

УДК 523.6

Оптичні спектри комет

К.І. Чурюмов¹, Л.С. Чубко², В.О. Пономаренко¹

¹Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

²Національний авіаційний університет

Ми представляємо аналітичний огляд спектрального дослідження комет з середньою та високою роздільною здатністю. В статті коротко викладено етапи формування сучасних уявлень про фізику комет та вплив на цей процес спектральних досліджень. Детально розглянуто основні типи кометних емісій, а саме: C₂, C₃, CN, NH, NH₂, OH, H, O, Na та емісії молекулярних іонів. Висвітлено найбільш аргументовані погляди на «дідовські», «батьківські» і «дочірні» молекули кометних атмосфер. Акцентовано увагу на проблемних місцях і спірних питаннях.

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ КОМЕТ, Чурюмов К.И., Чубко Л.С., Пономаренко В.О. — Мы представляем аналитический обзор спектральных изучений комет со средней и высокой разрешающей способностью. В статье кратко изложены этапы формирования современных представлений про физику комет и влияние на этот процесс спектральных данных. Детально рассмотрены основные типы кометных эмиссий, а именно: C₂, C₃, CN, NH, NH₂, OH, H, O, Na и эмиссии молекулярных ионов. Освещены наиболее аргументированные взгляды на «дедовские», «родительские» и «дочерние» молекулы кометных атмосфер. Акцентировано внимание на проблемных местах и спорных вопросах.

THE OPTICAL SPECTRA OF COMETS, by Churyumov K.I., Chubko L.S., Ponomarenko V.O. — We present an analytical overview of the spectral studies of comets with medium and high resolution. The article briefly laid out the stages of formation of modern ideas about the physics of comets and the influence on the process of spectral data. Examined in detail the main types of cometary emissions, namely: C₂, C₃, CN, NH, NH₂, OH, H, O, Na and the emission of molecular ions. Revealed the most reasoned opinions on the “grandfather”, “parent” and “daughter” molecules of cometary atmospheres. Accentuated the problem areas and discussion issues.

Ключевые слова: спектроскопия комет; физические свойства комет.

Key words: spectroscopy of comets; physical properties of comets.

1. ВСТУП

Вперше кометний спектр спостерігався 5 серпня 1864 року Ж.Б.Донаті у комети С/1864 N1 (Tempel) [1]. Але Донаті помилково вважав, що три яскравих смуги в спектрі цієї комети є лініями металів (рис. 1). Цю помилку виправив В. Хаггінс, який спостерігав 23 липня 1868 р. аналогічні смуги в спектрі комети С/1868 L1 (Winnepeske) і правильно їх ототожнив із смугами молекули C₂, порівнюючи їх зі спектром полум'я вуглецю.

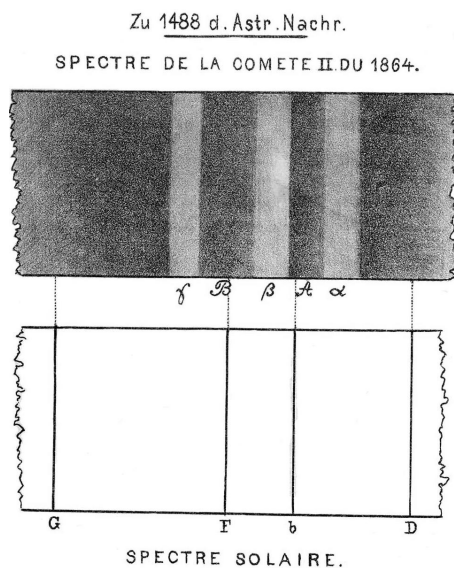


Рис. 1. Перший спектр комети С/1864 N1 (Tempel), зроблений Донаті 5 серпня 1864 р.

До 1970-х років оптичні кометні спектри головним чином отримували, використовуючи фотографічні плівки. Далі спостереження почали переключатись на фотоелектричні детектори різних типів; на даний час оптичні кометні спектри отримують, головним чином, з допомогою ПЗЗ-детекторів.

Оптичний спектр комет складається з емісійних молекулярних смуг, ліній металів, іонів та неперервного спектру.

Як показали дослідження [2], неперервний спектр комети має максимум поблизу 4700 \AA і схожий на сонячний. Його причиною є розсіювання сонячного світла: а) твердим ядром; б) вільними електронами в голові комети за рахунок механізму Томсона; в) молекулами кометної атмосфери під впливом механізму Релея; г) пиловими частинками за рахунок механізму Мі. Відносний вклад кожного з механізмів детально вивчався С.М.Полосковим [3]. В роботі Узьо [4] було показано, що найбільш ймовірним є розсіювання сонячного світла на невеликих частинках.

В 1987 р. Г.К. Назарчук показала, що неперервний спектр комети Галлея складається із сонячного континууму і люмінесцентного кометного континууму.

Три складові кометних атмосфер, а саме: тугоплавка компонента (мінеральний пил), летка компонента (газ) та іонізована компонента (плазма) мають своє характерне випромінювання, яке виникає під дією сонячного світла. Це випромінювання є основним джерелом інформації про можливі фізичні процеси, що проходять в атмосферах комет. Частина уламків різних типів речовини, з якої складається газова кома комет, утворилась в результаті фотолізу батьківських молекул, які випарувались безпосередньо із крижаного ядра комети. Спектроскопія цих вторинних молекул надає цінну інформацію про фізичні умови в комі, додатково до отриманої із спостереження батьківських молекул.

Найбільшу інформацію про газову складову дає фотометрія комет в окремих емісійних лініях молекул, що світяться, наприклад, в смугах молекул радикалів CN, C₂, C₃, які найчастіше спостерігаються в кометах. Аналіз монохроматичного випромінювання комет дозволяє отримати ряд фізичних параметрів, що характеризують газову та пилову компоненти кометної атмосфери.

Оптичні спектри в основному отримуються в одному з двох спектральних режимів: середньої роздільної здатності з $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 600$, що дозволяє детектувати смуги повністю та високої роздільної здатності з $R > 10\,000$, що дозволяє детектування окремих ліній.

Оскільки комети простороно великі, бажано отримати спектри в різних їх ділянках. В основному, цього досягають використанням довгої щілини (30–150 арксек) або перенаведенням телескопа на різні області коми, або обома методами. Для того щоб вибрати всі напрями в комі з довгощілинним інструментом, щілина повинна повертатись у різні позиційні кути на небі й отримувати додаткові спостереження.

Протягом другої половини XIX і всього XX століття в спектрах комет було ототожнено смуги радикалів OH, NH, CN, CH, C₃, C₂, NH₂ та CO; іонів OH⁺, CH⁺, CO₂⁺, CO⁺, N₂⁺, C₂⁻, NaI та забороненого червоного дублету OI [5]. Потім у видимій області спектра комети-сангрейзера Ікейя–Секі (C/1965 S1) були виявлені лінії металів K, Ca⁺, Ca, Fe, V, Cr, Mn, Ni та Cu [6], які з'явилися в результаті випарування тугоплавких гранул. Смуги H₂O⁺ було ототожнено в кометі Когоутека (C/1973 E1) в 1973 р. Основні оптичні спектроскопічні піки фрагментів кометних молекул наведено в табл. 1.

Спектри спостережуваних радикалів складні і детальний їх аналіз з високим розділенням показує, що спостережувана емісія тієї чи іншої молекули утворилася (для більшості) в результаті флуоресценції сонячного випромінювання. Одержані спектрофотометричні дані можуть використовуватись для кількісного отримання променевої концентрації речовини спостережуваних молекул, з якої, шляхом моделювання [7], можна визначити відносний вміст батьківських молекул в кометній кризі.

2. ОСНОВНІ МОЛЕКУЛЯРНІ СМУГИ В СПЕКТРАХ КОМЕТ

Смуги молекули C₂. Основна частина видимого випромінювання комет викликається системою смуг Свана C₂ ($d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$) і континуумом, що виникає при розсіянні сонячного випромінювання на кометних пилинках. В оптичних спектрах комет спостерігаються дві головні системи смуг молекули C₂ — це смуги Свана, або система $d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$ та смуги Філіпса, або система $A^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$, яка представлена смугами (3,0) і (2,0). В ультрафіолетовій області спектру видима послідовність $\Delta\nu = 0$ 2321 Å системи смуг Малікена ($d^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$). Система Свана домінує в зеленій, оранжевій і червоній областях спектра й визначає, в основному, яскравість комети; смуги Філіпса важливі в ближній-ІЧ та ІЧ областях.

У порівнянні із CN та іншими кометними молекулами у випадку C₂ збуджуються значно вищі коливально-обертальні рівні. Були виявлені такі високі коливально-обертальні рівні як $J = 109$ [8].

Джексон [9] був першим, хто запропонував, молекулу C₂H₂, як “дідівську” молекулу для C₂, із проміжним розпадом C₂H₂ на C₂H⁺N. Використовуючи ПЗЗ-спостереження комети Галлея з довгою щілиною О’Делл та ін. [10] також зробили висновки, що молекула C₂ повинна бути продуктом розпаду цих двох “попередників”.

