

Физические основы регистрации излучения

Емельянов Эдуард Владимирович

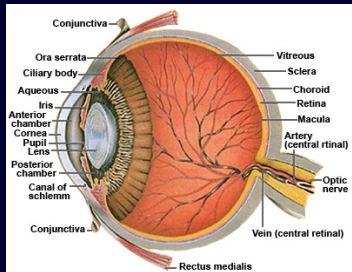
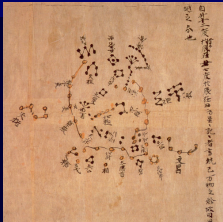
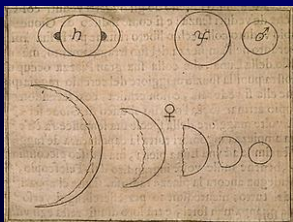
Специальная астрофизическая обсерватория РАН
Лаборатория физики оптических транзиентов

8 апреля 2022 года



- 1 Человеческий глаз
- 2 Типы детекторов и диапазоны
- 3 Характеристики детекторов
- 4 Аналоговая регистрация и счет фотонов
- 5 Многоканальные светоприемники
- 6 Примеры детекторов

Человеческий глаз



Глаз

- Маленькая апертура (≤ 8 мм)
- Низкая чувствительность
- Низкое угловое разрешение ($> 16''$, чаще $1'$)
- Узкий спектральный диапазон
- Невозможность накопления сигнала
- Малое поле ясного зрения
- Цветочувствительность только при больших интенсивностях

Observations January 1910

20. 1st. 1/2	0 * *
30. 1st. 1/2	* * 0 *
2. 2nd.	0 * * *
3. 1st.	0 * *
3. 1st. 1/2	* 0 *
4. 1st.	* 0 * *
6. 1st.	* * 0 *
8. 1st. 1/2.	* * * 0
10. 1st.	* * * 0 *
11.	* * 0 *
12. H. & 1/2.	* 0 *
13. 1st.	* * 0 *
14. 1st.	* * 0 *

Диапазон: $400 \div 750$ нм (низкая чувствительность в УФ из-за материала хрусталика, защищающего сетчатку).

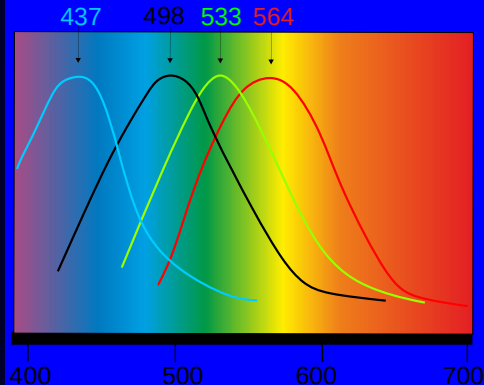
Высококочувствительные палочки и менее чувствительные колбочки.

$100 \div 200$ фотонов ($\lambda = 510 \div 525$ нм) в секунду для палочек!

Дальтонизм — схожесть или отсутствие светочувствительных белков.

Трёхсоставную теорию цветового зрения впервые высказал в 1756 году М.В. Ломоносов. Параллельно существовала оппонентная теория цвета Эвальда Геринга (ее развили Дэвид Хьюбел и Торстен Визел — нобелевская премия 1981 г): в мозг поступает информация о разнице яркости (white-black, G-R, B-Y, $Y=R+G$). У некоторых женщин — тетрахроматизм.

Бинокулярное зрение — оценка расстояния и размеров.



Анатомия глаза

Cornea – роговица, первая «линза».

Pupil – зрачок, диафрагма (iris).

Lens – хрусталик, вторая «линза».

Ciliary body – цилиарное тело.

Vitreous body – стекловидное тело, третья «линза».

Choroid – сосудистая оболочка.

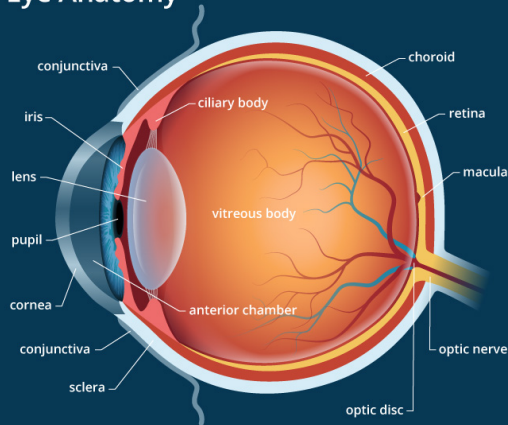
Retina – сетчатка.

