темной материи очень напоминает описанные Куном научные революции. А в 1985 году в Принстонском университете состоялась конференция, посвященная темной материи. В заключительном слове Скотт Тремейн назвал историю ее обнаружения типичной научной революцией. Бинни и Тремейн в своей монографии о динамике галактик также подчеркивали революционный характер открытия темной материи.

Тартуские астрономы участвовали в изучении темной материи длительное время – начиная с основателя современной эстонской астрономической школы Эрнста Эпика и его ученика Г. Кузмина и вплоть до ее нынешних представителей. Проблема темной материи занимала астрономов многих стран, и все они пришли к этой проблеме разными путями. Я попытаюсь здесь рассказать, каким путем к проблеме темной материи пришли тартуские астрономы, и какими были наши трудности при решении этой проблемы. Очевидно, что история темной материи в рассказе, скажем, принстонского астронома звучала бы иначе. Но в данном случае разные точки зрения дополняют друг друга.



## 2. Эпик и природа галактик

Эрнст Эпик родился в маленьком городе Кунда в 1893 году. Он начал занятия физикой и математикой самостоятельно еще в школьные годы. Чтобы получить университетское образование, Эпик отправился в Москву, где репетиторством легче было заработать на жизнь. Так как основы физики и математики к этому времени уже были ему ясны, он сразу мог приступить к исследовательской работе. Эпик пытался разобраться в небесных явлениях, а нерешенных проблем в то время было предостаточно. Еще совсем недавно астрономы были убеждены, что все видимые невооруженным глазом звезды и бесчисленное множество слабых звездочек образуют большую звездную систему – Галактику, которой принадлежит и наше Солнце – рядовая звезда. В то время многие астрономы отождествляли Галактику со всей Вселенной. Например, в 1914 году вышла из печати монография сэра Артура Эддингтона «Движение звезд и строение Вселенной». На самом деле речь там шла только о движении звезд в Млечном Пути, то есть в нашей Галактике.

Выяснение размеров Галактики наталкивалось на трудности. Не было известно, ослабевает ли излучение вследствие поглощения и искажается ли тем самым видимая яркость звезд; их яркость была важна для определения расстояний.

В одной из своих первых работ (опубликованной в 1915 году) Эпик рассматривает этот вопрос. Он разрабатывает метод определения плотности вещества вблизи плоскости Галактики по вертикальным движениям звезд относительно этой плоскости: это позволяло найти количество материи, поглощающей свет. Звезды движутся относительно плоскости симметрии вверх-вниз. Чем больше вертикальная скорость, тем выше звезда может подняться над плоскостью Галактики. Сравнение скоростей и расстояний позволяет вычислить силу гравитационного поля и плотность вещества в плоскости Галактики. Изучая доступные ограниченные данные, Эпик находит, что плотность вещества вблизи галактической плоскости вполне согласуется с известным количеством звезд. Отсюда он делает вывод, что в Галактике не может быть большого количества поглощающей темной материи: в противном случае его влияние на вертикальные движения звезд было бы заметным. Насколько нам

Эрнст Юлиус Эпик  
1972 год

известно, это было первое исследование темной материи в нашей Галактике. Как мы увидим далее, звездные астрономы впоследствии обращались к этой проблеме неоднократно.

Другой нерешенной проблемой была природа туманностей. К тому времени с помощью телескопов были открыты тысячи туманностей. Некоторые из них (например, туманность в созвездии Ориона) походили на газовые облака. Другие имели вид диска или кольца (за внешнюю схожесть с планетами их назвали *планетарными туманностями*). Третьи имели спиральную структуру. Встречались и туманности эллиптической формы. Мнения астрономов о природе туманностей разделились: некоторые думали, что это газовые образования внутри нашей Галактики, другие приводили доводы в пользу того, что туманности находятся на больших расстояниях от Галактики и образуют независимые «острова» во Вселенной.

Для обсуждения этой проблемы Национальная академия наук США в 1920 году организовала публичную дискуссию, в которой известные американские астрономы Кертис и Шепли выступили с доводами в пользу каждой из точек зрения. Но это обсуждение не дало результата. Оно наглядно показало, что научную проблему путем дискуссий не решить: решение можно отыскать, лишь глубоко изучив вопрос. Участники того обсуждения даже не догадывались, что ответ на поставленный вопрос уже был к тому времени известен. Эрнст Эпик также питал к этому вопросу интерес. Он внимательно следил за научной литературой и обратил внимание на то, что американский астроном Слайфер измерил скорость вращения галактики в со-



звезды Андромеды (так называемой Туманности Андромеды). Это потребовало от него героических усилий: чувствительность фотопластинок в то время была не слишком высока, а телескопы недостаточно мощны. Слайфер потратил несколько ночей на то, чтобы зарегистрировать на фотопластинке спектр центральной, самой яркой области Туманности Андромеды. Выяснилось, что спектральные линии немного наклонены. Это указывало на вращение Туманности: на одном ее краю вещество удаляется от наблюдателя, а на другом приближается к нему. Такое движение приводит к наклону спектральных линий в соответствии с законом Доплера. К счастью для Эпика, американские астрономы не сумели оценить важность этого наблюдения. Ломая голову над тем, как приложить это наблюдение к решению проблемы туманностей, Эпик вскоре нашел, как вычислить расстояние до Туманности Андромеды.

Его идея такова. При удалении от нас линейный размер уменьшается обратно пропорционально расстоянию, а светимость – как квадрат расстояния. Видимую светимость центральной части Туманности Андромеды можно легко найти по фотометрическим наблюдениям. Абсолютная же светимость связана с массой. И видимую, и абсолютную светимости можно выразить в солнечных единицах. Эпик сделал важное допущение: он предположил, что Туманность Андромеды сходна с нашей Галактикой, и потому отношение массы к светимости у нее такое же, как у нашей Галактики. Эту величину можно найти, опираясь на данные о Млечном Пути. Используя найденное им самим значение плотности вещества в Галактике, Эпик получил, что отношение массы к светимости у туманности Андромеды равно 2,63 (в солнечных единицах). Последним шагом в этом рассуждении было взаимное увязывание видимой и абсолютной яркости Туманности Андромеды с ее видимым и абсолютным линейным размером, что позволило определить расстояние до Туманности Андромеды. В результате Эпик получил 785 кпк (около 2 миллионов световых лет). Это расстояние более чем десятикратно превышает размер нашей Галактики. Следовательно, речь идет о самостоятельной галактике вне Млечного Пути. Свои результаты Эпик доложил в 1918 году на заседании Московского общества любителей астрономии. Они были столь важны, что Эпик повторил анализ, воспользовавшись новыми

данными об отношении массы к светимости, и на сей раз опубликовал их в ведущем астрономическом журнале *Astrophysical Journal* в 1922 году.