Комбі та ін. [11] використали модель з трьома поколіннями дисоціації, але їх дослідження відрізнялись від проведених [10] включенням швидкостей викидання, що є результатом переважання енергії

Таблиця 1. Основні оптичні спектроскопічні піки фрагментів кометних молекул

Молекула	Електронний перехід (система)	Довжина хвилі (Å)
OH	$A^2\Sigma^+ - X^2\Pi_i(0,0)$	3085
CN	$B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+(0,0)$ (фіолетова система)	3883
	$A^2\Pi - X^2\Sigma^+(2,0)$ (червона система)	7873
C ₂	$d^3\Pi_g - a^3\Pi_u(0,0)$ (система Свана)	5165
	$A^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+(3,0)$ (система Філіпса)	7715
	$D^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+(0,0)$ (система Малікена)	2313
C ₃	$\tilde{A}^1\Pi_u - \tilde{X}^1\Pi(0,0)$ (група голови комети)	3440–4100
CH	$A^2\Delta - X^2\Pi(0,0)$	4314
	$B^2\Sigma^- - X^2\Pi(0,0)$	3871, 3889
NH	$A^3\Pi_i - X^3\Sigma^-(0,0)$	3360
NH ₂	$\tilde{A}^2A_1 - \tilde{X}^2B_1(0,0)$	4500–7350
OI ^{1D}	$^1D - ^3P$	6300, 6364
OI ^{1S}	$^1S - ^1D$	5577
CI ^{1D}	$^1D - ^3P$	9823, 9849
CO ⁺	$B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+(0,0)$ (перша негативна система)	2190
	$A^2\Pi - X^2\Sigma^+(2,0)$ (система кометних хвостів)	4273
CO ₂ ⁺	$\tilde{B}^2\Sigma_u - \tilde{X}^2\Pi_g$	2883, 2896
	$\tilde{A}^2\Pi_u - \tilde{X}^2\Pi_g$ (Фокса–Даффендака–Баркера)	2800–5000
CH ⁺	$A^1\Pi - X^1\Sigma^+(0,0)$ (система Дугласа–Герцберга)	4225, 4237
OH ⁺	$A^3\Pi - X^3\Sigma^-(0,0)$	3565
H ₂ O ⁺	$\tilde{A}^2A_1 - \tilde{X}^2B_1$	4270–7540
CO	$d^3\Delta_i - a^3\Pi_r$ (триплетні смуги)	4437–6037
CO	$a^3\Sigma^+ - a^3\Pi_r$ (смуги Асунді)	5746–5889
CO	$e^3\Sigma^+ - a^3\Pi_r$ (смуги Германа)	5771–6268
C ₂ ⁻	$B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$	4902–5985

фотодисоціації. Вони аргументують, що типові важкі молекули продукують швидкості викидання понад 1 км/с, тому фотодисоціація з трьома поколіннями є малоймовірним батьківським процесом для виділення C₂. Замість цього вони пропонують гало CHON-частинок, розміром 104 км, відповідальним за виділення X–C₂ (X — якийсь невідомий тип речовини), які по черзі фотодисоціюють на шкалі кількох 10⁴ км, щоб виділити C₂.

Нові лабораторні дані та розрахунки [12], здається, роблять можливим висновок [9], що “дідівською” молекулою для C₂ є C₂H₂, а прямою батьківською молекулою є C₂H. В роботі [13] отримали індуковані лазером флуоресцентні спектри радикалів C₂ ($X^1\Sigma_g^+$), що виділились при лазерному фотолізі молекули C₂H₂ на довжині хвилі 1930 Å. Ці спостереження було використано для розрахунку системи Міллікена C₂ в спектрі комети C/1996 B2 (Hyakutake), отриманого за допомогою телескопа Хаббла.

Смуги радикала CN. В кометних оптичних спектрах можуть спостерігатись дві системи електронних переходів смуг CN. Це “фіолетова” система ($B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$; $\lambda_{1\max} = 358.4$ нм, $\lambda_{2\max} = 388.2$ нм, $\lambda_{3\max} = 4214$ нм) і “червона” система ($A^2\Pi - X^2\Sigma^+$; $\lambda_{1\max} = 7906$ нм, $\lambda_{2\max} = 8106$ нм). Фіолетова система є однією із найпомітніших деталей в кометних спектрах і видима у більшості комет на геліоцентричних відстанях, менших за 3 а.о. CN було виявлено в кометах 1P/Галлея і C/1995 O1 (Гейла–Боппа) на відстанях, більших за 4 а.о. і в кентаврї (2060) Хірон на 11.26 а.о. [14].

Високе спектральне розділення дає можливість розрізнити лінії ізотопів CN від слабких неізотопічних ліній високих порядків. Так, вивчення CN з високим розділенням було використане для визначення відношення ¹³C/¹²C, що виявилось суттєво сонячним значенням для кількох комет [15–18]. Високе спектральне розділення разом з високим відношенням сигнал-шум дозволило [19] визначити ізотопне відношення ¹⁵N/¹⁴N для великої кількості комет.

Хоча ототожнення фіолетової системи у молекули CN було відоме із початку кометної спектроскопії, але ототожнення батьківської молекули все ще сумнівне. Шкала довжин Хазера (або радіальна) батьківської молекули CN близько 2·10⁴ км на 1 а.о. Потенціальна батьківська молекула HCN спостерігалась у міліметровій ділянці спектра, але все ще незрозуміло чи є HCN другорядною, чи домінуючою батьківською молекулою CN. Автори статті [20] аргументували, що розподіл CN несумісний з HCN як домінуючою батьківською молекулою, за виключенням того, що швидкість поширення в комі була значно нижчою, ніж зазвичай припускається. На противагу, пряме порівняння розподілу HCN і CN з використанням відносно свіжих спостережень в міліметровому діапазоні, показало, що HCN цілком може бути домінуючою батьківською молекулою CN [21] і що HCN і CN розподілені схожим чином в межах коми [22].

Фесту та співавтори [56] показали, що внесок HCN у виділення CN знаходиться на рівні відсотка. Вони вважають, що у найкращому випадку батьківська молекула CN має час життя $3.5 \cdot 10^4$ с на 1 а.о. при швидкості 1–2 км/с й дійшли висновку, що це узгоджується з C_2N_2 як домінуючою батьківською молекулою. Бонев та Комітов [23] промодельювали шкали довжин CN і дійшли висновку, що C_2N_2 є єдиною батьківською молекулою для CN.

Смуги молекули C_3 . Перше виявлення емісійної смуги, яку пізніше ототожнили як молекулу триатомного карбону C_3 , відбулось в 1881 р. Проте експериментальне ототожнення смуги C_3 не було зроблено до 1951 р. [24]. C_3 є відносно нестабільною молекулою, що ускладнює її вивчення. До ототожнення смуга була відома просто як “4050 Å-група”. Основна частина смуги знаходиться між 3900 і 4140 Å з максимумом на 4050 Å й додатковим піком, ще не дуже добре визначеним, на 4300 Å. Проте, старанне дослідження кометних спектрів показує лінії, що можуть бути віднесені до цієї смуги від ~ 3350 до 4700 Å.

C_3 — лінійна симетрична молекула з ядрами однакової маси. Смуга була ототожнена як електронний перехід $A^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$. R-вітка кантів смуги на 4072 і 4260 Å може бути визначена до (1,0,0)–(1,0,0) і (0,0,0)–(1,0,0) смуг відповідно. Густина ліній переходить у псевдоконтинуум від C_3 . Для всіх Σ рівнів молекули кожна друга лінія відсутня. Заплутаність спектра і складність збудження C_3 в лабораторії призводять до великої кількості неототожнених ліній. На додачу, густина ліній робить неможливим розділення усіх окремих ліній. Останнім часом спостереження кометного C_3 були використані для отримання нового дипольного моменту похідної $\left(\frac{d\mu}{dr}\right)$ приблизно 2.5 дебай/Å для цієї системи смуг [25].

Батьківська молекула C_3 невідома. Хімічно можливі батьківські молекули, такі як C_3H_4 і C_3H_8 , не знайдені в кометних спектрах. Спостереження розподілу C_3 газу в комі комет припускає, що батьківська молекула C_3 повинна мати коротку шкалу довжин, порядку $3 \cdot 10^3$ км [26]. Можливо, що довголанцюжкові молекули з C, видимі у міжзоряному середовищі, є батьківськими молекулами для C_3 , але ці довголанцюжкові C-молекули вважаються такими, що мають змінні одно- та потрійні міжатомні зв'язки, що ймовірніше розірвалися б для утворення C_2 , ніж C_3 . Фоторуйнування C_3 призводить до утворення молекули C_2 і атома C.

Смуги радикала CN. Смуга CN (0,0) $A^2\Delta - X^2\Pi$ має пік на 4314 Å і виглядає в кометному спектрі як слабка смуга. Два фактори сприяють цьому: сила осцилятора є малою $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ час життя перед фотодисоціацією на 1 а.о. складає 35–315 с [27]. Вищесказане означає, що навіть дуже слабкий пік є результатом значної променевої концентрації, тобто де б CN не виявляли в комі, батьківська молекула має бути поблизу. Тому CN може бути використано і як показник батьківського розподілу.

Ймовірною батьківською молекулою CN є CN_4 . Метан спочатку розпадається на CN_2 (CN_3 — дуже нестабільна) і потім на CN. Виявлення CN в оптиці значно простіше за виявлення CN_4 в інфрачервоному діапазоні, тому тут є значно більша база даних виявлень CN, ніж виявлень CN_4 .