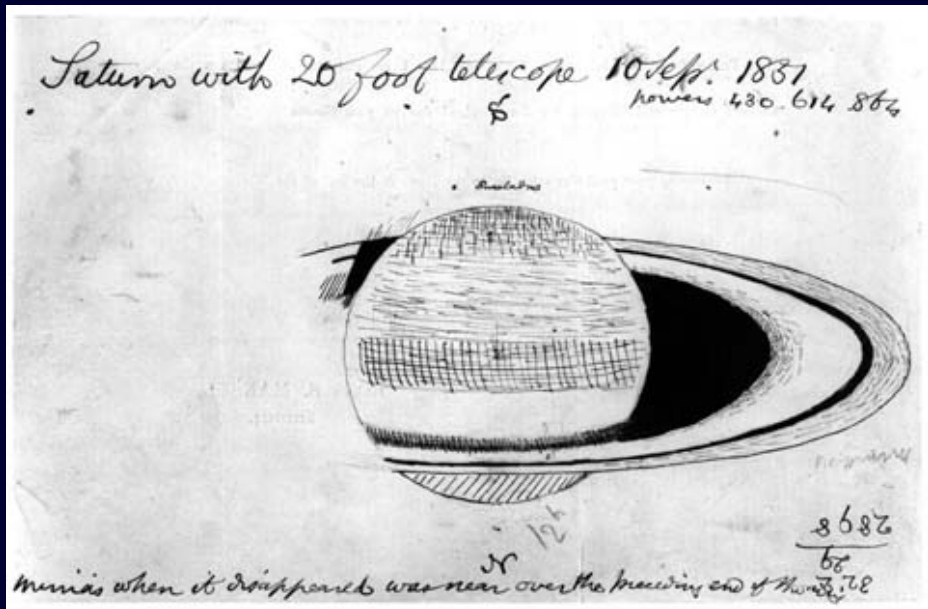
Macula – центральная ямка.

6 ÷ 7 млн колбочек, ~ 120 млн палочек.

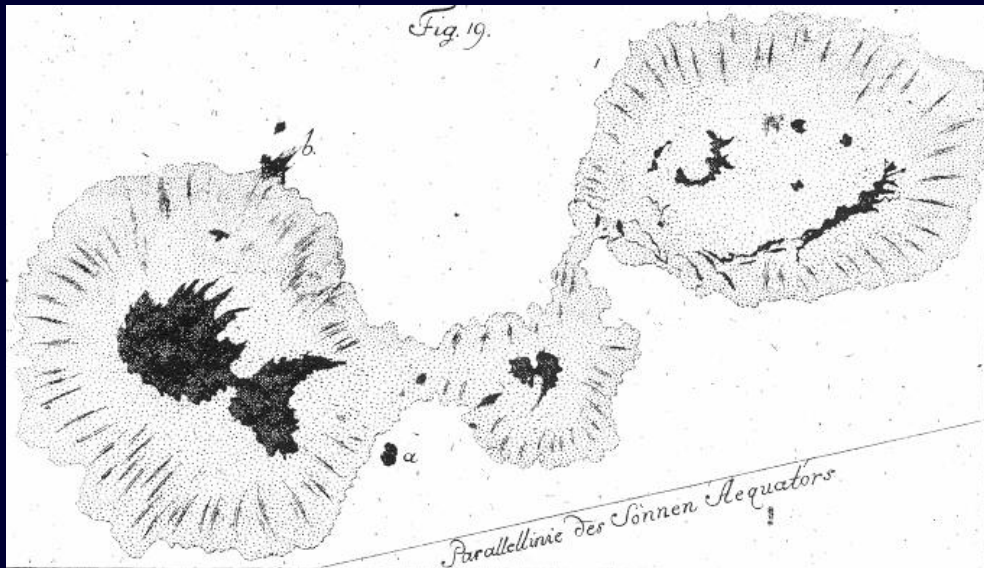
Мозг «переворачивает» и «дорисовывает» изображение.