Несколько лет спустя расстояние до Туманности Андромеды измерил американский астроном Хаббл, воспользовавшись совсем другой методикой. Ему посчастливилось обнаружить в Туманности Андромеды переменные звезды (так называемые цефеиды). Периоды цефеид тем больше, чем ярче звезда. Отношение периода к светимости можно было калибровать по цефеидам в нашей Галактике. Хаббл нашел расстояние до Туманности Андромеды равным 220 кпк. По современным данным, это расстояние равно 700 кпк. Таким образом, результат Эпика точнее результата Хаббла.

В этих работах Эпик выяснил природу спиральных туманностей. Одновременно он показал, что наша Вселенная много больше, чем полагали ранее. Долгое время честь первого определения расстояния до Туманности Андромеды приписывалась Хабблу, и лишь в последнее время работу Эпика тоже заметили.

Пару лет спустя Хаббл сделал очень важное открытие: он обратил внимание на то, что галактики удаляются от нас тем быстрее, чем дальше они находятся. Отсюда можно заключить, что вся Вселенная расширяется. Следует добавить, что Эпик был в числе первых астрономов, кто из факта расширения сумел сделать вывод не только о том, что Вселенная расширяется, но и о том, что она сравнительно недавно образовалась. В то время было распространено мнение, что возраст Галактики (а значит, и Вселенной) составляет по меньшей мере 100 триллионов лет. Этот вывод основывался на анализе движения звезд. Взаимные сближения звезд и столкновения крайне редки; тем не менее, данные об их движении свидетельствуют о том, что звезды образуют в Галактике хорошо перемешанную равновесную систему, подобно молекулам и атомам в обычном газе. Вычисления того времени показывали, что время, требуемое для достижения равновесия, составляет не менее триллиона лет. Эпик показал, что целый ряд не зависящих друг от друга методов указывает на значительно меньший возраст Вселенной. Впервые, это возраст метеоритов и горных пород на Земле, который уже умели определять по соотношению радиоактивных изотопов: возраст старейших метеоритов составлял 3-4 милли-

арда лет. Во-вторых, это возраст самих звезд. К началу 30-х годов Эпику уже были известны основные источники энергии звезд и основы теории звездной эволюции. Ему было ясно, что главный источник энергии звезд – превращение водорода в гелий в термоядерных реакциях. Скорость высвобождения энергии в этих реакциях, вместе со скоростью излучения энергии, также были приблизительно известны, что позволяло оценить возраст звезд. Оказалось, что горячие гиганты еще очень молоды; их существование свидетельствует о том, что звездообразование в Галактике продолжается до сих пор. Возраст звезд типа Солнца Эпик оценил примерно в 3 миллиарда лет. В Млечном Пути имеется множество звездных скоплений, которые распадаются со временем. Эпик оценил их динамический возраст в несколько миллиардов лет. И, наконец, расширение Вселенной. Если мир сейчас расширяется, значит, ранее его размеры были меньше, и по скорости роста его размеров легко определить время расширения. Оно, по данным того времени, составляло примерно 2 миллиарда лет. Эпик обратил внимание на то, что все эти независимые оценки возраста приводят приблизительно к одному и тому же результату. Он сделал вывод, что это совпадение не может быть случайным: оно указывает на зарождение Вселенной несколько миллиардов лет назад – вероятно, в результате какого-то взрыва.

Современные данные подтвердили правильность рассуждений Эпика. Только Вселенная оказалась куда более старой: ее возраст около 14 миллиардов лет. Этими открытиями завершилась первая великая смена парадигм в современной космологии: на смену миру Млечного Пути пришел расширяющийся мир сравнительно недавно возникших галактик. Приятно констатировать, что в формировании этой картины мира несколько решающих шагов сделал эстонский астроном Эрнст Эпик.

### **3. Григорий Кузмин и проблема локальной темной материи**

Исследования строения галактик, начатые Эпиком, продолжил Григорий Кузмин. Он родился в Выборге в 1917 году. Вскоре семья переехала в Таллин, где Григорий получил среднее образование. Еще школьником он проявлял интерес к ас-

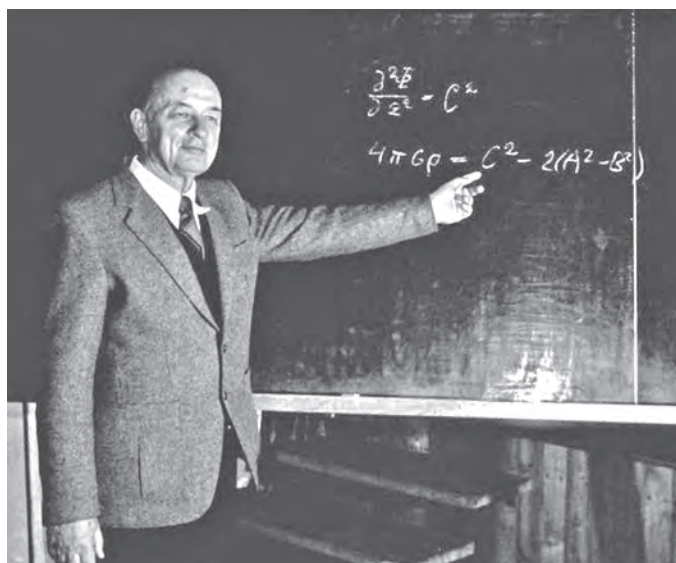


Рис. 2. Григорий Кузмин объясняет расчет локальной плотности в Галактике. 1970-е годы.

трономии, и учеба в Тартуском университете стала естественным продолжением его образования. В Тарту научным руководителем Григория Кузмина стал Эрнст Эпик. Как и его наставник, Кузмин приступил к научным исследованиям еще студентом. Первой его работой было исследование эволюции космической пыли в окрестностях Солнца. За этой работой последовало определение плотности вещества в плоскости Галактики по вертикальным колебаниям звезд, а также разработка детальной модели строения и динамики Туманности Андромеды. Этот перечень удивительным образом перекликается с юношескими работами Эпика. Первые важные результаты Кузмин получил еще в 1942 году, но в годы войны они остались неопубликованными (как и первая работа Эпика о расстоянии до Туманности Андромеды). Ранее Тартуская обсерватория входила в состав Тартуского университета. В 1947 году при Эстонской Академии наук создали Институт физики, математики и механики, в состав которого включили и обсерваторию. Поначалу новый институт оказался не в состоянии определить поле своей деятельности, но в 1950 году его директором назначили академика Аксе-

ля Киппера, астронома, который также получил образование в довоенный период. По инициативе Киппера возобновилось издание публикаций Тартуской обсерватории. Так у Кузмина появилась возможность опубликовать свои работы. В 1952 году он опубликовал три статьи, посвященные плотности вещества в окрестностях Солнца, модели нашей Галактики и третьему интегралу движения звезд.