Смуга (0,0) $B^2\Sigma - X^2\Pi$ також була виявлена при високому розділенні на 3886 Å. Ця смуга не відділяється від CN при нижчому розділенні. Необхідно пам'ятати про цю смугу, однак, коли рахуються моделі $^{12}CN/^{13}CN$, оскільки деякі із ліній CN співпадають із слабкішими лініями CN.

Смуги радикалів NH і NH_2 . Смуга (0,0) $A^3\Pi_i - X^3\Sigma^-$ NH з'являється між 3345 і 3375 Å. Вона була вперше ототожнена в спектрі комети C/1940 R2 (Каннингема) [28] і зазвичай видно лише смугу NH, що показує R- і P-вітки, але Q-вітка відсутня, або слабка. Фесту та співавтори [22] показали, що спектр NH може бути повністю пояснений на основі чистої резонансної флуоресценції без будь-яких ударів.

Емісійні лінії NH_2 були виявлені в області від ~ 3980 Å до 1 мкм [8]. Ці лінії належать електронному переходу $\tilde{A}^2A_1 - \tilde{X}^2B_1$, у відповідності з переходами між вищими електронно-коливними рівнями і нижнім рівнем \tilde{X}^2B_1 , електронної смуги (тобто (0,13,0) $\tilde{X}^2B_1 - (0,0,0)\tilde{X}^2B_1$). Молекула NH_2 має асиметричний спіні з лінійним верхнім рівнем і нижчим рівнем під кутом 103° , роблячи її спектр досить складним та нестандартним.

Широко поширена думка, що NH_3 є батьківською для NH_2 , що розпадається, в свою чергу, на NH_2 , яка в свою чергу розпадається на NH. Палмер з співавторами [29] вперше ототожнили NH_3 в радіоспектрі C/1996 B2 (Хякутаке) й потім вона була виявлена в радіоспектрі C/1995 O1 (Гейла–Боппа) [30] та інфрачервоному спектрі комети 153P/Кейя-Жанга [31]. Іншими потенціальними батьківськими молекулами є молекули N_2H_4 і CN_3NH_2 .

До виявлення NH_3 , шлях хімічних реакцій обґрунтовувався на основі шкал довжин різних типів речовини. Проте, тут було багато неузгодженостей щодо величин, суттєвих для кожного типу речовини. Зазвичай, використовувались g-фактори для NH_2 з робіт [66]. Загально вважається, що батьківська молекула NH_2 має відносно коротку шкалу довжин, порядку $\sim 4 \cdot 10^3$ км. [32-33]. Шкала довжини розпаду — декілька 10^4 км.

Кавакіта зі співавторами [34] визначили нові g-фактори для 5 смуг й знайшли величини, менші за отримані [31] в 2.7–6.4 рази. Корсун та Йокерс [36] застосували ці g-фактори до зображень, отриманих

з NH_2 фільтром і показали, що отримані швидкості виділення узгоджуються із NH_3 як батьківською молекулою.

Кім та інші [37] порахували коефіцієнти флуоресценції NH , враховуючи ефект Свінгса. Частина проблеми з визначенням шкали довжин для NH — це нестача даних разом з важкістю визначення атмосферної екстинкції на довжині хвилі NH . Діапазон батьківської шкали довжин від $(1-5) \cdot 10^4$ км. Краснополський і Ткачук [33] досить переконливо аргументують на користь того, що ці величини повинні бути більшими — зазвичай вони повинні бути $\sim 2 \cdot 10^5$ км. Фінк з колегами [34] використали спектрофотометричні просторові профілі емісій OH і NH , отримані при спостереженні комети 1P/Галлея, проведених супутником АСТРОН, щоб отримати відносну поширеність NH_3 з майже незалежним від моделі аналізом.

Усі спостереження наводять на думку, що біля 95% фотодисоціації NH_3 утворює NH_2 і тому дуже мало NH приходить прямо із NH_3 . Використовуючи різні параметри, знайдені в літературі, маємо загальне узгодження, що поширеність NH_3 є близько 0.5% від H_2O для усіх комет, якщо NH_3 є єдиною батьківською молекулою NH_2 і NH .

Кавакіта зі співавторами [39] використав NH_2 спектри високого розділення комети C/1999 S4 (ЛІНЕ-АР), щоб змоделювати орто-пара відношення і визначити спінову температуру для NH_3 . Вони знайшли температуру $28 \pm 2^\circ \text{K}$ за умови, що NH_2 виникає від чистого флуоресцентного збудження NH_3 .

Радикали гідроксиду. Радикал OH є продуктом дисоціації води, який найлегше спостерігати, і який найчастіше використовують, щоб визначити швидкість виділення води, й слугує стандартом, з яким порівнюють інші елементи в комі. Проте, визначення швидкості виділення води з цих даних відрізняється для трьох різних наборів даних й отримані швидкості дуже часто не узгоджуються. По-перше, це дані наземних фотометричних вимірювань на $\lambda \sim 3085 \text{ \AA}$, зроблених за допомогою стандартизованих вузько-смугових фільтрів і проілюстрованих роботою [40]. По-друге, це дані спостережень на $\lambda \sim 18 \text{ см}$ радіолінії OH у понад 50 кометах, отриманих з допомогою радіотелескопу Nancaу з 1973 р. [41]. По-третє, це спектроскопічне вимірювання OH флуоресценції на $\lambda \sim 3085 \text{ \AA}$ з орбітального космічного апарата IUE. Цей супутник знаходився на геостационарній орбіті Землі й його оптичні характеристики, які тривалий час досліджувались, не погіршились значно з часом, гарантуючи надійне калібрування усіх спостережень. Існує також багато інших спектроскопічних спостережень в радіо та ультрафіолетовому діапазонах, нещодавно отриманих за допомогою HST і на високогірних наземних обсерваторій.

Інтерпретація та взаємне порівняння радіо та УФ спостережень залежать від вірного (точного) знання УФ накачки інверсного Λ — подвійного основного рівня молекули. З високим спектральним розділенням в ультрафіолеті, індивідуальні оберально-коливальні лінії смуги можуть бути розділені і такі вимірювання слугують основою розрахунку флуоресценції, що залежить від спектра Сонця високого розділення [42]. Але це розділення не може зрівнятись з доступним розділенням для 18 см радіоліній, що у просторі швидкостей можуть досягати $\sim 0.3 \text{ км/с}$, таким чином дозволяючи визначення кінематичних властивостей газу, що витікає з ядра комети [43–45].

В роботі [44] вивчено варіації швидкості OH з кометоцентричною та геліоцентричною відстанями на основі величезної бази спостережень комети Галлея. Ударне затухання інверсії нижнього стану впливає на радіолінії, але не на УФ випромінювання, проте найсильніші ультрафіолетові лінії можуть насичувати густину стовпця OH , що є поблизу ядра, і спостереження за допомогою телескопу ім. Хаббла показують ознаки цього ефекту. З допомогою своїх моделей, обмежених вимірюваннями швидкості, Бокле–Морван зі співавторами [44] та Жерар [46] змогли узгодити швидкості виділення води, отримані із спостережень у 18 см лінії, із отриманими спостереженнями комети 1P/Галлея за допомогою КА IUE в широкому діапазоні геліоцентричних відстаней. Моделювання, виконане Комбі та Фельдманом [47], було здатним досягти узгодження між темпами виділення для комети 1P/Галлея, отриманих із УФ даних у лінії OH , і отриманими з лайман-альфа HI , що обидві спостерігались майже одночасно супутником IUE. Схожий результат був отриманий для комети 21P/Джакобіні–Ціннер [48].

Бокле–Морван та Жерар [43] також відмітили асиметрію і в структурі швидкості, і в просторовому розподілі 18 см ліній в трьох кометах, що вони приписали асиметричному виділенню газу в ядрі. Про схожий результат доповідали А'Херн та Шляйхер [49], які використали ефект Грінштейна, щоб продемонструвати асиметричне газовиділення з ядра комети 2P/Енке.

Лінія **OH** також була визначена в інфрачервоних спектрах високого розділення $\sim 3 \text{ мкм}$ в кількох останніх кометах [49–51]. Із просторових профілів окремих ліній, Брук зі співавторами [50] показали, що із ліній, породжених високими обертальними рівнями, слідує, що батьківська молекула є H_2O , і тому ці лінії виникають із миттєвих емісій, в той час як лінії із нижчим збудженням були більш плоскими і є результатом УФ-флуоресценції. Ці спостереження ще не були кількісно досліджені для визначення швидкості газовиділення.

Наприкінці відмітимо, що УФ (0,0) смуга при флуоресцентній рівновазі складається із невеликої кількості окремих ліній, що добре розділяються при спектральному розділенні $\leq 1 \text{ \AA}$. Це змусило А'Херна

та співавторів [52] порахувати аналогічний спектр OD. В той час вони знайшли, що найсильніші лінії OD здатні відділитись від ліній OH і частково збільшуються при геліоцентричних швидкостях між -30 і -5 км/с, спроби виявити ці лінії з допомогою даних IUE і телескопа Хаббла не були успішними.

Атомарний водень. За першим спостереженням великої НІ лайман-альфа коми, що оточувала комету Беннета (C/1969 Y1) в 1970 р., двома космічними апаратами з навколоземними орбітами [53–54], ця емісія спостерігалась в великій кількості комет за допомогою візуальних детекторів і спектрографів на різноманітних ракетних зондах, орбітальних обсерваторіях і різних інших космічних апаратах. Початкове моделювання просторового розподілу, що брало до уваги надлишок швидкостей складних джерел, тиск сонячного випромінювання і ефекти переносу випромінювання, було підсумоване Келлером [55].