Eye Anatomy

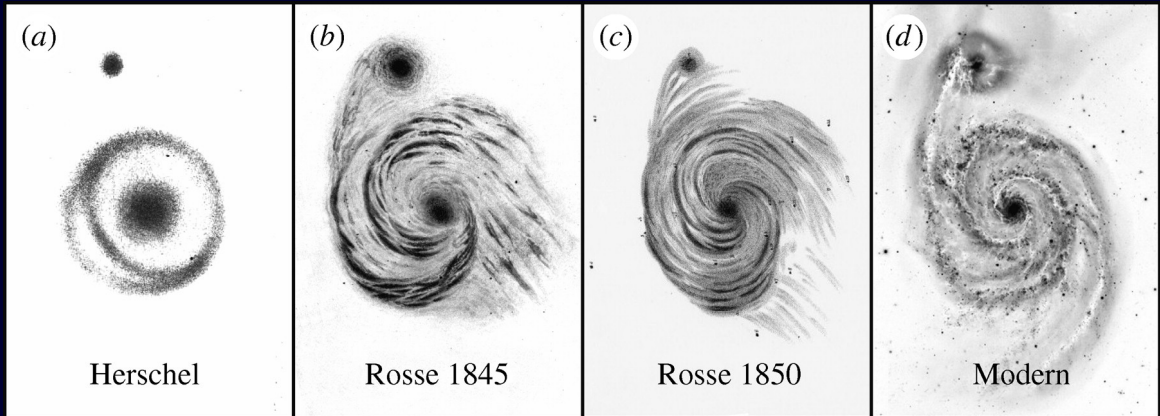




Зарисовка Сатурна Уильямом Ласселом (1799–1880).



Солнечные пятна (1785–1795). Hieronymus Schroeter (1745–1816).



Зарисовки М51: а) Джон Гершель, 1833; б) и с) Уильям Парсонс (третий граф Росс); д) современное изображение (Canada-France-Hawaii Telescope).

Диапазоны длин волн

Регистрируемые формы энергии

- Электромагнитное излучение (от гамма– до радиоволн).
- Космические лучи (субатомные заряженные частицы высоких энергий).
- Нейтрино.
- Гравитационные волны.

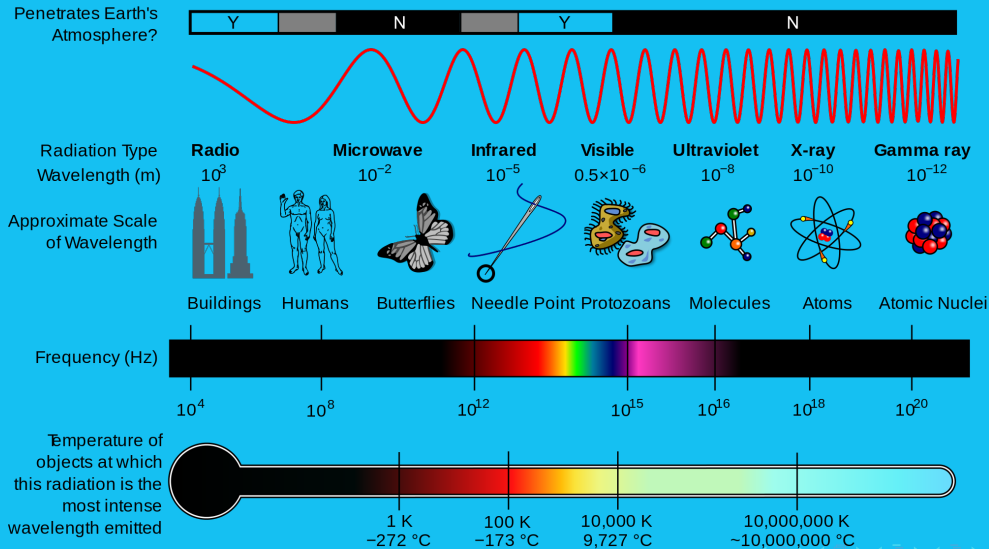
Детектирование

- События (фотоны, частицы) — детекторы частиц, счетчики фотонов
- Создаваемое тепло — болометры
- Волновые характеристики — радиометры

Измеряемые параметры

- Направление и время прибытия излучения.
- Интенсивность на разных длинах волн.
- Степень поляризации излучения.
- Фазовые сдвиги между волнами.