Тем временем приобрела актуальность задача определения плотности материи вблизи галактической плоскости. Ей занимался известный голландский астроном Ян Оорт. В опубликованной в 1932 году работе он нашел, что известных звезд недостаточно для объяснения вертикального ускорения звезд в Галактике, вследствие чего приходится предположить наличие темной материи вблизи галактической плоскости. Задачей работы Кузмина, судя по всему, и была проверка результатов Оорта. Рассуждения Кузмина были такими же, как и у его предшественников, но он усовершенствовал методы определения гравитационного ускорения и плотности вещества. Во-первых, Кузмин нашел, что для определения плотности нет необходимости рассчитывать гравитационное поле в целом (как полагал Оорт), достаточно найти лишь скорость изменения гравитационного ускорения вблизи галактической плоскости. Эта скорость имеет простую связь с отношением средней скорости звезд к толщине звездной популяции. Во-вторых, Кузмин нашел, как можно добиться взаимной компенсации ошибок определения скоростей и координат звезд; таким образом, уменьшается влияние на результат неизбежных ошибок измерения. Полученные результаты Кузмин представил в форме кандидатской диссертации, которую успешно защитил в 1952 году. Основной ее вывод заключался в том, что наблюдательные данные не подтверждают наличия темного вещества вблизи галактической плоскости.

Тем самым Кузмин бросил вызов как Оорту, так и московским астрономам, которые также занимались этой проблемой и подтвердили гипотезу о наличии темного вещества вблизи галактической плоскости.

Однако этим дело не ограничилось. В своей второй работе (опубликованной в тот же год) Кузмин разработал новый метод описания строения Галактики. Важной ее частью было отыскание связи между скоростью вращения Галактики и ее плот-

ностью. Ранее использовалась модель, в которой гравитационное поле представлялось набором эллипсоидов равной плотности. Кузмин создал модель, в которой плотность могла меняться непрерывно. Это позволило намного точнее описать изменение плотности и скорости вращения. Галактика не похожа на Землю, которая ограничена твердой поверхностью: она подобна газовому облаку, у нее нет твердых краев. Роль молекул газа в Галактике играют звезды. Кузмин, помимо более точной эмпирической модели, предложил также ее теоретическую интерпретацию, разработав так называемую теорию третьего интеграла движения звезд. Интегралы движения – это величины, которые остаются постоянными при движении звезд в Галактике. Хорошо известны два интеграла движения: интеграл энергии и интеграл момента импульса. У третьего интеграла нет наглядной интерпретации, но он необходим, чтобы объяснить вид звездных орбит.

Первоначально эти результаты появлялись только в публикациях Тартуской обсерватории. Вскоре открылась возможность представить их астрономическому сообществу. В начале 1950-х годов Киппер задумал создать новую обсерваторию, за пределами Тарту, где условия наблюдения лучше. Идея была не нова, об этом тартуские астрономы задумывались как перед Первой, так и перед Второй мировыми войнами. Однако обстоятельства не позволили осуществить это намерение. После второй мировой войны многие астрономические центры в Советском Союзе приступили к строительству новых обсерваторий; в других странах это было сделано значительно раньше. Чтобы обеспечить финансирование задуманного проекта, Киппер счел нужным заручиться поддержкой астрономического сообщества. С этой целью весной 1953 года в Тарту было созвано всесоюзное совещание или, как тогда называли, выездное заседание Астрономического совета. В это время я как раз находился в Москве, выписывая из каталогов необходимые для моего исследования данные. Со стороны Москвы одним из активных организаторов выступил профессор Павел Петрович Паренаго, признанный авторитет в изучении строения Галактики. Мы вместе обсуждали программу Пленума, в которую было включено примерно равное количество докладчиков из Москвы и из Тарту. Со стороны Москвы основным докладчиком был сам Паренаго: он как раз за-



вершил цикл исследований по теме, очень близкой к теме работ Кузмина. С нашей стороны основными докладчиками был директор института профессор Аксель Киппер и Григорий Кузмин. Слово получили и молодые астрономы: помимо меня, выступали даже студенты и любители астрономии.

Доклады тартуских астрономов оставили глубокое впечатление. Киппер говорил о своей теории излучения газовых туманностей, которая как никогда точно объясняет их строение. Эта теория до сих пор служит основой при интерпретации спектров газовых туманностей. Но особый интерес вызвали доклады Паренаго и Кузмина, посвященные одному и тому же вопросу. Паренаго был блестящим лектором и излагал свои результаты с присущей ему простотой и ясностью. Кузмин же в ту пору оставался еще малоизвестным молодым ученым, и можно было опасаться, что тягаться с московскими светилами будет для него безнадежным делом. И в самом деле, докладу Кузмина не хватало присущего Паренаго блеска. Тихим голосом он шаг за шагом развивал разработанную им модель, обосновывал свои нововведения и сравнивал ее с более ранними, в особенности с моделью Паренаго. По ходу изложения становилось все яснее, что подход Кузмина глубже и шире, а его модель представляет совершенно новый шаг в изучении строения Галактики. В итоге у всех возникло ощущение, что тартуские астрономы на сей раз победили московских со счетом 2:0. Надо отдать должное гостям из Москвы: они нисколько не позавидовали, а признали высокий уровень тартуских астрономов и горячо поддержали наши планы по развитию обсерватории.

Эта история имела и другие последствия. У нас в то время было модным принижать результаты своих ученых. В руководстве Эстонской Академии наук царило мнение, будто наши астрономы занимаются несущественными проблемами, и что пора бы заняться более важными делами, например, мичуринской биологией. Чтобы помочь в организации «похорон» астрономии, на конференцию в Тарту Академия наук направила вице-президента Густава Наана. Он прослушал доклады и с удивлением отметил, что дела обстоят совершенно иначе. Надо отдать должное и ему: Наан быстро изменил свое мнение, и в его лице астрономы приобрели главного своего защитника в академических кругах.

После Пленума Киппер пригласил тартуских астрономов к себе домой на торжественный ужин. Нас тогда было немного, и мы все поместились за его столом. После первого бокала Киппер окинул взглядом собравшихся и сказал: «Ну, ребята пора браться за дело». Была образована коллегия, – неофициальный орган, который занялся подготовкой к созданию новой обсерватории. Первым делом надо было подыскать подходящее место. Для этого мы с супругой и студентами выезжали на велосипедах на север и юг от Тарту в поисках возвышенности, где бы можно было построить обсерваторию. Любопытное совпадение: наша первая остановка 12 июня 1953 года была как раз на возвышенности Тыравере, то есть там, где позднее обсерваторию и построили. В последующие годы к северу и югу от Тарту в избранных местах проводились метеорологические наблюдения. Мы не рассчитывали обнаружить различия в качестве изображений звезд, а пытались найти возможные различия в количестве ясных ночей, частоте осенних туманов, и т.п. Существенных различий между севером и югом мы не нашли и выбрали южное направление. 12 января 1957 года весь коллектив обсерватории выехал автобусом, чтобы сравнить разные места и принять окончательное решение. Местом стройплощадки мы выбрали возвышенность примерно в километре от шоссе Тарту–Рига и от железнодорожной станции.