Лінія $H\alpha$ на 6563 \AA також спостерігалась із дуже високим спектральним розділенням з використанням Фабрі–Перо інтерферометрії і куде-ешеле спектроскопії [56–59].

Комбі [60] побудував профілі лінії лайман-альфа, виміряні приладом GHRS на телескопі ім. Хаббла, отримані із спектральною вибіркою 4 км/с . Спектр, отриманий на відстані $111\,000 \text{ км}$ від ядра комети на оберненій до Сонця стороні коми комети C/1996 B2 (Хякутаке), був лише за межами оптично товстої коми. Аналіз профілю за моделлю Монте-Карло показує характерні риси різних складових: 18 км/с від дисоціації H_2O , 8 км/с від дисоціації OH, й центр лінії з дуже низькою швидкістю від термалізованих атомів водню. Обчислення переносу випромінювання за даними, отриманими з телескопом ім. Хаббла, здійснені [61] показують детальні ефекти багатократного розсіювання освітлених сонячних лайман-альфа фотонів і прогресивного насичення центру лінії на відстанях, що зменшуються відносно ядра комети.

Лінії атомарного кисню $O(^1D)$ $\lambda 6300 \text{ \AA}$ та інші заборонені емісії. В оптичному діапазоні довжин хвиль спектра існує три заборонених переходи кисню: червоний дублет на 6300.304 і 6363.776 \AA ($^1D\text{-}^3P$) і зелена лінія на 5577.339 \AA ($^1S\text{-}^1D$). Ці переходи є результатом “швидкої” емісії, тобто атоми випромінюють прямо у збуджених станах 1S або 1D в результаті дисоціації батьківських молекул. Час життя стану 1D складає $\sim 130 \text{ с}$, в той час як час життя 1S стану становить менше 1 с . Таким чином, ці три переходи є чудовими “міченими атомами” розподілу їхніх батьківських молекул, оскільки вони не можуть рухатись далеко без розпаду. Атоми кисню, що збуджуються до рівня 1S , переходять на нижній рівень 3P через рівень 1D протягом 95% часу, в той час як 5% перехід прямо на нижній рівень випромінює лінії на 2977 \AA і 2958 \AA . Так, якщо зелена лінія присутня в кометному спектрі, то червоний дублет також повинен бути присутнім, крім того червоний дублет може утворитись без зеленої лінії.

Заборонені лінії кисню можуть сформуватись в фотопроцесах, що включають молекули H_2O , CO або CO_2 як батьківські. Складнішим типам речовини, що містять кисень, таким як $HCOOH$ або H_2CO , нереально бути батьківськими, оскільки вони не можуть розпадатись достатньо швидко, щоб випромінювати спостережуваний розподіл $O(^1D)$ [62]. Прийнято вважати, що молекула H_2O є домінуючою, якщо не єдиною, батьківською молекулою для $O(^1D)$ і $O(^1S)$ на відстанях більших 10^5 км від ядра, за межами яких домінуючою молекулою стає OH. Визначення кількості батьківської молекули потребує спостереження інтенсивності трьох ліній, разом з правильними розрахунками швидкостей дисоціації та співвідношення гілок.

Вимірювання інтенсивності трьох ліній вимагає високого спектрального розділення, щоб виокремити кометні лінії кисню з телуричних ліній кисню і інших кометних емісій. Це розділення залежить від доплерівського зсуву комети з наближенням до Землі. Для червоного дублету $O(^1D)$ лінія розташована поблизу кометних емісій NH_2 , але сильні лінії NH_2 в основному легко відокремлювати від лінії кисню, якщо спектральне розділення є достатнім, щоб розділити кометні і телуричні емісійні лінії кисню. Область із зеленою лінією є значно складнішою. Знову кометні і телуричні лінії зміщені в сторону через доплерівський зсув. Проте область зеленої лінії є в середині Р-гілки молекули $C_2(1,2)$. Наразі відомо лише про чотири спостереження лінії 5577 \AA $O(^1S)$ в кометних спектрах: це спостереження комет C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock) [63] і C/1996 B2 (Hyakutake) [64] з високим просторовим розділенням; спостереження комети 1P/Галлея [65] з надвисоким спектральним розділенням (плюс моделювання); ще Аніта та Вільям Кокрен [66] відмічали чітко виявлення лінії $O(^1S)$ в спектрі комети C/1994 S4 (LINEAR), в якому були дуже слабкі емісії молекули C_2 , що зменшило паразитний внесок молекули C_2 у спектр. Вони підраховували відношення інтенсивності ліній червоного дублету й знайшли його як 3.03 ± 0.14 , тобто в чудовому узгодженні з відношенням, передбачуваним ейштейнівськими А-коефіцієнтами [67]. Точне вимірювання відношення інтенсивності зеленої лінії до суми інтенсивності ліній червоного дублету може потім бути використане для вибору батьківських молекул. Отримано наступні значення:

0.22 – 0.34 для C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock) [63]

0.12 – 0.15 C/1996 B2 (Hyakutake) [64]

0.05 – 0.1 для 1P/Галлея [65]

0.06 ± 0.01 для C/1999 S4 (LINEAR) [66]

Всі автори вказують на H_2O як домінуючу батьківську молекулу заборонених ліній кисню. Проте,

Аніта та Вільям Кокрен аргументують, базуючись на ширині лінії, що H_2O не може бути єдиною батьківською молекулою $\text{O}(^1\text{D})$.

Якщо припустити, що більшість атомів $\text{O}(^1\text{D})$ виділяються при дисоціації H_2O , то лінію на 6300 \AA можна використовувати для вимірювання продуктивності H_2O . Ця лінія є більш зручною для більшості детекторів, ніж смуги OH в ультрафіолеті, що робить її спостереження важливим інструментом для вимірювання швидкості виділення H_2O . Ентузіазм для використання вимірювань лінії 6300 \AA повинен стримуватись розумінням обмежень. По-перше, тут є внесок блендування лінії з телуричною лінією кисню і з NH_2 . Зокрема, телурична лінія є достатньо змінна, тому моделювання її зміщення, коли вона блендується з кометними піками, не є легким. Спостереження $\text{O}(^1\text{D})$ з високим спектральним розділенням були проведені для численних комет [68–69], зокрема авторами [70]. Значно більша кількість спостережень була одержана із середнім розділенням і інтенсивність $\text{O}(^1\text{D})$ була обчислена моделюванням внеску телуричного кисню $\text{O}(^1\text{D})$ і кометного NH_2 [71–72]. Арпіні та ін. [73] дослідили ефекти спектрального розділення на перешкоди від неблендуючих ліній $\text{O}(^1\text{D})$ і NH_2 й дійшли висновку, що низьке спектральне розділення може призвести до недооцінювання інтенсивності $\text{O}(^1\text{D})$ та швидкості виділення майже вдвічі.

Іншим обмеженням на використання лінії $\text{O}(^1\text{D})$ як міри швидкості виділення H_2O є те, що відношення розгалужень фотохімічних реакцій, що розкладають H_2O не є добре визначеним. В той час як весь OH є дочірнім H_2O , деяка кількість $\text{O}(^1\text{D})$ є дочірньою від дисоціації H_2O , а деяка є продуктом пізнішої дисоціації OH .

Атомний склад коми. За виключенням CO і CO_2 , темпи сонячної дисоціації є значно вищими за темпи для фотоіонізації або іонізації сонячним вітром основних молекулярних компонентів коми [74]. Так, кінцеві продукти молекулярних типів речовини будуть переважно атоми, з яких вони складаються: H , O , C , N і S , та іони, що їм відповідають.

Смуги молекули Na. Перше ототожнення емісій D-лінії кометного натрію на $5890\text{--}5896 \text{ \AA}$ датується візуальними спостереженнями комет C/1882 F1 і C/1882 R1 [75] та комети C/1910 A1 [76]. Для останньої комети спостереження з призмою показали, що поширення емісії Na в напрямі хвоста перевищує поширення C_2 смуги Свана для цієї комети. Загалом Na є малим типом речовини у всіх атмосферах, де він був виявлений (на Io [77], на Меркурії [78], на Місяці [79], він був, проте, корисним, оскільки дуже мала кількість Na легко спостерігається завдяки великій силі осцилятора в D-лініях і розміщенню на довжинах хвиль піків сонячного випромінювання.

Цікава поведінка натрію та його емісії є результатом сильної взаємодії з сонячним випромінюванням. Сонячний спектр містить дві сильні лінії поглинання натрію, що коригують флуоресценцію атомів натрію в Сонячній системі залежно від їх геліоцентричної швидкості. На відстані однієї астрономічної одиниці від Сонця, сильна флуоресценція в D-лініях утворює велике прискорення тиском випромінювання, що змінюється від $\sim 3 \text{ см/с}^2$ для атомів натрію у стані спокою по відношенню до Сонця (видимий в нижній частині сонячних ліній) до більше ніж 50 см/с^2 для атомів натрію, зміщених через доплерівський зсув в ближній континуум. Фотонне збудження світіння емісійних ліній дублету D_1 і D_2 натрію розглянуто в роботі Барановського і Тарашук [80].

