НАЗЕМНАЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ АСТРОНОМИЯ: НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

И. И. Зинченко

Институт прикладной физики РАН
Ульянова, 46, 603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: zin@appl.sci-nnov.ru

Обсуждается научная значимость миллиметровой и субмиллиметровой астрономии, в частности для космологии и исследований звездообразования. Описываются атмосферные ограничения и недавние достижения в приемной технике. Дается краткий обзор наземных субмиллиметровых обсерваторий и их сравнение с космическими проектами.

GROUND–BASED SUBMILLIMETER ASTRONOMY: SCIENTIFIC GOALS AND PROSPECTS, by Zinchenko I. I. – The scientific importance of millimeter and submillimeter astronomy is discussed, in particular for cosmology and star formation studies. The atmospheric limitations and the recent achievements in the receiver technology are described. The ground-based submillimeter facilities are briefly reviewed and compared with space projects.

ВВЕДЕНИЕ

Диапазон миллиметровых и субмиллиметровых волн остается последним относительно неизученным участком электромагнитного спектра в астрономии, что создает потенциал для новых открытий. Бо́льшая часть миллиметровых и субмиллиметровых фотонов рождается в “холодной” Вселенной: плотных межзвездных газопылевых облаках, околозвездных оболочках и т. п. Это следует из закона Планка. Действительно, пик излучения межзвездной пыли с характерной температурой 20–30 К лежит в субмиллиметровом диапазоне. Этот диапазон также чрезвычайно насыщен спектральными линиями, отвечающими в основном переходам между вращательными уровнями молекул с относительно низкой энергией возбуждения. Важно то, что межзвездные облака практически прозрачны на миллиметровых и субмиллиметровых волнах, в отличие от оптического диапазона, где поглощение может достигать 100^m и более. Таким образом, они представляют собой уникальный инструмент исследования внутренних областей плотных межзвездных облаков, которые являются “колыбелями” новых звезд и недоступны для других методов астрономических исследований. Это и есть основной движущий фактор для миллиметровой и субмиллиметровой астрономии: исследования образования звезд и галактик. В то же время наблюдения в этом диапазоне дают бесценную информацию и для многих других областей астрофизики. Достаточно упомянуть исследования микроволнового фона в космологии.

НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ

Космология. Пик 2.7 К микроволнового фона лежит на волнах $\lambda \approx 2$ мм. В последние годы достигнут огромный прогресс в исследованиях этого излучения, которое представляет собой остаток Большого Взрыва. В частности, надежно установлен чернотельный характер спектра фона, обнаружена мелкомасштабная анизотропия и, более того, изучается пространственный спектр этой анизотропии.

Интересной и важной областью использования субмиллиметровых волн в космологии является эффект Сюняева–Зельдовича (ЭСЗ). Это слабое искажение спектра фона за счет рассеяния фоновых фотонов на высокоэнергетичных электронах в скоплениях галактик. ЭСЗ проявляется как уменьшение интенсивности фона на частотах ниже 218 ГГц и возрастание на более высоких частотах [1]. Если температура электронов определяется независимо, например из рентгеновских измерений, то знание всего спектра ЭСЗ позволяет оценить массу газа в скоплении (тепловой эффект) и пекулярную скорость скопления (кинетический эффект). Недавний анализ с полным учетом релятивистских эффектов показал, что для наиболее горячих скоплений

($T_e > 8$ кэВ) спектр ЭСЗ существенно отклоняется от предсказанного Сюняевым и Зельдовичем (например [2]). Это особенно существенно в субмиллиметровой области. Было показано, что отсюда можно определить электронную температуру по миллиметровым и субмиллиметровым измерениям без привлечения рентгеновских данных [3].

К настоящему времени предсказанный декремент микроволнового фона был зарегистрирован в направлении примерно 50 скоплений галактик на сантиметровых и миллиметровых волнах [1]. Начаты также поиски субмиллиметрового избытка [4]. Но пока они не захватывают частоты ожидаемого пика. Другие важные приложения субмиллиметровых волн в космологии включают в себя глубокие обзоры неба, поиск поляризации фона и пр.

Межзвездная среда и звездообразование. Как указано выше, основной движущий фактор для субмиллиметровой астрономии – это исследования звездообразования. В коротком обзоре невозможно затронуть все аспекты этих исследований. Мы сосредоточимся в основном на наших собственных результатах.

