Отношение сигнал/шум в астрофизических наблюдениях

Лекция 7

Отношение сигнал/шум в фотометрических наблюдениях. Связь потока, звёздной величины и фотометрической погрешности

КазНУ имени аль-Фараби

Цель и план лекции

Цель

Изучение методов апертурной и PSF-фотометрии, установление связи между потоком, звёздной величиной и погрешностью, а также определение оптимальных параметров фотометрии.

1. Введение
2. Звёздные величины
3. Апертурная фотометрия
4. PSF-фотометрия и оптимальные методы
5. Дифференциальная фотометрия
6. Кривая зависимости погрешности от блеска
7. Фотометрическая стандартизация
8. Источники погрешностей высокоточной фотометрии

1 Введение

- Фотометрия – измерение потока излучения объекта в определённой полосе длин волн.

2 Звёздные величины

- Звёздная величина связана с потоком F соотношением Погсона:

$$m = -2{,}5\,\lg(F) + ZP,$$

- где ZP – нуль-пункт. Разность 5^m соответствует отношению потоков 100.

$$m_{AB} = -2{,}5\,\lg f_\nu - 48{,}60,$$

- при f_ν в единицах эрг·с$^{-1}$·см$^{-2}$·Гц$^{-1}$.
- Погрешность величины выражается приближённо через S/N:

$$\sigma_m \approx 1{,}0857 / (S/N).$$

2 Звёздные величины (продолжение)

- Коэффициент 1,0857 = 2,5/ln 10. Следовательно, S/N = 100 соответствует $0{,}011^{m}$, а S/N = 10 – примерно $0{,}11^{m}$.

3 Апертурная фотометрия

- Поток измеряется суммированием значений пикселей внутри круговой апертуры с вычитанием фона, полученного по кольцу.

$$m_{\infty} = m_{ap} + \Delta m.$$

- Для ярких источников, у которых основным является фотонный шум, выгоднее большие апертуры, которые уменьшают зависимость результата от изменения формы PSF и неточности центра.

3 Оптимальный радиус апертуры для слабого источника

Листинг 7.1.

```
import numpy as np

sig, F, B = 2.0, 1000.0, 200.0        # PSF, поток, фон+шум на пиксель
n = 201
y, x = (np.indices((n, n)) - n // 2) / 5
r = np.hypot(x, y)
psf = np.exp(-r**2 / (2 * sig**2))
psf /= psf.sum()
pix_area = (1 / 5)**2

radii = np.arange(0.5, 10.01, 0.05)
snr = []
for R in radii:
    m = r <= R
    Fa = F * psf[m].sum()
    snr.append(Fa / np.sqrt(Fa + m.sum() * pix_area * B))
snr = np.array(snr)
k = snr.argmax()
print(f"Оптимальный радиус: {radii[k]:.2f} пкс = {radii[k] / sig:.2f} sigma"
      f" = {radii[k] / (2.355 * sig):.2f} FWHM")
print(f"S/N в оптимуме: {snr[k]:.2f}")
print(f"Доля потока в апертуре: {psf[r <= radii[k]].sum():.3f}")
print(f"S/N при R = 10 пкс: {snr[-1]:.2f}")
```

3 Результат: Оптимальный радиус апертуры для слабого источника

```
Оптимальный радиус: 3.30 пкс = 1.65 sigma = 0.70 FWHM
S/N в оптимуме: 8.54
Доля потока в апертуре: 0.746
S/N при R = 10 пкс: 3.96
```

4 PSF-фотометрия и оптимальные методы

- В плотных полях апертуры соседних звёзд перекрываются, поэтому применяется подгонка модели функции рассеяния точки (PSF), например с помощью DAOPHOT. Поток определяется подгонкой, а модель PSF строится по изолированным звёздам.

$$n_{eff} = 1 / \Sigma P_i^2,$$

- которое для гауссовой PSF равно $4\pi\sigma^2$. Значение S/N для фонового ограничения равно $F/\sqrt{(n_{eff} \cdot b)}$.

5 Дифференциальная фотометрия

- Абсолютная фотометрия требует стандартизации и фотометрической ночи. В дифференциальной фотометрии величина объекта сравнивается с одной или несколькими звёздами сравнения того же поля, что существенно компенсирует изменения прозрачности и экстинкции.