Перші вивчення Na обмежувалися спостереженнями комет-сангрейзерів, з яких можливо найбільш помітною була комета Ікейя-Секі (C/1965 S1) з перигелієм $q=0.04$ а.о. і для яких емісія натрію не була видима для геліоцентричних відстаней $r > 0.6$ а.о. [81]. Базуючись на спостереженнях цієї комети автори [82] і [83–84] стверджували, що в таких суворих умовах інтенсивність емісії Na D повинна бути розрахована для атомів натрію, вбудованих в мікрометрову тугоплавку силікатну речовину, що має високу приховану теплоту випаровування. Г.Престон [82] зокрема відзначив, що увесь набір металічних типів речовини на додачу до натрію був визначений спектроскопічно. Ці емісійні лінії було опубліковано Слотером в роботі [85]. Через короткий фотоіонізаційний час життя атомів натрію поблизу Сонця і значне поширення емісій Na в напрямку хвоста ($\sim 10^3$ км) ранні вивчення комет-сангрейзерів [86–87] прирівняли поширення в напрямку як ознаку часу життя батьківських тугоплавких гранул. Ці дослідження, однак, нехтували дуже великим прискоренням від тиску випромінювання на атоми натрію. На додачу, було знайдено, що фотоіонізаційний час життя [74, 86] може бути майже втричі більшим за прийнятий тоді.

Спостереження емісії Na поблизу 1 а.о. обмежені кількома яскравими активними кометами. Натрій в кометі Когоутека C/1973 E1 ($q=0.18$ а.о.) був видимий, як мінімум, за геліоцентричною відстанню 0.47 а.о. [87]. Перша інтерпретація емісії Na D на відстанях за межами 1 а.о. була здійснена Опенгеймером [88] в кометі Веста (C/1975 V1) на 1.4 а.о.; він зробив висновок, що Na був заморожений в молекули всередині леткого крижаного компонента. Він обґрунтував, що лише у комет-сангрейзерів компоненти тугоплавких гранул будуть достатньо гарячими, щоб випустити Na , навіть у елементній або молекулярній формі.

Дельзем та Комбі [87] показали, що просторовий профіль Na в кометі Когоутека мав максимум

яскравості в тому ж місці, що і пиловий континуум (тоді як максимуми яскравості інших газових типів речовини (C_2 , CN і NH_2) усі були зміщені в сонячному напрямку), припускаючи деякий зв'язок натрію із пилом. Комбі та ін. [89] розробили детальну модель аналізу просторових профілів Na із довгощілинних спектрів комет несангрейзерів (Бенета (C/1969 Y1), Когоутека (C/1973 E1) і 1P/Галлея) і ототожили два типи просторових характерних рис. Тут було відносно стабільне точкове джерело Na , а також розтягнуте джерело, видиме в основному на стороні (в напрямку хвоста). Останнє має більший темп виділення і змінюється в кілька разів порівняно з джерелом ядра на таких коротких проміжках часу як день. Вони також відмітили деяку просторову схожість в кометі Галлея між розтягнутим розподілом Na та йонними профілями, але не з пилом. Це, у поєднанні з великою змінністю, змусило їх запропонувати можливу роль деяких процесів у плазмі щодо розтягнутих джерел.

У зв'язку з вкрай великим загальним темпом газовиділення, ефектно яскраві та довгі натрієві хвости було знайдено в кометі Гейла-Боппа (C/1995 O1) Кремонезе [90] та Вільсоном [91]. Аналіз моделювання цих зображень та подальші спектроскопічні спостереження [92, 93] показали, що спостережуваний розподіл Na в хвості міг би бути поясненим джерелом Na на ядрі або поблизу ядра при темпі виділення, що є меншим за 0.3% від очікуваного на основі поширеності сонячного натрію у порівнянні з киснем. Це є, фактично, той самий рівень джерела натрію на ядрі або поблизу ядра, ототожнений Комбі та ін. [89] в кометі Галлея і видимий в кометах Беннета і Когоутека. Тому газовий Na , видимий в кометах не-сангрейзерах, не може представляти основну масу кометного натрію, що є переважно обмеженим тугоплавким компонентом й був видимий в пилових мас-спектрах комети Галлея [94].

На відміну від простягнутого джерела натрію в кометі Галлея, вимірювання натрію у внутрішній комі комети Гейла-Боппа показали простягнуте джерело компонента, що виглядає як таке, що може бути пов'язане із асиметричним розподілом пилу [92]. Вони також знайшли, що приблизно половина натрію, що був виділений з джерела на ядрі і половина з простягнутого джерела, що приблизно повторює розподіл r^{-2} асиметричного пилу коми і не схоже ні на просторовий розподіл, ні на розподіл швидкостей, що були видимі в одночасно спостережуваних іонах води H_2O^+ . Спостереження Na в майбутніх яскравих кометах необхідні для того, щоб відповісти на питання природи простягнутого джерела.

Молекулярні іони. Фотолітичні процеси та хімічні реакції іонізують молекули в комі комет і тому в кометних спектрах ототожнені різні молекулярні іони. В ультрафіолетових та оптичних: CH^+ , CO^+ , CO_2^+ , H_2O^+ , N_2^+ і OH^+ . Іони були виявлені в радіоспектрі комети C/1995 O1 (Гейла-Боппа), включаючи HCO^+ [95], H_3O^+ і CO^+ [96]. Ці іони показують дуже відмінний розподіл в комі від розподілу нейтральних молекул, оскільки іони прискорюються в напрямку хвоста сонячним вітром. Так, типи речовини іонів часто називають типами речовини хвоста. Проте, необхідно відмітити, що багато іонів спостерігаються відносно близько від ядра комети (гарною ілюстрацією є отримані з довгою щільною спектри CO^+ і CO_2^+ в кометі 1P/Галлея [97]).

Домінуючими процесами для утворення іонів є фотодисоціація (наприклад, $H_2O + h\nu \rightarrow OH^+ + H + e$) і фотоіонізація (наприклад, $H_2O + h\nu \rightarrow H_2O^+ + e$) [98]. В межах ударної зони (внутрішні кілька тисяч кілометрів коми для помірно яскравих комет), іони можуть випускатись при обміні зарядом з протонами сонячного вітру, електронною ударною іонізацією, реакціями обміну зарядом і реакціями протонами.

Переходи CO^+ , що видимі в синьому/УФ діапазоні спектра, виникають з першої негативної системи смуг ($B^2\Sigma - X^2\Sigma$) і системи смуг кометного хвоста ($A^2\Sigma - X^2\Sigma$). Смуги кометного хвоста показують два піки, що видимі через $P_{1/2}$ і $P_{3/2}$ гілок. В загальному, (2,0) і (3,0) смуги кометного хвоста є найсильнішими спостережуваними смугами. Переходи в кометному хвості відповідають за блакитну появу іонного хвоста в кольорових зображеннях комети.

Присутність смуг CO^+ в кометних спектрах призвела до переконання, що CO загалом присутнє на рівні декількох відсотків в кометних ядрах. Для емісій CO^+ видимих в кометних спектрах на геліоцентричних відстанях більших за 5 а.о. [99, 100] були проведені обчислення коефіцієнтів флуоресценції для більшості смуг кометного хвоста, враховуючи ефект Свінгса, що повинен впливати, оскільки тут є кілька відносно збуджених рівнів й сонячний спектр густий в синій області.

Інший іон, що помітно з'являється в червоній частині спектра, це H_2O^+ . Він також тривалий час спостерігався в кометних спектрах. Він був ототожнений вперше в 1974 р. в спектрі комети C/1973 Y1 (Когоутек) [101]. Електронний перехід є $\tilde{A}^2A_1 - \tilde{X}^2B_1$ і він спостерігався в ділянці 4000–7500 Å. Вегман з співавторами [102] провели магнітогідродинамічне і хімічне моделювання кометної коми й зробили висновки, що для малих комет до 11% молекул води є іонізованими.

H_2O^+ з'являється в спектральній смузі пропускання, що легко доступна для ПЗЗ приймачів, тому є багато спостережень H_2O^+ в кометній комі. Лутц з колегами [103] обчислили фактори флуоресцентної ефективності для шести смуг. H_2O^+ є ізоелектронним до NH_2 , таким чином коментар [104] щодо зростання факторів ефективності NH_2 вдвічі також стосується H_2O^+ . Дійсно, хоч стандартне посилання на смугу H_2O^+ [105] застосовує лінійний запис, переходи більш коректно визначаються в їх кутовому записі [8].

Бонев та Йокерс [106] картографували розподіл H_2O^+ в кометі C/1989 X1 (Остіна). Вони знайшли сильну асиметрію з відносним плоским розподілом в напрямку хвоста і яка зменшується в 4 рази на перших 10^4 км в сонячному напрямку. Максимум густини стовпця H_2O^+ часто спостерігається зміщеним в бік хвоста.