Электромагнитный спектр

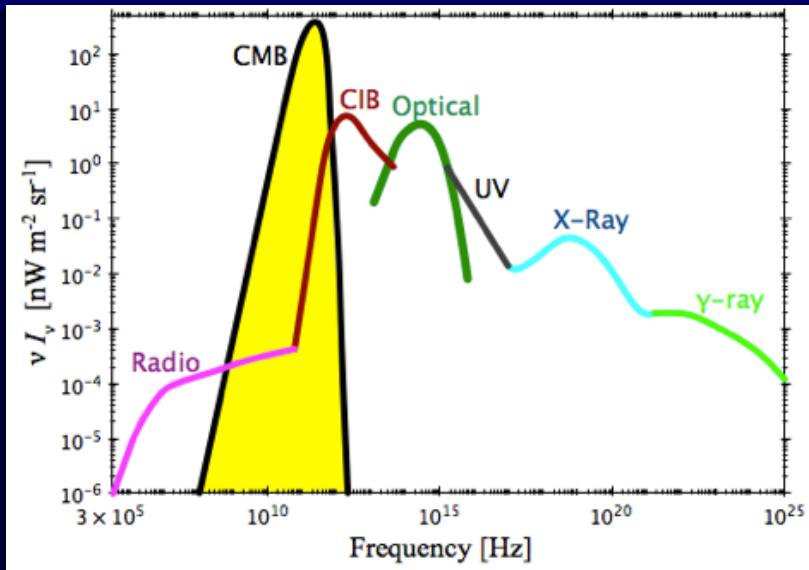


Источники излучения

Диапазон	λ , нм	T , К	Тепловые источники	Нетепловые
Гамма	< 0.01	$> 10^8$	Термоядерный синтез	ppl, IC, DR
Рентген	0.01–20	10^6 – 10^8	Газ в скоплениях галактик, остатки сверхновых, солнечная корона	IC, SR
УФ	20–400	10^5 – 10^6	Остатки сверхновых, горячие звезды	SR
Видимый	400–700	10^4 – 10^5	Звездные атмосферы, оболочки	SR
ИК	700– 10^6	10 – 10^3	Холодные облака газа и пыли, планеты, спутники	SR
Радио	$> 10^6$	< 10	Темные пылевые облака	SR

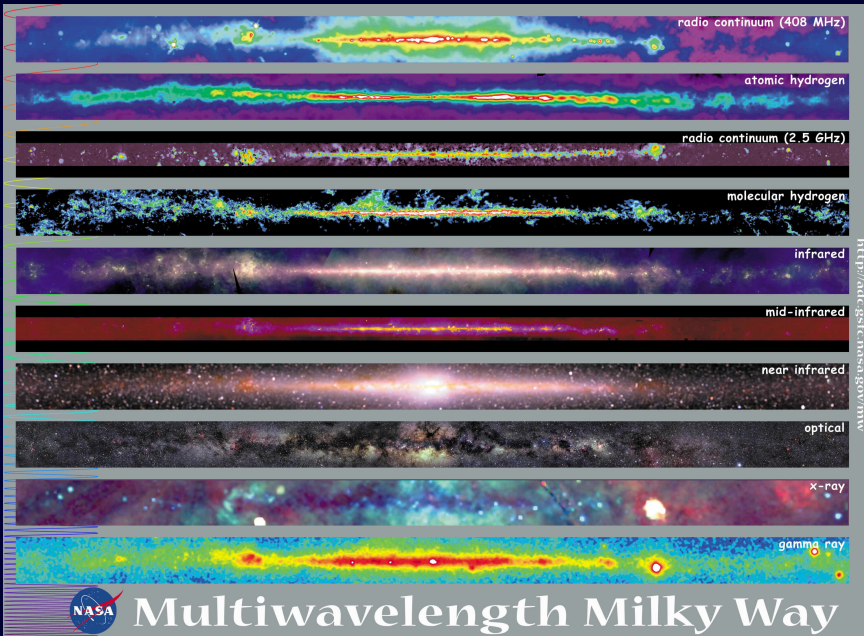
ppl – протон-протонные столкновения, IC – обратное комптоновское рассеяние, DR – тормозное излучение, SR – синхротронное излучение.