Киппер считал важным удаленность от больших магистралей, чтобы движение не мешало нашей работе, в особенности астрономическим наблюдениям. С другой стороны, было важно, чтобы остановка автобуса и поезда находились не слишком далеко. Как показала наша жизнь в новой обсерватории, Киппер оказался прозорлив в своем расчете.

Весной 1957 года начались строительные работы, и в мае 1961 года первые астрономы перебрались в Тыравере, в их числе и наша семья. Главное здание обсерватории еще не было достроено, и несколько лет рабочими помещениями служили две квартиры.

Так или иначе, заботы по созданию новой обсерватории оставляли время и для науки. Моделирование галактик по-прежнему сохраняло актуальность. В 1956 году голландский астроном Мартен Шмидт опубликовал работу, в которой предложил новую модель Галактики. Она, как и ранее разработанные

в Голландии модели, представляла Галактику набором из множества эллипсоидов равной плотности. Но в отличие от прежних моделей, Шмидт попытался представить реальные звездные популяции. Он также уточнил значения характеристических параметров. Его модель получила очень широкое признание астрономического сообщества. В ней приводилась также новая оценка плотности вещества в окрестности Солнца. Шмидт нашел, что плотность вещества заметно превосходит ту величину, которая следует из плотности звездного населения. Иными словами, согласно его оценке, в плоскости Галактики имеется значительное количество темной материи. К такому же выводу через пару лет придет и крупный голландский авторитет в астрономии Ян Оорт.

Результат голландцев примерно в два раза отличался от значения, найденного тартускими астрономами. Для объяснения возможных причин этого Кузмин заново проанализировал свой материал и тщательно сравнил результат с результатами других авторов. Он также порекомендовал своим ученикам Хейно Элсалу и Михкелю Ййэвэру заново определить плотность на основе нового наблюдательного материала и по иной методике. Результаты Элсалу были готовы в 1959 году, Ййэвэр опубликовал свои результаты в 1972 и 1974 годах. Как новый анализ самого Кузмина, так и результаты Элсалу и Ййэвэра подтвердили ранние выводы Кузмина: все данные указывали на то, что в окрестности Солнца количество темной материи пренебрежимо мало.

Проблема локального темного вещества в Галактике остается актуальной по сей день. В 1980-х годах ей занимался Джон Бакол, один из ведущих американских астрономов. Он разработал модель, которая во многих отношениях напоминает модель Шмидта. Бакол уделил большое внимание определению плотности вещества в окрестности Солнца. Согласно его данным, плотность темной материи сопоставима с плотностью обычного вещества; иными словами, полная плотность материи примерно вдвое превосходит плотность обычного вещества. В 1985 году в Принстонском университете состоялась первая организованная Международным астрономическим союзом конференция, посвященная изучению темной материи. У меня была возможность в ней участвовать. В своем докладе я представил об-

зор результатов Кузмина, Ээлсалу и Ййэвэера. За докладом последовало обсуждение, и слово взял Джон Бакол. Он обратил внимание на различие между результатами тартуских – иными словами, советских, то есть восточных – и западных астрономов. Бакол подчеркнул, что у нас, на Востоке, пользовались старыми и неточными данными. В своем ответе мне хотелось отметить, что тартуская астрономическая школа создана Эпиком, и мы не желаем, чтобы нас считали беспомощными восточными астрономами, и что нам совершенно не хочется рассматривать эту научную дискуссию как политический спор на фоне проблем между Востоком и Западом. Все-таки я удержался от колкостей и ограничился тем, что подчеркнул исключительную способность Кузмина найти верный результат даже на основе не лучшего наблюдательного материала. Позднейшие исследования еще раз подтвердили результаты Кузмина. К чести Бакола нужно сказать, что в сборнике работ конференции он достаточно подробно описал, в приложении к своему докладу, метод Кузмина. Этот инцидент не омрачил наших отношений. Я гостил дома у Бакола, у тартуских астрономов имеется тесный научный контакт с его супругой Нетой Бакол (она, как и мы, исследует макроструктуру Вселенной).

#### **4. Населения Галактики**

Впервые я столкнулся с проблемой темного вещества в 1952 году, после окончания университета. Кузмин занимался расчетами по своей модели, и мы обычно помогали друг другу: он помогал «шлифовать» статьи молодым астрономам (в том числе и мне), а мы помогали ему с расчетами и подготовкой работ к печати. Нужда в том была: Кузмин быстро решал новые задачи, однако подготовка работ была для него весьма затруднительной. По этой причине его результаты порой надолго застревали в «культурных слоях» на рабочем столе в ожидании лучших времен.

Случилось так, что я занимался вычислениями для новой модели Кузмина. В роли исходных данных выступала кривая вращения Галактики. Решая интегральное уравнение, из нее нужно было найти распределение плотности как функцию расстояния от центра Галактики. Вычисления проводились вручную, в основном с помощью логарифмической линейки. Ког-

да требовалась высокая точность, использовался механический арифмометр – «Rheinmetall» или «Феликс». Для модельных расчетов почти всегда хватало логарифмической линейки. Промежуточные результаты приходилось записывать, а всю схему вычислений нужно было тщательно продумывать, чтобы не ошибиться в расчетах. Кривую вращения можно было задавать как напрямую, на основе наблюдений, так и аналитической формулой (Паренаго, кстати, пользовался в своей модели аналитическим выражением). В ходе расчетов выяснилось, что распределение плотности очень чувствительно к небольшим изменениям кривой вращения. Если, например, на краю Галактики скорость вращения падает слишком быстро, то из нее получается отрицательная плотность, – а это, конечно, невозможно. Некоторое время пришлось поломать голову, как избавиться от отрицательной плотности. Наконец я нашел, что на основе кривой вращения достаточно вычислять плотность лишь до таких расстояний от центра, где быстрое падение плотности становится очевидным. Эти расстояния соответствуют внешним областям Галактики. На больших удалениях от центра имеет смысл исходить уже не из кривой вращения (точность которой недостаточна), а из плотности. Плотность следует экстраполировать до границы Галактики, где она сходит на нет. Сначала я экстраполировал численно, позже использовал для плотности аналитические выражения. Конечно, они не были взяты «с потолка»: ход плотности можно легко проследить в других галактиках и найти подходящие аналитические формулы. Чаще всего для хода плотности используется экспоненциальная модель.

Когда мы сравнили модели Кузмина и Паренаго, оказалось, что на периферии Паренаго смело использовал аналитическую кривую вращения, для которой во внешних областях Галактики плотность получалась отрицательной. Наши расчеты показали, что если исходить из разумной экстраполяции плотности, то скорость во внешних областях вращения отличается от той, что предсказывала модель Паренаго. Однако различие не превосходило неопределенности, обусловленной погрешностью наблюдений. Из этого простого модельного приема со временем вырос новый метод моделирования, и спустя пару десятилетий он привел к открытию темной материи во внешних областях галактик. Но путь к этому предстоял еще долгий.