Емісія CO_2^+ вперше спостерігалась в оптичному спектрі комети C/1947 S1 (Bester) [107] і в ультрафіолетовому спектрі комети C/1975 V1 (West) [108]. Оптичні лінії виникають із електронної системи смуги Фокса–Даффендака–Баркера ($\tilde{A}^2\Pi_u - \tilde{X}^2\Pi_g$) і з'являються в діапазоні довжин хвиль від 3000 до 4000 Å. Ультрафіолетовий дублет на 2890 Å утворюється внаслідок електронного переходу $\tilde{B}^2\Sigma_u - \tilde{X}^2\Pi_g$ [109]. Автори [110] з допомогою IUE відмітили сильне зростання цього піку в спектрі комети 1P/Галлея, отриманому в положенні 150 000 км в напрямку хвоста від ядра в час, що відповідає піку оптичного спалаху. Це спостереження підтверджує, що CO_2 може відігравати важливу роль в процесі спалаху.

Ліч [111] відмітив, що темпи емісії CO_2^+ зазнають впливу внутрішньомолекулярних зв'язків між $\tilde{B}^2\Sigma_u$ і $\tilde{A}^2\Pi_u$ рівнями, тому емісія з рівня $\tilde{B}^2\Sigma_u$ може з'явитися на $\lambda > 3000$ Å (це розглядається як "флуоресценція з червоним зміщенням"). Такі смуги виявляють в кометних спектрах вздовж деяких некласифікованих смуг в червоному напрямку до 4000 Å. Ефективності збудження для деяких переходів можна знайти в [112].

Смуги OH^+ електронної системи $A^3\Pi - X^3\Sigma^-$ вкривають повністю оптичну смугу пропускання. Проте, лише лінії смуг (0,0) і (1,0) були виявлені [107, 109]. Лютц [103] вивів фактори флуоресцентної ефективності для багатьох смуг OH^+ , але з попередженням, що вони точні лише до $\pm 50\%$, оскільки ефект Свінгса не враховувався.

Лінії CN^+ видимі в кометних спектрах, із-за переходу $A^1\Pi - X^1\Sigma^-$. Лише низькоенергетичні переходи смуги (0,0) видимі в околі 4230 Å. Ці лінії співпадають зі смугами CN і CO^+ . [103] також обчислили g-фактори для CN^+ . Як і для OH^+ , вони застерігають, що ефект Свінгса не враховувався і тому коефіцієнти флуоресценції є вірним до $\pm 50\%$.

Інші молекулярні іони були виявлені безпосередньо на місці вимірюваннями мас-спектрометра, зробленими для комети Галлея в 1986 р. Це H_3S^+ і C_3H_3^+ , а також складні органічні іони [113, 114]. Спроби пов'язати деякі неототожені спектральні піки з іонами, такими як ці, або із H_2S^+ необхідно робити обережно.

Випадок N_2^+ . N_2 — найменш реактивна молекула з усіх типів речовини, що містять N, тому вивчення N_2 є важливим для розуміння кометного N. На додачу, умови у ранній сонячній туманності були такими, що домінуючим рівноважним типом речовини N мала б бути N_2 . Проте спостереження N_2 вкрай важко проводити. Наземні спостереження страждають від телуричного поглинання; інтерпретація даних мас-спектрометра космічного апарата є компроментована фактом, що і N_2 , і CO мають масу рівну 28. Тому спостереження смуги N_2^+ Першої негативної ($B^2\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$) (0,0) на 3914 Å були використані як достатньо об'єктивні для вивчення N_2 . Такі спостереження потребують високого спектрального розділення для того, щоб ізолювати емісії кометного N_2^+ від будь-яких телуричних емісій N_2^+ . Також вони потребують доволі яскравої комети з добре розвинутим іонним хвостом для спостережень. Просторовий розподіл будь-яких емісій може бути використаний, щоб розрізнити телуричні і кометні типи речовини.

Спостереження відповідної спектральної області хвостів комет, зроблені в минулому, і приклади комет, що показують N_2^+ в своїх спектрах, можна знайти в [6] (наприклад, комети Бестера, пластинка XXIIIa, і комета Морхауза, пластинки VIa і VIb). Кокрен з співавторами [115] підвели підсумки більшості останніх спостережень N_2^+ . Ці спостереження не були отримані з високою роздільною здатністю. Автори робіт [115, 116] повідомили про спостереження з високим розділенням і високим відношенням сигнал-шум трьох комет, в спектрах яких не було знайдено N_2^+ і що мали дуже жорсткі обмеження на величину N_2^+ . Чи мають різні комети відмінні величини N_2 , можливо, пов'язані із місцем їх утворення? Чи вичерпується N_2 протягом життя деяких комет? Чи помиляються наші моделі, що показують, що N повинен бути переважно в N_2 , ніж в NH_3 в сонячній туманності? Чи є варіації в кількості N_2 в кометах результатом наявності клатратів N_2 і CO [117]? І, в кінці кінців, наскільки надійними є ранні доповіді про N_2^+ в спектрах кометних хвостів? Відповіді на ці важливі питання потребують спостережень із вищим спектральним розділенням комет з різними динамічними історіями.

Подяка. Робота частково виконувалась в рамках гранту Фонду фундаментальних досліджень України.

1. Donati G.V. Comete II. 1864 // Astronomische Nachrichten. — 1864. — 62, № 1488. — P.378.
2. Шульман Б.С. Спектрофотометрическое исследование некоторых комет // Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулковке. — 1947. — 5, № 17. — С.1.
3. Полосков С.М. Роль рэлеевского рассеяния в общем процессе отражения и рассеяния радиации ядром кометы // Вестн. Моск. ун-та. — 1948. — № 2. — С. 37–39.

4. Houziaux L. Sur l'origine du spectre continu des comètes // Bull. Acad. Roy. Belgique. Class Sciences. — 1959. — **45**. — P.375–394.
5. Swings P., Haser L. Atlas of Representative Cometary Spectra // Impr.Ceuterick. — Louvain. — 1956.
6. Preston G.W. The spectrum of Ikeya-Seki (1965f) // Astrophys. J. — 1967. — **147**. — P.718–742.
7. Churyumov K.I., Luk'yanyk I.V., Berezhnoy A.A., Chavushyan V.H., Sandoval L., Palma A., Kleshchonok V.V., Chubko L.S. Exploration of spectra comet C/2000 WM1 (LINEAR) obtained in Mexico on November 22 and 24, 2001 and April 5, 2002 // Abstract book of CAMMAC. — Vinnytsia, Ukraine, 2002. — P.11.
8. Cochran A.L., Cochran W.D. A high spectral resolution atlas of Comet 122P/de Vico // Icarus. — 2002. — **157**. — P.297–308.
9. Jackson W.M. The photochemical formation of cometary radicals // J.Photochem. — 1976. — **5**. — P.107–118.
10. O'Dell C.R. et al. C₂ in Comet Halley — Evidence for its being third generation and resolution of the vibrational population discrepancy // Astrophys. J. — 1988. — **334**. — P.476–488.
11. Combi M.R., Fink U. A critical study of molecular photodissociation and CHON grain sources for cometary C₂ // Astrophys. J. — 1997. — **484**. — P.879–890.
12. Sorkhabi O., et al. Using photochemistry to explain the formation and observation of C₂ in comets // Planet. Space Sci. — 1997. — **45**. — P.721–730.
13. Bus S.J., A'Hearn M.F., Schleicher D.G., Bowell E. Detection of CN emission from (2060) Chiron // Science — 1991. — **251**. — P.774–777.
14. Kleine M., Wysckoff S., Wehinger P.A., Peterson B.A. The cometary fluorescence spectrum of cyanogen: A model // Astrophys. J. — 1994. — **436**. — P.885–906.
15. Kleine M., Wysckoff S., Wehinger P.A., Peterson B.A. The carbon isotope abundance ratio in comet Halley // Astrophys. J. — 1995. — **439**. — P.1021–1033.
16. Lambert D.L., Danks A.C. High-resolution spectra of C₂ Swan bands from comet West 1976 VI // Astrophys. J. — 1983. — **268**. — P.428–446.
17. Lambert D.L., et al. High-resolution spectroscopy of the C₂ Swan 0–0 band from Comet P/Halley // Astrophys. J. — 1990. — **353**. — P.640–653.
18. Arpigny C., et al. Anomalous nitrogen isotope ratio in comets // Science. — 2003. — **301**. — P.1522–1524.
19. Bockelee-Morvan D., Crovisier J. Possible parents for the cometary CN radical — Photochemistry and excitation conditions // Astron.Astrophys. — 1985. — **151**. — P.90–100.
20. Ziurys L.M., et al. Cyanide chemistry in Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) // Astrophys. J.Lett. — 1994. — **527**. — P.L67–L71.
21. Woodney L.M., et al. Morphology of HCN and CN in Comet Hale-Bopp (1995 O1) // Icarus. — 2002. — **157**. — P.193–204.
22. Festou M.C., et al. Tentative identification of the parent of CN radicals in comets := C₂N₂ // Bull. Am. Astron. Soc. — 1998. — **30**. — P.1089.
23. Bonev B., Komitov B. New two-variable fits for the scale lengths of CN and its parent molecule in cometary atmospheres: Application to the identification of the CN parent // Bull. Am. Astron.Soc. — 2000. — **32**. — P.1072.
24. Douglas A.E. Laboratory studies of the λ 4050 group of cometary spectra // Astrophys. J. — 1951. — **114**. — P.466–468.
25. Rousselot P., et al. A fluorescence model of the C₃ radical in comets // Astron. Astrophys. — 2001. — **368**. — P.689–699.
26. Randall C.E., Schleicher D.G., Ballou R.G., Osip D.J. Observational constraints on molecular scalelengths and lifetimes in comets // Bull. Am. Astron. Soc. — 1992. — **24**. — P.1002.
27. Singh P.D., Dalgarno A. Photodissociation lifetimes of CH and CD radicals in comets / Diversity and Similarity of Comets (E.J.Rolfe and B.Battrick, eds.) — ESA SP-278, Noordwijk, The Netherlands. — 1987. — P.177–179.
28. Swings P., Elvey C.T., Babcock H.W. The spectrum of Comet Cunningham, 1940C // Astrophys. J. — 1941. — **94**. — P.320–343.
29. Palmer P., et al. Comet Hyakutake: First secure detection of ammonia in a comet // Bull. Am. Astron. Soc. — 1996. — **28**. — P.927.
30. Bird M.K., et al. Radio detection of ammonia in comet Hale-Bopp // Astron. Astrophys. — 1997. — **325**. — P.L5–L8.
31. Moge-Sauer K., et al. Spatial distribution of O¹(D) from Comet Halley // Icarus — 2002. — **76**. — P.89–99.
32. Tegler S., Wyckoff S. NH₂ fluorescence efficiencies and the NH₃ abundance in Comet Halley // Astrophys. J. — 1989. — **343**. — P.445–449.
33. Krasnopolsky V.A., Tkachuk A.Y. TKS-Vega experiment — NH and NH₂ bands in Comet Halley // Astrophys. J. — 1991. — **101**. — P.1915–1919.
34. Fink U., Combi M.R., DiSanti M.A. Comet P/Halley — Spatial distributions and scale lengths for C₂, CN, NH₂, and H₂O // Astrophys. J. — 1991. — **383** — P.356–371.
35. Kawakita H., et al. High-dispersion spectra of NH₂ in the Comet C/1999 S4 (JIHEAP): Excitation mechanism of the NH₂ molecule // Publ. Astron. Soc. Japan. — 2001. — **53**. — P.L5–L8.
36. Korsun P.P., Jockers K. CN, NH₂, and dust in the atmosphere of comet C/1993 J3 (JIHEAP) // Astron. Astrophys.