Всеволновой космос

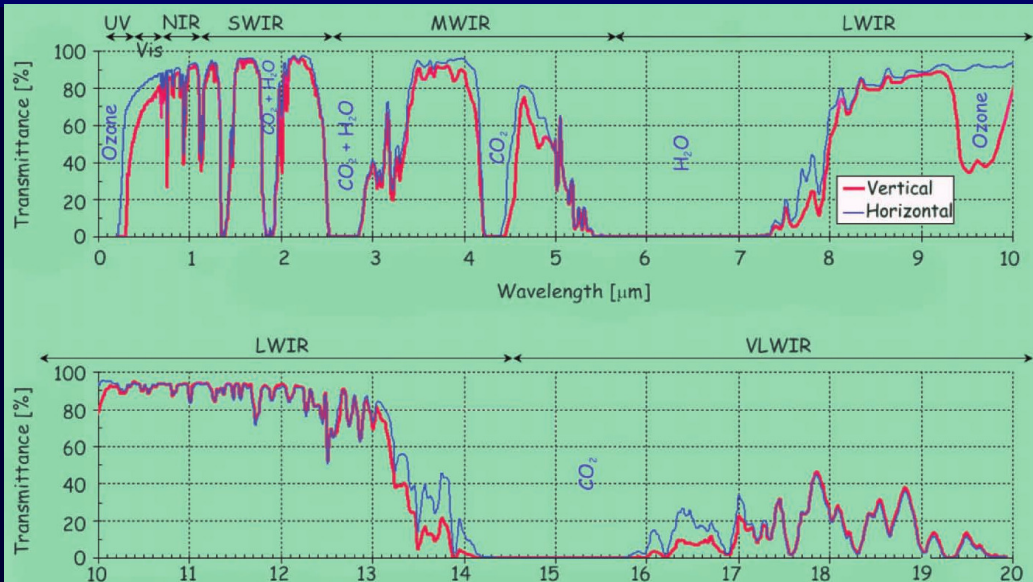


Всеволновой космос



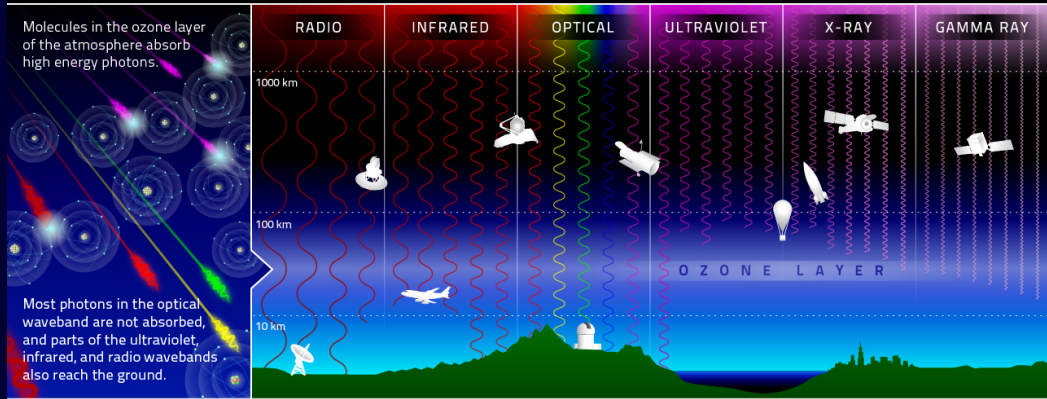


Атмосферное пропускание



Атмосферное пропускание

MULTIWAVELENGTH LAND & SPACE BASED OBSERVATORIES



The atmospheric effects on incoming light in each waveband determines the placement of telescopes.



Most of the Radio waveband is detectable using large dish antennae on the ground.



The infrared waveband can be detected from airplanes.