Тогда, в начале 1950-х годов, это было лишь простое упражнение для разминки. Основное внимание я уделял исследованию кинематики галактических популяций. Это направление продолжало традиционную для Тарту тематику: прослеживание звездной эволюции по кинематическим данным. Основные черты звездной эволюции Эрнст Эпик выяснил уже в своей фундаментальной работе, опубликованной в 1938 году. Он показал, что основной источник энергии звезд – ядерные реакции в центре звезды, где водород превращается в гелий. Этот источник долгое время питает звезду. Когда же водород заканчивается, источник энергии в центре звезды исчезает, и ее центральная часть сжимается под воздействием собственной тяжести. Внешняя оболочка при этом расширяется – так звезда-карлик становится звездой-гигантом. Гигант получает энергию при горении тонкого слоя водорода, а затем гелия. Этот источник энергии недолговечен; когда он истощается, звезда превращается в очень тусклый белый карлик.

Однако в те годы об эволюции звезд царило совершенно иное представление: считалось, что звезда начинает свое развитие как красный гигант, потом превращается в белый гигант и затем перемещается по главной последовательности вниз, становясь желтым и, наконец, красным карликом. В теорию Эпика верить не хотели – ее противниками были ведущие мировые авторитеты. По этой причине в середине 1930-х годов профессор Таавет Роотсмяэ начал исследовать кинематику звездных популяций. Его работа помогла прояснить путь развития звезды. Суть исследования состоит том, что звездная популяция очень долго сохраняет свое кинематическое состояние. Роотсмяэ предположил, что звезды зарождаются из первичного дозвездного газа. Газ, сжимаясь, постепенно превращается в звезды. Звездные популяции разного возраста сохраняют те кинематические характеристики, которыми обладал газ в момент возникновения соответствующей популяции. Роотсмяэ сравнил кинематические параметры гигантов и карликов (среднюю дисперсию скоростей, скорость обращения вокруг центра Галактики) и нашел важные свидетельства в пользу эволюционной теории Эпика.

По совету Роотсмяэ, Кузмина и Паренаго темой моей дипломной, а затем и кандидатской работы стало исследование кинематики звездных популяций на главной последовательно-



Рис. 3. Старая обсерватория в Тарту.

сти. Этой работой мне удалось показать, что в верхней части главной последовательности, в области горячих гигантов, скорости звезд можно с хорошей точностью представить одним равновесным распределением; таким образом, эту популяцию можно считать однородной. В нижней части главной последовательности скорости нельзя представить одним равновесным распределением: как показывает кинематика, эта популяция неоднородна, в ней старые звезды соседствуют с относительно молодыми. Этого и следовало ожидать: в нижней части главной последовательности развитие звезд происходит очень медленно, поэтому старые и молодые звезды в ней присутствуют вместе.

## **5. Тыравере в шестидесятих**

После защиты кандидатской работы я несколько лет преподавал в Тартуском университете и помогал создавать станцию наблюдений за искусственными спутниками. Слежение за ними давало студентам известный опыт астрономических наблюдений, а также способствовало популяризации точных наук в университете. В то время продолжалось строительство новой обсерватории, а потому университет должен был подготовить новых астрономов. Помимо лекций, я занимался также учебной



Рис. 4. Главное здание новой обсерватории в Тыравере.

литературой. Сначала вместе с парой молодых астрономов мы перевели с русского языка на эстонский учебник астрономии, а затем существенно его переработали. К сожалению, наша переработка была недостаточно основательной, так что в тексте остались отдельные детали, отражающие советский дух.

После переселения в Тыравере мы более полугода изучали литературу, продумывая темы для исследований в новой обсерватории. Проводились астрономические семинары, где мы обсуждали новые направления в астрономии. По первоначальным планам мы намеревались в качестве основного телескопа использовать камеру Шмидта, чтобы продолжить исследования в области звездной статистики. В результате обсуждений мы решили, что в наших атмосферных условиях было бы разумнее уделить больше внимания звездной физике, особенно спектральным наблюдениям звезд: в сравнительно короткие периоды ясной погоды в этой области можно получить намного больше полезной информации. Итогом наших обсуждений стала новая программа развития обсерватории. В качестве главного инструмента мы выбрали 1,5-метровый телескоп-рефлектор. План поддержало сначала руководство института, а затем Астрономический совет АН СССР. Так эта программа стала основой нашей



деятельности. В середине 1960-х годов я более пяти лет занимался проектированием телескопа и его башни. Работы продолжились под руководством Лаури Лууда, и в 1975 году телескоп был готов. Сначала мы пытались проводить на нем, в числе прочего, спектральные наблюдения галактик, однако погодные условия были очень нестабильными. Поэтому новый телескоп, как и было запланировано, стал использоваться в основном для спектральных наблюдений звезд.

1960-е были для Тыравере годами быстрого роста. На станции наблюдения искусственных спутников, действовавшей при Тартуском университете, получило начальную подготовку много талантливой молодежи. Пару лет станцией руководил я, затем ее руководителем стал недавно ушедший от нас Мярт Лийгант. Он проработал в университете преподавателем астрономии до самой смерти. Станция наблюдения за спутниками давала студентам хорошую практику, которая должна была очень пригодиться им в новой обсерватории. Следуя нашим планам развития, большинство молодежи начинало заниматься физикой звезд.

В 1960-х годах в жизни Тыравере произошли и другие интересные события. В это время на работу в обсерваторию пришел академик Густав Наан, вступивший в конфликт с властью. Не могу сказать точно, что стояло за этим конфликтом, но отчасти причиной могла стать его бывшая супруга. Настоящего ее имени большинство астрономов не знало, но прозвали ее «Стихийное бедствие». Она была несколько не в своем уме и мнила себя великим ученым. Она собирала различные документы, которые использовала для шантажа, и пыталась выклянчить у людей деньги на свою деятельность. Ее знали в Таллине и Москве и всюду сторонились. Позже астрономы Тыравере сняли и показали на новогоднем празднике шуточный фильм на эту тему. Конечно, от всего этого сильно страдал сам Густав Наан. В Тыравере он начал заниматься своей давней любимой областью – космологией, особенно ее философскими аспектами. На эту тему он писал во всесоюзной прессе. Возрождение современной космологии, отверженной в советское время, во многом обязано его выступлениям. Напомним, в то время официальная наука не верила в расширение Вселенной. Считалось, что расширение – всего лишь близорукое суждение западных ученых, возникшее

из-за необоснованного переноса локальных свойств так называемой Метагалактики на бесконечную Вселенную. Основными контрдоводами служили ссылки на Энгельса и Ленина. Широкое использование теории относительности Эйнштейна тоже не приветствовалось. Густав Наан был одним из первых, кто выступил против старых догм.