- 2002. — **381** — P.703–708.
37. *Kim S.J., A'Hearn M.F., Cochran W.D.* NH emissions in comets — Fluorescence vs. Collisions // *Icarus* — 1989. — **77**. — P.98–108.
 38. *Feldman P.D., Fournier K.B., Grinin V.P., Zvereva A.M.* The abundance of ammonia in Comet P/Halley derived from ultraviolet spectrophotometry of NH by ASTRON and IUE // *Astrophys. J.* — 1993. — **404**. — P.348–355.
 39. *Kawakita H., et al.* The spin temperature of NH₃ in Comet C/1999 S4 (JIIHEAP) // *Science* — 2001. — **294**. — P.1089–1091.
 40. *A'Hearn M.F., Millis R.L., Schleicher D.G., Osip D.J., Birch P.V.* The ensemble properties of comets: Results from narrowband photometry of 85 comets, 1976–1992 // *Icarus*. — 1995. — **118**. — P.223–270.
 41. *Crovisier J., Colom P., Gérard E., Bockelee-Morvan D., Bourgois G.* Observations at Nancay of the OH 18-cm lines in comets. The data base. Observations made from 1982 to 1999 // *Astron. Astrophys.* — 2002. — **393**. — P.1053–1064.
 42. *Schleicher D.G., A'Hearn M.F.* The fluorescence of cometary OH // *Astrophys. J.* — 1988. — **331**. — P.1058–1077.
 43. *Bockelee-Morvan D., Gérard E.* Radio observations of the hydroxyl radical in comets with high spectral resolution — Kinematics and asymmetries of the OH coma in C/Meier (1978 XXI), C/Bradfield (1979X), and C/Austin (1982g) // *Astron.Astrophys.* — 1984. — **131**. — P.111–122.
 44. *Bockelee-Morvan D., Crovisier J., Gérard E.* Retrieving the coma gas expansion velocity in P/Halley, Wilson (1987 VII) and several other comets from the 18-cm OH line shapes // *Astron. Astrophys.* — 1990. — **238**. — P.382–400.
 45. *Tacconi-Garman L.E., Schloerb F.P., Claussen M.J.* High spectral resolution observations and kinematic modeling of the 1667 MHz hyperfine transition of OH in Comets Halley (1982i), Giacobini-Zinner (1984e), Hartley-Good (1985l), Thiele (1985m), and Wilson (1986i) // *Astrophys. J.* — 1990. — **364**. — P.672–686.
 46. *Gérard E.* The discrepancy between OH production rates deduced from radio and ultraviolet observations of comets. I. — A comparative study of OH radio and UV observations of P/Halley 1986 III in late November and early December 1985 // *Astron. Astrophys.* — 1990. — **230**. — P.489–503.
 47. *Combi M.R., Feldman P.D.* Water production rates in Comet P/Halley from IUE observations of HI Lyman-alpha // *Icarus*. — 1993. — **105**. — P.557–567.
 48. *Combi M.R., Feldman P.D.* IUE observations of H Lyman-alpha in Comet P/Giacobini-Zinner // *Icarus*. — 1992. — **97**. — P.260–268.
 49. *A'Hearn M.F., Schleicher D.G.* Comet P/Encke's non-gravitational force // *Astrophys. J. Lett.* — 1988. — **331**. — P.L47–L51.
 50. *Brooke, et al.* Detection of acetylene in the infrared spectrum of Comet Hyakutake // *Nature*. — 1996. — **383**. — P.606–608.
 51. *Mumma, et al.* A survey of organic volatile species in Comet C/1999 H1 (Lee) using NIRSPEC at the Keck Observatory // *Astrophys. J.* — 2001. — **546**. — P.1183–1193.
 52. *A'Hearn M.F., Schleicher D.G., West R.A.* Emission by OD in comets // *Astrophys. J.* — 1985. — **297**. — P.826–836.
 53. *Code A.D., Houck T.E., Lillie C.F.* Ultraviolet observations of comets / Scientific Results from the Orbiting Astronomical Observatory (OAO-2) (A.D.Code, ed.). NASA SP-310. — 1972. — P.109–114.
 54. *Bertaux J.L., Blamont J.E., Festou M.* Interpretation of hydrogen Lyman-alpha observations of Comets Bennett and Encke // *Astron.Astrophys.* — 1973. — **25**. — P.415–430.
 55. *Keller H.U.* The interpretations of ultraviolet observations of comets // *Space Sci. Rev.* — 1976. — **18**. — P.641–684.
 56. *Huppler D., Reynolds R.J., Roesler F.L., Scherb F., Trauger J.* Observations of comet Kohoutel (1973f) with a ground-based Fabry-Perot spectrometer // *Astrophys. J.* — 1975. — **202**. — P.276–282.
 57. *Scherb F.* Hydrogen production rates from ground-based Fabry-Perot observations of comet Kohoutek // *Astrophys. J.* — 1981. — **368**. — P.689–699.
 58. *Brown M.E., Spinrad H.* The velocity distribution of cometary hydrogen — Evidence for high velocities? // *Icarus*. — 1993. — **104**. — P.197–205.
 59. *Combi M.R., Cochran A.L., Cochran W.D., Lambert D.L., Johns-Krull C.M.* Observation and analysis of high-resolution optical line profiles in Comet Hyakutake (C/1996 B2) // *Astrophys. J.* — 1999. — **512**. — P.961–968.
 60. *Combi M.R., et al.* Hubble Space Telescope ultraviolet imaging and high-resolution spectroscopy of water photo-dissociation products in Comet Hyakutake (C/1996 B2) // *Astrophys. J.* — 1998. — **494**. — P.816–821.
 61. *Richter K., Combi M.R., Keller H.U., Meier R.R.* Multiple scattering of hydrogen Lyman-alpha radiation in the coma of Comet Hyakutake (C/1996 B2) // *Astrophys. J.* — 2000. — **531**. — P.599–611.
 62. *Festou M., Feldman P.D.* The forbidden oxygen lines in comets // *Astron. Astrophys.* — 1981. — **103**. — P.154–159.
 63. *Cochran W.D.* Detection of forbidden OI ¹S–¹D in comet IRAS-Araki-Alcock // *Icarus*. — 1984. — **58**. — P.440–445.
 64. *Morisson N.D., Knauth D.C., Mulliss C.L., Lee W.* High-resolution optical spectra of the head of the Comet C/1996 B2 (Hyakutake) // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1997. — **109**. — P.676–681.