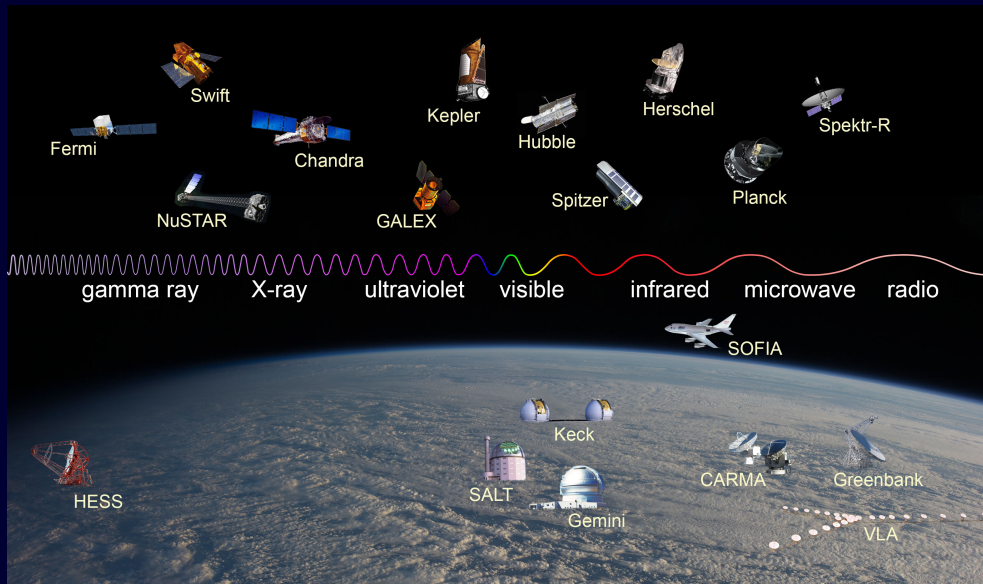
Ground telescopes observe most optical light, and some infrared and ultraviolet.



Balloons and rockets are used to test out new telescope technologies.



Space telescopes avoid atmospheric distortions and access high energy radiation.



Инфракрасный диапазон

1800 — открытие ИК излучения Уильямом Гершелем.

1838 — измерение солнечной постоянной Клодом Пулье (1.23 кВт/м^2 , современное значение 1.367 кВт/м^2).

1880 — болометр Лэнгли. 1875 — радиометр Крукса.

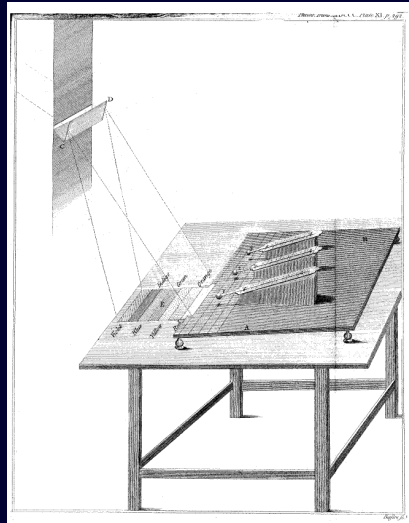
Термопары.

1957 — открытие свойств HgCdTe .

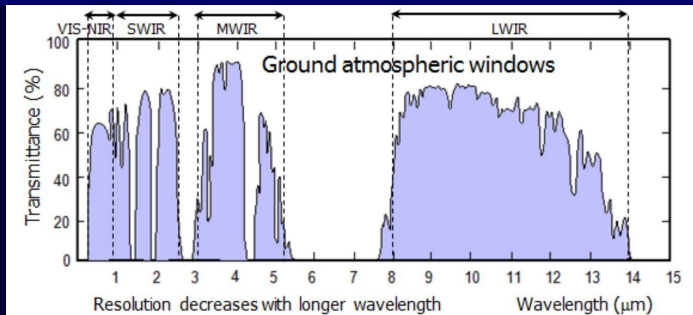
1962 — фотометрическая система Джонсона, измерения фотоэлектрическими ячейками на PbS и InSb .

1970 — IR CCD, матрицы диодов Шоттки.

2000е — различные виды FPA. ...



Инфракрасный диапазон



Диапазоны

- $0.75 \div 1.4$ мкм — ближний ИК, ПЗС;
- $1.4 \div 3$ мкм — коротковолновый ИК, HgCdTe (до 2.54 мкм), InSb (до 5.4 мкм);
- $3 \div 8$ мкм — средний ИК, Si:As ($5 \div 28$ мкм);
- $8 \div 15$ мкм — длинноволновый ИК, Si:As;
- $15 \div 1000$ мкм — дальний ИК и субмиллиметровый диапазон.