Миллиметровые и субмиллиметровые наблюдения дают возможность детально исследовать структуру и кинематику звездообразующих сгустков. В качестве примера можно упомянуть наши обзоры плотных массивных ядер в различных молекулярных линиях: HCN, CS, NH_3, HNCO, $C^{18}O$, SO, N_2H^+ [5–12]. Эти наблюдения покрывают диапазон частот от 22 ГГц до 460 ГГц с помощью ряда инструментов (РТ-22 КрАО, SEST-15m, OSO-20m, Effelsberg-100m, HHT-10m). Во-первых, они дали статистические результаты об основных параметрах ядер: массе, размере, плотности, температуре, дисперсии скоростей и пр. (рис. 1).

Кроме того, получена информация о профилях плотности в ядрах, их вращении и др. Особый интерес представляет обнаружение большого числа предположительно сжимающихся ядер, как следует из особенностей формы линий. Для дальнейших исследований таких объектов весьма важны субмиллиметровые наблюдения, которые позволяют изучать более плотные и горячие области.

Важно, что в субмиллиметровый диапазон попадает пик излучения пыли в областях звездообразования. Наиболее плотные и холодные сгустки можно изучать только по их пылевому излучению, поскольку молекулы вымерзают на пылинках. Измерения поляризации этого излучения дают информацию о магнитных полях в этих сгустках.

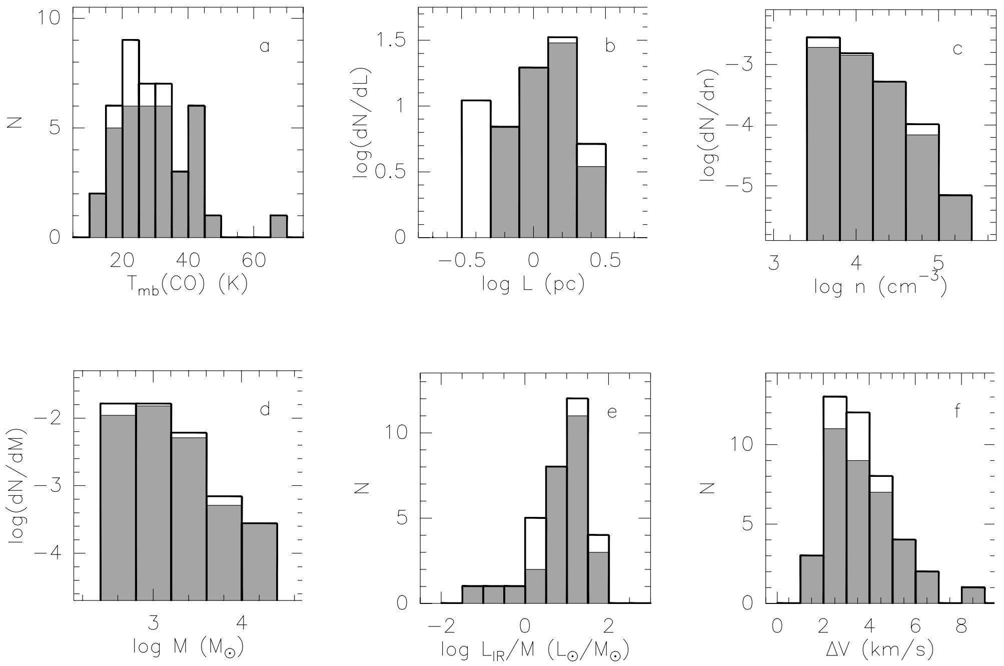

Рис. 1. Гистограммы яркостной температуры CO (a), размера (b), средней плотности (c), массы (d), отношения ИК светимости к массе (e) и ширины линий CS (f) для массивных ядер в направлении мазеров H_2O [8]

Субмиллиметровый диапазон очень важен для астрохимии. Он чрезвычайно богат спектральными деталями, как можно видеть, например, на рис. 2, где показан спектр Ориона KL вблизи 215 ГГц, измеренный при помощи радиотелескопа SEST. Даже довольно слабые детали в этом спектре представляют собой реальные линии. Многие из них пока не отождествлены.