65. *Smith W.H., Schempp W.V.* [OI] in Comet Halley // *Icarus*. — 1989. — **82**. — P. 61–66.
66. *Cochran A.L., Cochran W.D.* Observations of O(¹S) and O(¹D) in spectra of C/1999 S4 (ЛІНЕАР) // *Icarus*. — 2001. — **154**. — P. 381–390.
67. *Storey P.J., Zeippen C.J.* Theoretical values for the [OIII] 5007/4959 line-intensity ratio and homologous cases // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2000. — **312**. — P. 813–816.
68. *Magee-Sauer K., Roesler F.L., Scherb F., Harlander J., Oliverson R.J.* Spatial distribution of O(¹D) from Comet Halley // *Icarus*. — 1988. — **76**. — P. 89–99.
69. *Combi M.R., McCrosky R.E.* High-resolution spectra of the 6300 Å region of Comet P/Halley // *Icarus*. — 1991. — **91**. — P. 270–279.
70. *Jockers K., et al.* Water production of comets derived from observations of [OI] (6300 Å) and H₂O⁺ (6150 Å): comets C/1998 U5 (ЛІНЕАР) and C/1999 J3 (ЛІНЕАР) // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel, Suppl.* — 2000. — № 3. — P. 261–265.
71. *Spinrad H.* Observations of the red auroral oxygen lines in nine comets // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1982. — **94**. — P. 1008–1016.
72. *Fink U., Hicks M.D.* A survey of 39 comets using CCD spectroscopy // *Astrophys. J.* — 1996. — **459**. — P. 729–743.
73. *Arpigny, et al.* Resolution of the [OI]+NH₂ blend in Comet P/Halley // *Astron.Astrophys.* — 1987. — **187**. — P. 485–488.
74. *Huebner W.F., Keady J.J., Lyon S.P., eds.* Solar Photo Rates for Planetary Atmospheres and Atmospheric Pollutants. — Kluwer, Dordrecht. — 1992. — 292 p.
75. *Levin B.J.* On the reported Na tails of comets // *Icarus* — 1964. — **3**. — P. 497–498.
76. *Newall H.F.* On the spectrum of the daylight comet 1910a // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1910. — **70**. — P. 459–461.
77. *Brown R.A., Chaffee F.H.* High-resolution spectra of sodium emission from Io // *Astrophys.J.Lett.* — 1974. — **187**. — P. L125–L126.
78. *Potter A., Morgan T.* Discovery of sodium in the atmosphere of Mercury // *Science* — 1985. — **229**. — P. 651–653.
79. *Potter A., Morgan T.* Discovery of sodium and potassium vapor in the atmosphere of the Moon // *Science*. — 1988. — **241**. — P. 675–680.
80. *Барановський Э.А., Таращук В.П.* Фотонное возбуждение свечения натрия в кометах // *Письма в АЖ*. — 2004. — **30**, № 11. — С.874.
81. *Bappu M.K.V., Sivaraman K.R.* Some characteristics of the solar wind inferred from the study of sodium emission from cometary nuclei // *Sol.Phys.* — 1969. — **10**. — P. 496–501.
82. *Preston G.W.* The spectrum of Ikeya-Seki (1965f) // *Astrophys. J.* — 1967. — **147**. — P. 718–742.
83. *Spinrad H., Miner E.D.* Sodium velocity fields in Comet 1965f // *Astrophys. J.* — 1968. — **153**. — P. 355–366.
84. *Huebner W.F.* Dust from cometary nuclei // *Astron.Astrophys.* — 1970. — **5**. — P. 286–297.
85. *Slaughter C.D.* The emission spectrum of Comet Ikeya-Seki 1965f at perihelion passage // *Astrophys. J.* — 1969. — **74**. — P. 929–943.
86. *Combi M.R., Fink U.* A critical study of molecular photodissociation and CHON grain sources for cometary C₂ // *Astrophys. J.* — 1997. — **484**. — P. 879–890.
87. *Delsemme A.H., Combi M.R.* Neutral cometary atmospheres. IV. — Brightness profiles in the inner coma of comet Kohoutek 1973 XII // *Astrophys. J.* — 1983. — **271**. — P. 388–397.
88. *Oppenheimer M.* Sodium D-line emission in Comet West (1975n) and the sodium source in comets // *Astrophys. J.* — 1980. — **240**. — P. 923–928.
89. *Combi M.R., DiSanti M.A., Fink U.* The spatial distribution of gaseous atomic sodium in the comae of comets: Evidence for direct nucleus and extended plasma sources // *Icarus*. — 1997. — **130**. — P. 336–354.
90. *Cremonese G., et al.* Neutral sodium from Comet Hale-Bopp: A third type of tail // *Astrophys. J.Lett.* — 1997. — **409**. — P. L199–L202.
91. *Wilson J.K., Baumgardner J., Mendillo M.* Three tails of comets Hale-Bopp // *Geophys. Res. Lett.* — 1998. — **25**. — P. 225–228.
92. *Brown M.E., Bouchez A.H., Spinrad H., Misch A.* Sodium velocities and sources in Hale-Bopp // *Icarus* — 1998. — **134**. — P. 228–234.
93. *Rauer H., Arpigny C., Manfroid J., Cremonese G., Lemme C.* The spatial sodium distribution in the coma of comet Hale-Bopp (C/1995 O1) // *Astron.Astrophys.* — 1998. — **334**. — P. L61–L64.
94. *Jessberger E.K., Kissel J.* Chemical properties of cometary dust and a note on carbon isotopes / *Comets in the Post-Halley Era* (R.Newburn, et al., eds) — IAU Colloquium No 116, ASSL — Kluwer, Dordrecht. — 1991. — **167**. — P. 1075–1092.
95. *Wright M.C.H., et al.* Mosaicked images and spectra of J = 1 > 0 HCN and HCO⁺ emission from Comet Hale-Bopp (1995 O1) // *Astrophys. J.* — 1998. — **116**. — P. 3018–3028.
96. *Lis D.C., et al.* New molecular species in Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) observed with the Catech Submillimeter Observatory // *Earth Moon Planets* — 1999. — **78**. — P. 13–20.
97. *Umbach R., Jockers K., Geyer E.H.* Spatial distribution of neutral and ionic constituents in comet P/Halley //

- Astron.Astrophys. — 1998. — **127**. — P.479–495.
98. *Jackson W.M., Donn B.* Photochemical effects in the production of cometary radicals and ions // *Icarus* — 1968. — **8**. — P.270–280.
 99. *Cochran A.L., Cochran W.D.* The first detection of CN and the distribution of CO⁺ gas in the coma of Comet P/Schwassmann-Wachmann 1 // *Icarus* — 1991. — **90**. — P.172–175.
 100. *Magnani L., A'Hearn M.F.* CO⁺ fluorescence in comets // *Astrophys. J.* — 1986. — **302**. — P.477–489.
 101. *Herzberg G., Lew H.* Tentative identification of the H₂O⁺ ion in Comet Kohoutek // *Astron.Astrophys.* — 1974. — **31**. — P.123–124.
 102. *Wegmann R., Jockers K., Bonev T.* H₂O⁺ ions in comets: Models and observations // *Planet.Space Sci.* — 1999. — **47**. — P.745–763.
 103. *Lutz B.L., Womack M., Wagner R.M.* Ion abundances and implications for photochemistry in Comets Halley (1986 III) and Bradfield (1987 XXIX) // *Astrophys. J.* — 1993. — **407**. — P.402–411.
 104. *Arpigny C.* Physical chemistry of comets: Models, uncertainties, data needs / *Molecules and Grains in Space* (I.Nenner, ed.) — AIP Conference Proceedings 312. — 1994. — P.205–238.
 105. *Lew H.* Electronic spectrum of H₂O⁺ // *Can. J. Phys.* — 1976. — **54**. — P.2028–2049.
 106. *Bonev T., Jockers K.* H₂O⁺ ions in the inner plasma tail of Comet Austin 1990 V // *Icarus* — 1994. — **107**. — P.335–357.
 107. *Swings P., Page T.* The spectrum of Comet Bester (1947k) // *Astrophys. J.* — 1950. — **111**. — P.530–554.
 108. *Feldman P.D., Brune W.H.* Carbon production in comet West 1975n // *Astrophys. J.Lett.* — 1976. — **209**. — P.L45–L48.
 109. *Festou M.C., Feldman P.D., Weaver H.A.* The ultraviolet bands of the CO₂⁺ ion in comets // *Astrophys. J.* — 1982. — **256**. — P.331–338.
 110. *Feldman P.D., Weaver H.A., A'Hearn M.F., Festou M.C., McFadden L.A.* Is CO₂ responsible for the outburst of comet Halley? // *Nature* — 1986. — **324**. — P.433–436.
 111. *Leach S.* Electronic spectroscopy and relaxation of some molecular cations of cometary interest // *Astron.Astrophys.* — 1987. — **187**. — P.195–200.
 112. *Fox J.L., Dalgarno A.* Ionization, luminosity, and heating of the upper atmosphere of Mars // *J.Geophys.Res.* — 1979. — **84**. — P.7315–7333.
 113. *Marconi M.L., et al.* The identification of H₃S⁺ with the ion of mass per charge (m/q) 35 observed in the coma of Comet Halley // *Astrophys. J. Lett.* — 1990. — **352**. — P.L17–L20.
 114. *Eberhardt P., Krankowsky D.* The electron temperature in the inner coma of comet P/Halley // *Astron. Astrophys.* — 1995. — **295**. — P.795–806.
 115. *Cochran A.L., Cochran W.D., Barker E.S.* N₂⁺ and CO⁺ in Comets 122P/1995 S1 (de Vico) and C/1995 O1 (Hale-Bopp) // *Icarus* — 2000. — **146**. — P.583–593.
 116. *Cochran A.L.* A search for N₂⁺ in spectra of Comet C/2002 C1 (Ikea-Jang) // *Astrophys. J. Lett.* — 2002. — **576**. — P.L165–L168.
 117. *Iro N., Gautier D., Hersant F., Bockelee-Morvan D., Lunine J.I.* An interpretation of the nitrogen deficiency in comets // *Icarus* — 2003. — **161**. — P.511–532.

Надійшла до редакції 24.10.2011