Под руководством Наана в Тыравере продолжились философские семинары. Начало им положили еще в 1950-х годах профессора Аксель Киппер и Харальд Хаберман, старые друзья со студенческих лет. В этих семинарах участвовали ученые из всех тартуских институтов, подведомственных Академии наук. Позже семинары в Тарту заглохли, но по инициативе Наана они возобновились в Тыравере. Выступать приглашали выдающихся ученых, работавших в разных областях, а также деятелей культуры и политики. На семинарах царил довольно свободная атмосфера. Например, одним из самых интересных за все время было выступление Уку Мазинга «Религия в истории человечества». В этом докладе Уку Мазинг отстаивал тезис о том, что все крупные религии принимают форму политического движения, и наоборот, все значительные политические движения приобретают признаки религии. В качестве примера Уку Мазинг привел гитлеровскую Германию. Конечно, все догадались, какое государство он на самом деле имел в виду. Согласно Мазингу, главная задача религии – создать систему обычаев и верований, а без такой системы не может существовать ни одно государство. Если разрушить эту систему обычаев и верований, то общество становится очень нестабильным. Опять-таки слушателям было ясно, о каком обществе шла речь.

Как-то я сам выступил на философском семинаре с докладом на тему «Эффективность научной работы». Исследования на эту тему уже начинались, так что я мог опереться на ряд авторитетов. Однако большую часть работы приходилось делать, не имея под рукой каких-либо примеров. Я выяснил, среди прочего, сколько публикуется в различных изданиях статей в области астрономии, и как часто на них ссылаются. Таким методом можно было определить «коэффициент эффективности» журнала или издания. Оказалось, что в то время (в 1965 году) более половины работ в области астрономии публиковалось в собственных изданиях обсерваторий, однако ссылок на эти рабо-

ты практически не было. Наивысший «коэффициент эффективности» был у журналов *Nature* и *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, за ними следовал *Astrophysical Journal*. Эффективность научной работы тоже колеблется, порой публикаций много, но их не читают. Индекс читаемости публикаций Тартуской обсерватории был очень низок, журналов на русском — тоже. Из этого я сделал свои выводы и отказался в дальнейшем от размещения своих работ в публикациях нашей обсерватории. Поместил еще пару работ в русскоязычных журналах, но в основном стал посылать работы в журналы, выходящие на английском. Одной из причин, почему я избегал русскоязычных журналов, было и то, что мое имя искажалось при переводе на английский (вместо J. Einasto писали Ya. E. Ejnasto). Некоторое время я раздумывал, как писать свой адрес, поскольку не хотел использовать слова Estonian SSR. Наконец, решил писать Tartu Observatory, Estonia, USSR. Потом, когда пришло время, USSR отпало, а в остальном адрес остался правильным.

В 1975 и 1985 годах я вновь сделал статистику публикаций и цитирования. Она показала, что бесполезность публикаций в изданиях обсерваторий поняли уже повсеместно. В результате они почти исчезли, а толщина журналов за эти годы увеличилась более чем вдесятеро. Своих учеников я также наставлял публиковаться в англоязычных журналах, и от этого совета был толк.

Помимо философских семинаров, очень плодотворными оказались исследования и конференции по астрономии древности. Их организатором был Хейно Элсалу, который испытывал к истории астрономии и к археоастрономии живой интерес. Работы в этой области публиковались, в том числе и в местных изданиях, так что Элсалу, помимо крупных языков, выучил все языки балтийского региона, начиная от языка наших южных соседей латышей и кончая скандинавскими языками. Однажды мне представилась возможность участвовать в конференции по археоастрономии, организованной им в Вильянди. Зал театра был полон народа, научные доклады чередовались с фольклорными выступлениями в форме декламации в сопровождении народной музыки. Других подобных публичных мероприятий, поддерживающих национальные чувства, в то время практически не было. На подобную деятельность наших астрономов до сих пор обращалось слишком мало внимания.

В то время в Тарту еще не были готовы новые здания для физиков в конце Рижского шоссе, и часть физиков-теоретиков работала в Тыравере. В их числе был Мадис Кыйв, который в свободное время писал «в стол» философские трактаты. Сейчас его пьесы ставятся во многих эстонских театрах, но тогда мы и представить себе не могли, что рядом с нами творит один из создателей новой эстонской драматургии. Мы готовили шуточные постановки и спектакли к новогодним праздникам, их сценарии писали Мадис Кыйв и Арвед Сапар – наши главные силы в теоретической астрофизике. Один из самых удачных шуточных спектаклей был поставлен на основе фильма «Сверхновая». Съемки этого фильма проходили в Тыравере, и около двух месяцев киногруппа жила вместе с нами. Мы обедали в одной столовой с киношниками, и при желании они могли видеть всю нашу жизнь. Более всего нас поразило полное отсутствие с их стороны интереса к нашей работе. У них были свои представления о том, как происходит научная деятельность, и они не позволяли реальной жизни вторгаться в эти представления. Когда фильм был готов, его первый показ состоялся в Тыравере. Мы смотрели и изумлялись: все было как будто на месте, но казалось при этом абсолютно фальшивым. Одним из первых выступил Мадис Кыйв. Он обратил внимание на то, что фильм выглядит очень неестественно. Так и возникла идея поставить на эту тему новогодний спектакль. Его назвали «Сверхприма» и организовать в форме пантомимы. Выступала тыраверская молодежь (а молодые были тогда мы все), действие сопровождалось популярными музыкальными мотивами. Арвед Сапар играл роль гениального молодого астронома, который открывает новую звезду – сверхприму. Айво Кивиля исполнял роль телескопа, Тынну Вийк и трое других молодых людей танцевали вальс молодых ученых в сопровождении знакомой музыки «Танца маленьких лебедей» из балета Чайковского. Это была лучшая из пародий, что мне приходилось видеть.

Позже постановочную деятельность в Тыравере продолжил климатолог Айн Каллис. В 1980-х он поставил пьесу о защите диссертации. В то время у нас был совет по защитах, перед которым свои работы могли защищать как наши астрономы, так и гости из других научных центров. Из-за недостаточного знания русского языка мы порой попадали впросак, что и нашло

отражение в пьесе. Вышло неплохо, слух о нас дошел до телевизионщиков. На эту тему сняли телепередачу и показали ее в День ученых. Юмор был очень тонкий, так что многие зрители только в конце стали догадываться, что передача шуточная. Кончилось дело тем, что Рейн Ристлаан (секретарь ЦК КП Эстонии – *прим. перев.*) рассердился и приказал уничтожить оригинал фильма. Так что от тех вечеров у нас не осталось ничего, кроме воспоминаний.