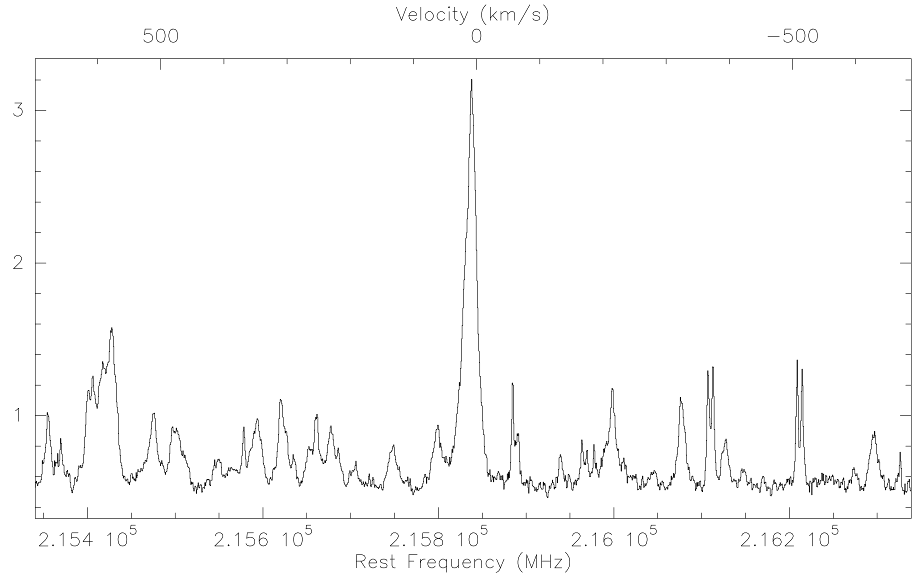

Рис. 2. Спектр Ориона KL в окрестностях линии ^{34}SO вблизи 215 ГГц, измеренный при помощи радиотелескопа SEST в Чили

Различия химического состава сгустков могут быть связаны, в частности, с их эволюцией, так как содержание различных молекул по разному изменяется со временем. Некоторые молекулы (SiO, SO и др.) являются эффективными индикаторами ударных волн.

В субмиллиметровом диапазоне можно наблюдать атомы и молекулы, трудно доступные на других частотах. Важными примерами являются нейтральный углерод с переходами между уровнями тонкой структуры на частотах 492 и 810 ГГц, HDO (465 и 894 ГГц) и др. Здесь перечислены только переходы, наблюдаемые с поверхности Земли.

АТМОСФЕРНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Вследствие сильного поглощения в атмосферных газах (в основном в кислороде и парах воды) миллиметровые и субмиллиметровые наблюдения с поверхности Земли возможны только в ограниченных частотных интервалах, так называемых окнах прозрачности атмосферы. Зависимость прозрачности от частоты для очень низкого содержания водяного пара представлена на рис. 3. Все показанные окна прозрачности уже используются для наземных наблюдений (например [13]). Имеются дополнительные “окна” на частотах до 1500 ГГц, но там поглощение гораздо выше, так что наблюдения возможны только с Южного полюса и некоторых других очень сухих и высоких мест.

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ПРИЕМНИКИ И ОБСЕРВАТОРИИ

В последние годы достигнут огромный прогресс в развитии приемной техники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. На частотах до 700 ГГц шумовая температура приемников вплотную приблизилась к фундаментальному квантовому пределу $h\nu/k$ (рис. 4). Это достигнуто при помощи супергетеродинных приемников со смесителями на переходах сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) на основе ниобия (Nb), работающих при температуре 4.5 K. На более высоких частотах энергия фотонов превышает ширину энергетической щели в Nb и характеристики смесителей быстро ухудшаются.

На этих более высоких частотах лучшие параметры достигнуты со смесителями, представляющими собой болометры на горячих электронах. Принцип их действия основан на разогреве электронов излучением в тонких пленках сверхпроводника и быстрой их релаксации за счет либо