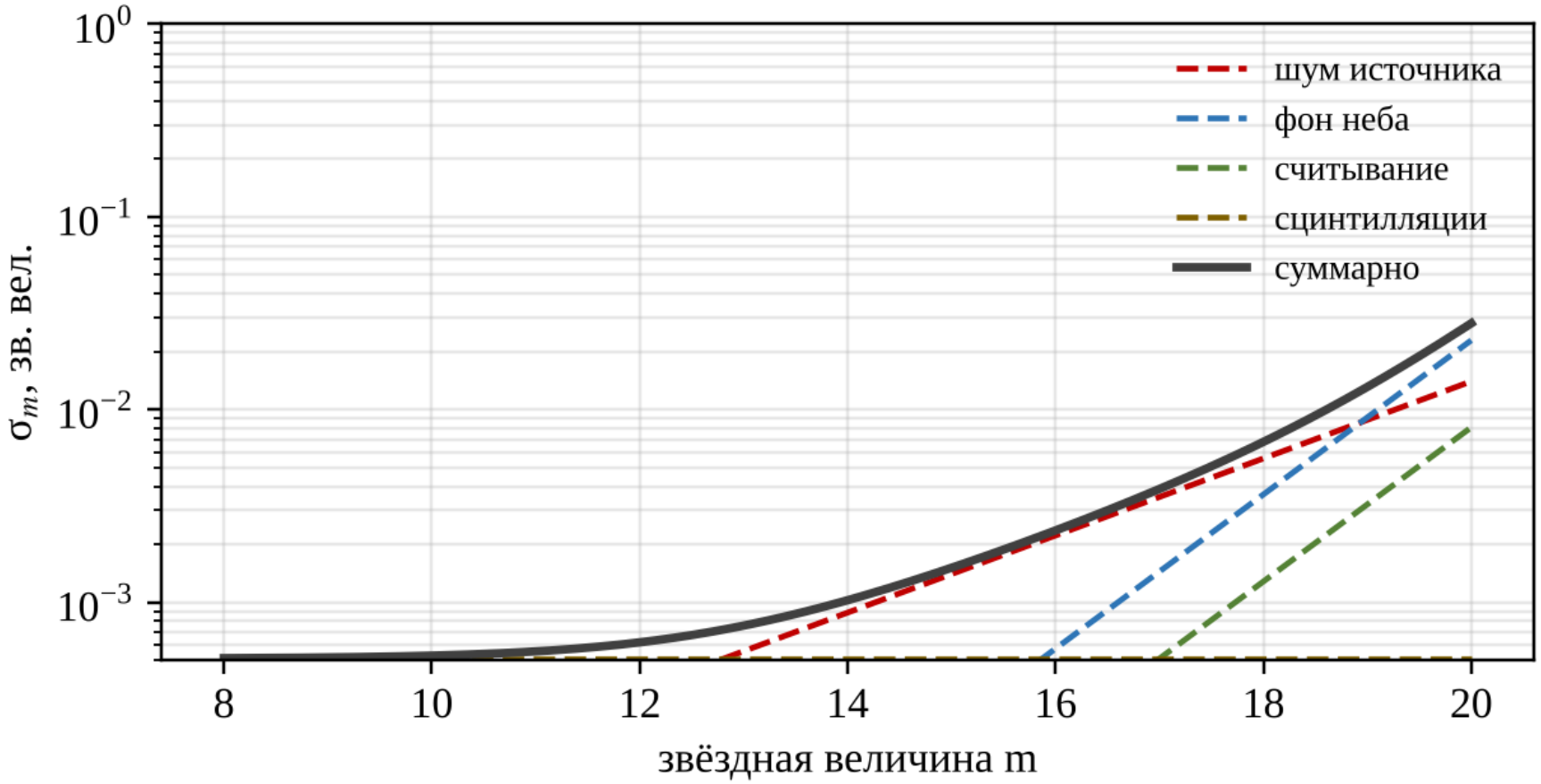
$$\sigma_{dif}^{2} = \sigma_{obj}^{2} + \sigma_{ref}^{2}.$$

- Поэтому объединение нескольких звёзд сравнения уменьшает второе слагаемое. Опорный поток формируют как взвешенную сумму, а выбирают только звёзды с постоянным блеском.

6 Кривая зависимости погрешности от блеска

- Для ярких звёзд погрешность ограничена сцинтилляциями или систематикой, в средней области определяется шумом источника, а для слабых – фоном и считыванием.