Но не всегда жизнь в Тыравере была безоблачной. Во второй половине 1960-х годов стали возникать внутренние трения. Причины не вполне ясны мне до сих пор. Как руководитель сектора астрофизики, я несколько лет занимался проектированием телескопа. Когда предусмотренный пятилетний срок подходил к концу, я решил спокойно отойти от этого дела. Однако меня, по сути, неожиданно выкинули с места. Мне даже оказалось сложно вернуться на должность старшего научного сотрудника: в первом туре никто не получил нужного числа голосов, во втором туре меня избрали «на грани» минимально необходимым числом.

Затем в опалу попал Вальдур Тийт. Он очень успешно разрабатывал приемники излучения для астрономических наблюдений с искусственных спутников, ему принадлежала одна из главных ролей в создании комплекса аппаратуры «Зяблик» для первой ультрафиолетовой космической обсерватории «Космос-215». Тийт занимался уже вторым крупным орбитальным телескопом, у него были договоренности с исследовательскими центрами на выделение ракеты-носителя (в то время это было огромным достижением). Неожиданно директор Аксель Киппер сообщил, что проект закрывается, поскольку наши астрономы не готовы к обработке наблюдений. Странное возражение: наши теоретики в этом направлении работали уже многие годы.

В начале 1980-х Арвед Сапар ходатайствовал о выделении наблюдательного времени на американском космическом телескопе, его проект одобрили, и несколько недель он провел в США, проводя спутниковые наблюдения. Впоследствии они обрабатывались годами, долгое время служа нам важным источником информации. Однако в тот раз наблюдения не состоялись, а Вальдуру Тийту с ядром его команды пришлось перейти в Институт физики.

В 1960-е годы в Тыравере на работу пришел замдиректора по науке Чарльз Вильман. Он интересовался астрономией и геофизикой, долгое время состоял на военной службе и закончил Таллинский педагогический институт (сегодня Таллинский университет – прим. перев.) по специальности «учитель физики». У нас он организовал наблюдения серебристых облаков. Поскольку серебристые облака лучше наблюдать из космоса, чем с земли, Вильман также занялся космическими исследованиями. Энергичный человек, он нашел возможность получить деньги из других источников. Аппаратуру изготовили при посредничестве Общества астрономии и геодезии (по тогдашним законам, выделять сотрудникам деньги напрямую было нельзя). Вильману космический эксперимент удался. Но трения в Тыравере были столь сильны, что директор решил сменить руководство. На место замдиректора пригласили Вяйно Унта, физик-теоретик из Тарту. После ухода на пенсию Акселя Киппера он стал директором. Унт прекрасно справился с работой, и напряжение удалось снять.

## **6. Модели Галактики**

Создание новой обсерватории оставляло мало времени для исследовательской работы. Представлялось, что прежние исследования звездной кинематики исчерпали себя, и пришлось думать, чем заниматься дальше. Мне случилось прочесть обзор галактических моделей чешского астронома Перека. Выяснилось, что Перек и другие астрономы, писавшие на английском языке, не знакомы с работами тартуской школы в области галактических моделей. Методика моделирования, освещенная в обзоре, представлялась устаревшей. Перек рассматривал моделирование спиральных и эллиптических галактик как две различных задачи. Модели спиральных галактик строились на основе кривых вращения (как у Паренаго). В случае эллиптических галактик за основу брался профиль яркости, который калибровался по динамическим данным (с помощью дисперсии скоростей) лишь в центральной части галактики. В действительности в галактиках обоих типов встречаются очень близкие по строению звездные популяции; но в галактиках разных типов они различаются как числом, так и значениями параметров. В сферических галактиках наблюдается избыток старых сферических и эллиптических

популяций, называемых «гало» и «балдж». В спиральных галактиках эти популяции тоже есть, но в избытке присутствуют также молодые популяции. Звезды промежуточных возрастов образуют дисковидную популяцию, а молодые звезды – очень тонкую популяцию, образующую спирали. В нашей Галактике строение звездных популяций хорошо видно в деталях, а их общие свойства легче определяются на примере других галактик, которые мы наблюдаем извне. Поэтому при моделировании галактик полезно объединить информацию о нашей собственной Галактике и о других галактиках, рассматривая задачу в целом.

Все 1960-е годы ушли на разработку новой методики моделирования. Одной из первых задач стало уточнение параметров, характеризующих строение нашей Галактики. Я подготовил доклад о параметрах Галактики для Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза. Съезд происходил в 1964 году в Гамбурге. Поскольку советская бюрократия не позволила мне поехать, я передал материалы своего доклада коллеге из Ленинграда Кириллу Огородникову. Паренаго тогда уже покинул этот мир: в полном расцвете сил, он скончался от рака. Место наших московских партнеров по работе и обсуждениям заняли ленинградские коллеги.

Огородников прекрасно справился со своей задачей. После съезда Москву посетил американский астроном (голландского происхождения) Барт Бок, один из ведущих исследователей Галактики. Я узнал о приезде Бока заблаговременно и поехал в Москву на встречу с ним (в Эстонию, особенно в Тарту, иностранцев в то время не пускали). В своем докладе Бок говорил о новейших результатах исследования Галактики. Наши работы он обсуждал весьма детально. Когда после доклада я представился, он, конечно, был очень рад. Завязалась оживленная беседа, которая положила начало долгой дружбе. В дальнейшем Бок внимательно следил за нашей работой и активно ее продвигал, в том числе и в ведущих американских научно-популярных журналах, таких, как *Scientific American*. Зимой 1982 года мне посчастливилось гостить в доме Бока в Аризоне. Он как раз готовил выступление для годового собрания Американского астрономического общества, где ему предстояло получить медаль: на церемонии полагалось сделать торжественный доклад. Темой доклада было строение Галактики и роль темной материи. Мы с

Боком основательно обсудили эту тему. Доклад стал «лебединой песней» Бока: вскоре пришло печальное известие о его кончине.

Отыскание системы параметров стало лишь первым шагом при построении модели Галактики. Была построена сама модель – первая модель, где учитывались разные звездные популяции, представленные с помощью компонент с плавно изменяющейся плотностью. На конференции в Алма-Ате я сделал доклад о своей модели. Но остановиться на этом я не мог, так как использовал слишком мало данных о других галактиках; поэтому следующим этапом стала давняя любовь тартусцев – Туманность Андромеды. В свое время ее исследовал Эпик, а позже – Кузмин. При моделировании Туманности Андромеды я использовал все доступные данные о нашей Галактике. В модели были представлены все хорошо известные нам звездные популяции. В их числе – гало, состоящее из старых бедных металлами звезд; балдж в центре галактики; и, наконец, слегка сплюснутый диск. В модели также была представлена очень сплюснутая популяция молодых звезд.

В ходе работы мы столкнулись с двумя неожиданными противоречиями: выяснилось, что модель, найденная по данным о вращении, не совпадает с распределением плотности как вблизи ядра галактики, так и на ее периферии.