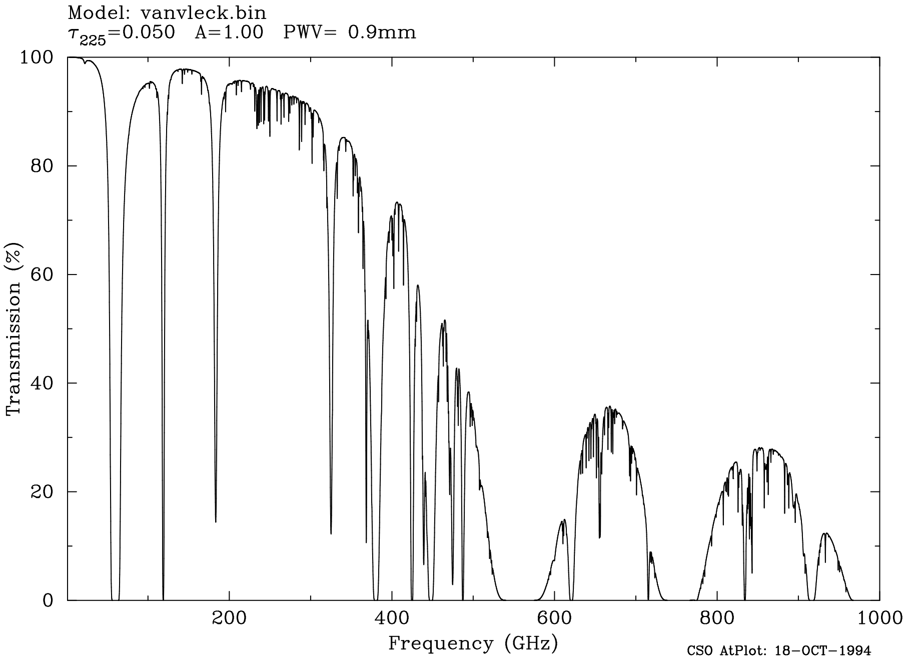

Рис. 3. Прозрачность атмосферы над Мауна Кеа при 0.9 мм осажденной воды в атмосфере

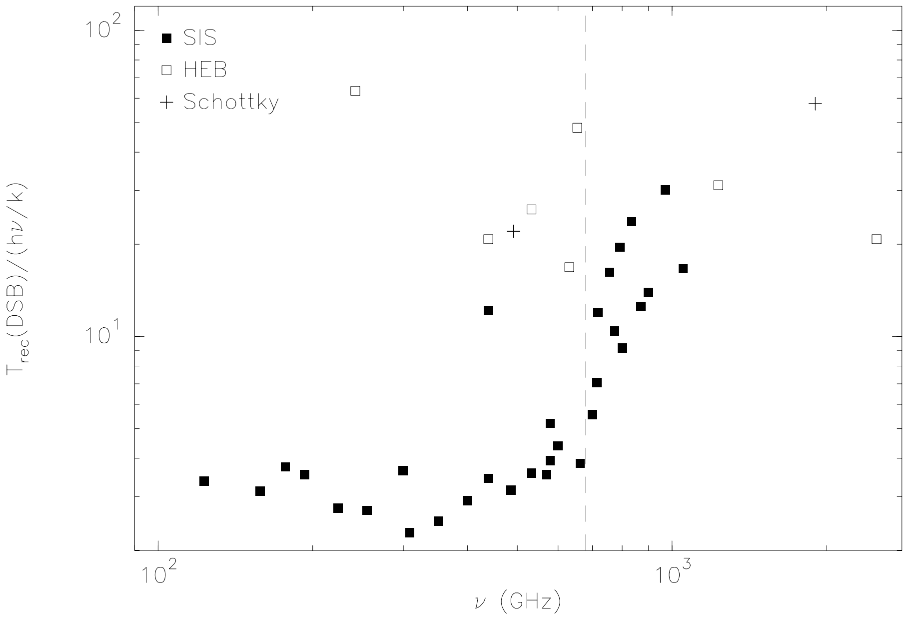

Рис. 4. Шумовая температура миллиметровых и субмиллиметровых приемников разного типа в зависимости от частоты в единицах "квантового предела", $h\nu/k$

фононного, либо диффузионного охлаждения. Изменения электронной температуры ведут к изменению сопротивления. Короткое время релаксации позволяет использовать их как смесители. Такие приемники уже успешно использовались на частотах порядка 1 ТГц [14].

В настоящее время в мире успешно функционируют несколько субмиллиметровых обсерваторий (KOSMA, CSO, JCMT, HHT, SEST). Они расположены на высотах от 2300 м до 4100 м над уровнем моря. Диаметр зеркал от 3 до 15 м. Точность поверхности от 15 до 70 мкм, что обеспечивает рабочий диапазон до 1 ТГц. Почти закончена субмиллиметровая решетка (SMA). Она расположена на Мауна Кеа на высоте 4080 м и состоит из восьми 6-м антенн с точностью поверхности 12 мкм. Длина базы изменяется от 8 до 508 м, что дает угловое разрешение 0.1″.

ПРОЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Наиболее амбициозный проект в данной области – это Большая антенная решетка в Атакаме. Она строится на высокогорном плато (высота 5000 м) в пустыне Атакама (Чили). Решетка состоит из 64 12-м антенн с точностью поверхности 20 мкм. Наибольшая база 12 км и разрешение около 6 миллисекунд дуги. Полная площадь 7238 м^2. Чувствительность и угловое разрешение будут равняться или превосходить достигнутые в оптике и ИК-диапазонах. Научные цели включают в себя исследования мельчайших структур и наиболее далеких объектов.

В то же время имеется несколько космических проектов на разных стадиях реализации (ODIN, "Hershel", SOFIA, "Субмиллиметрон" и др.). Их большим преимуществом является отсутствие атмосферных ограничений, что обеспечивает непрерывное покрытие всего диапазона частот. Однако размеры этих инструментов значительно скромнее, чем у наземных телескопов, так что они не могут достичь такой же чувствительности (по точечным источникам) и углового разрешения. Таким образом, космические и наземные инструменты дополняют друг друга. Первые больше подходят для обзоров (как по пространству, так и по частоте) и исследований протяженного излучения, а вторые – для детального исследования компактных объектов. А наилучшее угловое разрешение может быть достигнуто объединением тех и других в наземно-космический интерферометр.

[1] *Carlstrom J. E., Holder G. P., Reese E. D.* Cosmology with the Sunyaev–Zel'dovich effect // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.–2002.–**40**.–P. 643–680.

[2] *Rephaeli Y.* Cosmic microwave background comptonization by hot intracluster gas // Astrophys. J.–1995.–**445**.–P. 33–36.

[3] *Pointecouteau E., Giard M., Barret D.* Determination of the hot intracluster gas temperature from submillimeter measurements // Astron. and Astrophys.–1998.–**336**.– P. 44–48.

[4] *Lamarre J.M. et al.* First Measurement of the Submillimeter Sunyaev-Zeldovich Effect // Astrophys. J.–1998.–**507**.–P. L5–L8.

[5] *Зинченко И. И., Лапинов А. В., Пирогов Л. Е.* Обзор молекулярных облаков, связанных с областями H II из каталога Шарплеса, в линии J=1–0 HCN. Анализ спектральных данных // Астрон. журн.–1989.–**66**.–P. 1142–1153.

[6] *Pirogov L.* J=1–0 HCN toward bright far-infrared sources in the outer Galaxy // Astron. and Astrophys.–1999.–**348**.–P. 600–613.

[7] *Zinchenko I., Mattila K., Toriseva M.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. II. CS $J=2$–1 survey of southern H_2O masers in the longitude range $l = 260° - 310°$ // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–1995.–**111**.–P. 95.

[8] *Zinchenko I., Pirogov L., Toriseva M.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. VII. Core properties on the galactic scale // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–1998.–**133**.–P. 337.

[9] *Zinchenko I., Henning Th., Schreyer K.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. V. Structure and kinematics of dense cores from ammonia observations // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–1997.–**124**.–P. 385.

[10] *Zinchenko I., Henkel C., Mao R.Q.* HNCO in massive galactic dense cores // Astron. and Astrophys.–2000.–**361**.–P. 1079.

[11] *Pirogov L., Zinchenko I., Caselli P., et al.* N_2H^+(1–0) survey of massive molecular cloud cores // Astron. and Astrophys.–submitted.

[12] *Зинченко И. И.* Статистика высокоскоростных потоков в областях образования массивных звезд // Письма в Астрон. журн.–2002.–**28**.–P. 362–369.

[13] *Schilke P., Benford D. J., Hunter T. R., et al.* A Line Survey of Orion-KL from 607 to 725 GHZ // Astrophys. J. Suppl. Ser.–2001.–**132**.–P. 281–364.

[14] *Kawamura J., et al.* Ground-based Terahertz CO Spectroscopy Towards Orion // Amer. Astron. Soc. Meeting.–2001.–**198**, N 59.–P. 18.