6 Кривая зависимости погрешности от блеска (продолжение)



Зависимость фотометрической погрешности от звёздной величины (модель)

6 Кривая зависимости погрешности от блеска (продолжение)

- Сравнение измеренного разброса с ожидаемым является важной проверкой данных.

6 Погрешность звёздной величины в зависимости от блеска

Листинг 7.2.

```
ZP, t, npix, sky, RN = 25.0, 60.0, 80, 200.0, 5.0

print(" m     N*, e-      S/N     sigma_m")
for m in (12, 14, 16, 18, 20):
    N = 10**(-0.4 * (m - ZP)) * t
    s = N / np.sqrt(N + npix * (sky + RN**2))
    print(f"{m:3} {N:12.0f} {s:8.1f} {1.0857 / s:10.4f}")
```

```
 m     N*, e-      S/N     sigma_m
 12      9509359   3080.8     0.0004
 14      1507132   1220.4     0.0009
 16       238864    471.3     0.0023
 18        37857    160.2     0.0068
 20         6000     38.7     0.0280
```

7 Фотометрическая стандартизация

- Для перевода инструментальных величин в стандартную систему используются стандартные звёзды, в частности из каталогов Ландольта, Gaia или SDSS. Преобразование обычно записывается как:

$$m_{std} = m_{inst} + ZP - kX + c(B - V).$$

- Коэффициент цвета c учитывает различие между полосой инструмента и стандартной.

8 Источники погрешностей высокоточной фотометрии

- Когда требуемая точность составляет доли процента, становятся существенными эффекты, которые обычно не рассматриваются.
- Эффект перекрытия (blending) происходит, когда в апертуру попадают соседние звёзды.
- Отдельного рассмотрения требует фотометрия протяжённых объектов. Для галактик применяются петросяновские величины и величины Крона, а также подгонка двумерных профилей.
- Цветовые показатели особенно чувствительны к систематическим ошибкам, поэтому для них используют одну и ту же апертуру и согласуют PSF в разных фильтрах.

8 Источники погрешностей высокоточной фотометрии (продолжение)

- Практическое упражнение: для вашей серии наблюдений постройте зависимость среднеквадратичного разброса от блеска и наложите расчётную кривую.

9 Разбор примера

1. Пусть за 60 с накоплено $N_* = 10^5$ e^- от звезды.

2. Значение фона вместе с шумом считывания составляет 225 e^2 на пиксель, а апертура содержит 80 пикселей.

3. Суммарная дисперсия равна 100000 + 18000 = 118000.

4. Значит, $\sigma \approx 343{,}5$, $S/N \approx 291$, $\sigma_m \approx 0{,}0037^m$.

5. Если 3 звезды сравнения одинаковой яркости усреднены, вклад опорного сигнала уменьшается в 3 раза по дисперсии, поэтому коэффициент увеличения шума равен $\sqrt{(1 + 1/3)} \approx 1{,}15$ вместо 1,41 для одной звезды.

10 Вопросы для обсуждения на занятии

Метод

Когда лучше применять апертурную, а когда PSF-фотометрию?

Сравнение

Какие требования предъявляются к звёздам сравнения?

Точность

Как определить, какие факторы ограничивают точность вашей фотометрической серии?

Контрольные вопросы

1. Запишите формулу Погсона и определение системы AB.
2. Как погрешность звёздной величины связана с S/N?
3. Какие проблемы возникают при S/N менее 5?
4. Как определяется оптимальный радиус апертуры?
5. Что такое поправка на апертуру?
6. Какие достоинства и недостатки имеет PSF-фотометрия?
7. Как шум звёзд сравнения влияет на дифференциальную фотометрию?
8. Как проводится фотометрическая стандартизация?

Список литературы

1. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
2. Lupton R.H., Gunn J.E., Szalay A.S. A modified magnitude system that produces well-behaved magnitudes, colors, and errors even for low signal-to-noise ratio measurements // The Astronomical Journal. – 1999. – Vol. 118. – P. 1406–1410.
3. Stetson P.B. DAOPHOT: A computer program for crowded-field stellar photometry // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1987. – Vol. 99. – P. 191–222.
4. Naylor T. An optimal extraction algorithm for imaging photometry // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1998. – Vol. 296. – P. 339–346.
5. Merline W.J., Howell S.B. A realistic model for point-sources imaged on array detectors: The model and initial results // Experimental Astronomy. – 1995. – Vol. 6. – P. 163–210.