И в нашей Галактике, и в Туманности Андромеды самые массивные популяции – это балдж и диск. Балдж представляет собой слегка сплюснутую эллипсоидную популяцию, состоящую из очень старых звезд. В эллиптических галактиках оно доминирует, однако и в спиральных галактиках, сходных с нашей, оно весьма заметно. Диск имеет форму очень сплюснутого эллипсоида, он состоит из звезд очень разного возраста. Возраст самых старых – примерно такой же, как у звезд балджа, а самые молодые звезды примерно вдесятеро моложе самой галактики. Распределение яркости в обеих популяциях достаточно хорошо известно по данным о других галактиках. В пределах одной популяции звезды не слишком различаются физическими свойствами, поэтому можно предположить, что обе популяции однородны. С точки зрения моделирования, одним из важнейших параметров является среднее отношение массы популяции к ее светимости. Это отношение зависит от среднего возраста звезд и от их химического состава. Очень старые зве-



зды возникли из первичного, очень древнего газа, который состоял в основном из водорода и гелия. Среднее отношение массы к светимости у этих звезд примерно такое же, как у Солнца. Они также в среднем несколько голубее, поскольку бедные металлами гиганты, которые определяют яркость популяции, не так красны, как обычные гиганты, содержащие большое количество тяжелых химических элементов. На последней стадии жизни звезды часть ее вещества выбрасывается обратно в космическое пространство, смешивается с первичным газом и обогащает его тяжелыми элементами. В зарождении следующего поколения звезд участвует уже обогащенный газ; эти звезды, в свою очередь, выбрасывают обратно еще более обогащенный газ, и так далее. В результате звезды, которые родились позже, содержат больше тяжелых элементов, и на стадии гиганта они краснее. Следовательно, цвет звездных популяций и отношение их массы к светимости зависит от химического состава. Популяция диска Галактики по составу более-менее близка к солнечному, среднее отношение массы к светимости у нее составляет 3–5 (в солнечных единицах). Отношение массы к светимости у популяций, очень богатых металлами, близко к 10.

Таким образом, из наблюдений можно найти все важные параметры популяций. Для моделирования наиболее важны фотометрические данные, а именно распределение светимости и показателей цвета по популяции. Эти данные позволяют определить размер популяции и оценить ее массу. Несложно также вычислить, какой должна быть кривая вращения галактики. Раньше таких вычислений не делали, поскольку при моделировании спиральных галактик фотометрические данные попросту не использовались. Эти данные показывают, что в центральных областях спиральных галактик доминирует балдж, у которого отношение массы к светимости близко к 10. На окраинах плотность звездных популяций столь низка, что их периферийные части не играют существенной роли в общем гравитационном поле галактики: доминируют звезды, расположенные ближе к центру. В этом смысле распределение плотности во внешних частях галактики подобно ее распределению в Солнечной системе, где планеты особой роли не играют: их массы слишком малы по сравнению с солнечной. Поэтому можно ожидать, что скорость вращения галактик уменьшается от центра к краю. То же

самое мы видим в Солнечной системе – чем дальше планета от Солнца, тем медленнее она обращается вокруг него.

В результате долгих вычислений мы, наконец, получили модель Туманности Андромеды. Из нашей модели следовало, что скорость вращения должна быстро расти вблизи центра галактики и достигать максимума примерно на полпути к окраине. В периферийных областях скорость должна падать примерно так же, как в Солнечной системе. Велико же было наше удивление, когда мы сравнили модель с наблюдениями! Оказалось, что вблизи центра скорость растет медленно, а на больших расстояниях от центра она остается более-менее постоянной.

Как же объяснить эти противоречия?

## 7. Парадокс массы в галактиках

Первым шагом стало сравнение новой модели с более ранними, которые все были основаны на скоростях вращения. Сравнивая модели, мы вычислили среднее отношение массы к светимости как функцию расстояния от центра галактики Андромеды. Результаты оказались довольно странными. В прежних моделях это отношение в центральной области Галактики Андромеды получалось очень маленьким – примерно 1/100 (в солнечных единицах). Такое низкое значение объяснить трудно: ведь вблизи центра преобладают старые богатые металлами звезды, у которых отношение массы к светимости заметно выше, чем во внешних областях. Второе отличие новой модели от прежних проявлялось на периферии: здесь отношение массы к светимости, найденное на основе скоростей вращения, росло очень быстро, достигая 1000 во внешних частях галактики.

Противоречия между нашей моделью и наблюдаемой кривой скоростей в центральных областях Галактики Андромеды объяснялось легко. Скорости вращения мы определяли из радионаблюдений, точность которых в то время была довольно низкой. Медленный рост скорости, который следовал из наблюдений, был связан с их недостаточным разрешением. Согласно новым оптическим данным, скорость вращения растет заметно быстрее – именно так, как и следовало из нашей модели.

Противоречия между нашей моделью и наблюдениями на периферии галактики Андромеды можно было объяснить двояко. Предположив, что динамические данные верны, мы при-

ходим к выводу о преобладании во внешних областях галактик какой-то крупной темной популяции. Своим притяжением эта популяция заставляет галактику вращаться быстрее. Вторая возможность – на периферии галактик могут быть движения, которые влияют на вращение. Тому имеются косвенные подтверждения. Оказалось, что кривые вращения на разных сторонах галактик не всегда похожи: скорость вращения той части галактики, что движется к нам, не совпадает со скоростью той части, что движется от нас.

Какое из этих двух взаимоисключающих предположений выбрать?

В первую очередь мы рассчитали размер предполагаемой темной популяции. Для этого мы использовали ранние модели, построенные на основе кривой вращения, и сравнили их с нашей новой моделью, учтя также фотометрические данные. Сравнение показало, что примерно половину полной массы галактики следует отнести на счет темной популяции, однако при этом ее радиус превысил бы в несколько раз радиус известных звездных популяций. В то время мы полагали, что скорость звездообразования в межзвездном газе пропорциональна квадрату его плотности. Это подтверждалось как нашими собственными исследованиями, так и результатами других ученых. Таким образом, звезды гипотетической популяции должны были возникнуть в те времена, когда газ был сильнее сжат и располагался вблизи центра галактики. Затем эти звезды должны были уйти во внешние области галактики, образовав нынешнее распределение темной материи. Перед нами стоял вопрос: что вынудило темную популяцию «раздуться» до тех размеров, на которые указывают динамические данные? Из закона сохранения энергии следует, что расширение одной популяции возможно лишь за счет сжатия другой. Простые вычисления показывают, что для расширения темной популяции до нынешних размеров недостаточно сжатия всех остальных популяций: темная популяция слишком велика и массивна для этого. Она должна была возникнуть именно там, где она находится поныне. Однако в столь разреженной среде звездообразование весьма неэффективно. Таким образом, наш анализ показал, что с помощью гипотетической популяции объяснить динамическую структуру галактики будет сложно.