Инфракрасный диапазон

λ , мкм	Полоса	Прозрачность неба	Яркость неба
1.1–1.4	J	высокая	низкая
1.5–1.8	H	высокая	очень низкая
2.0–2.4	K	высокая	очень низкая
3.0–4.0	L	достаточно высокая	низкая
4.6–5.0	M	низкая	высокая
7.5–14.5	N	низкая (кроме 8–9 и 10–12 мкм, где средняя)	очень высокая
17–25	Q	очень низкая	очень высокая
28–40	Z	очень низкая	очень высокая
330–370		очень низкая	низкая

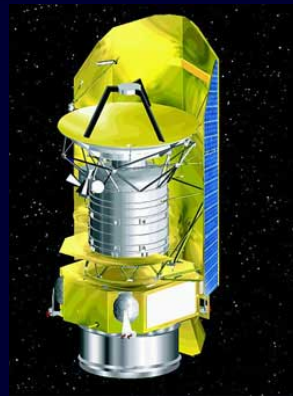
Инфракрасный диапазон

Телескопы

Наземные: **VISTA** (4.1 м), **UKIRT** (3.8 м), **IRTF** (3 м), и др.

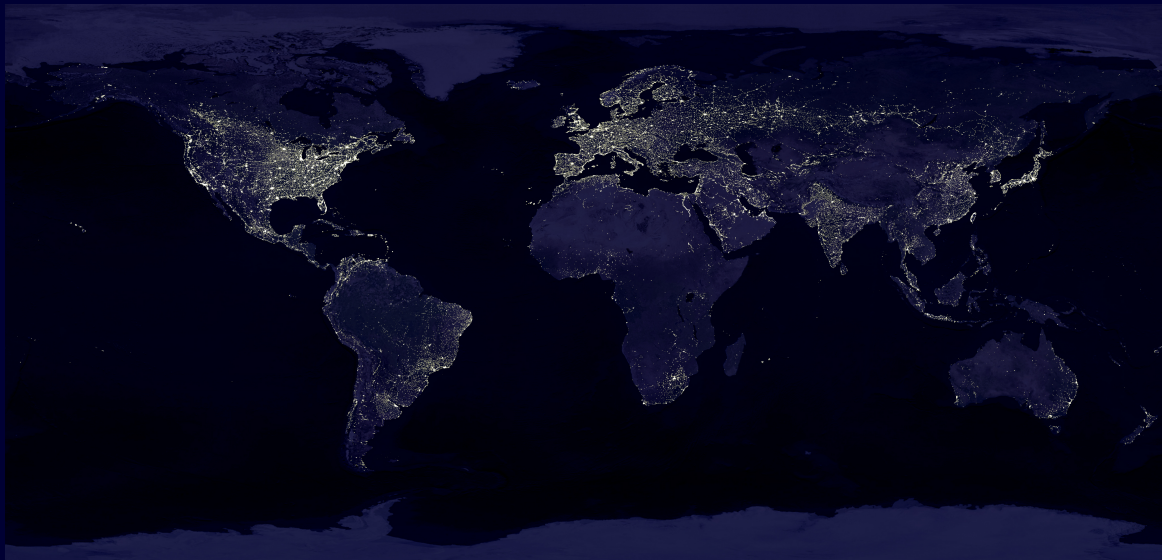
На борту самолета: **SOFIA** (2.5 м).

Космические: **JWST** (6.5 м), **Herschel** (3.5 м), **Spitzer** (0.85 м) и др.

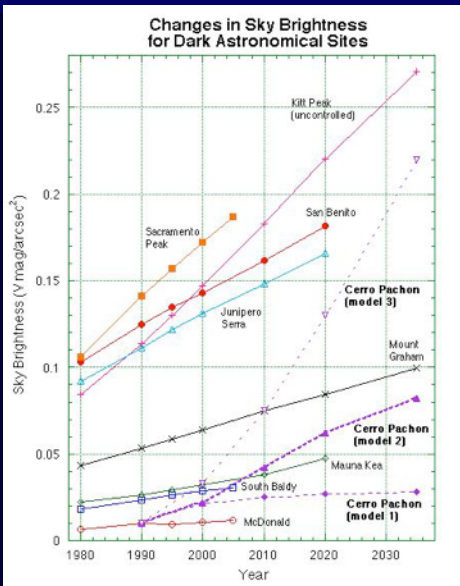


Оптический диапазон

Световое загрязнение



Оптический диапазон



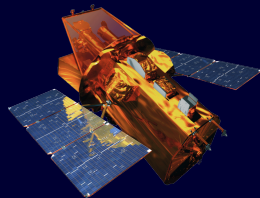
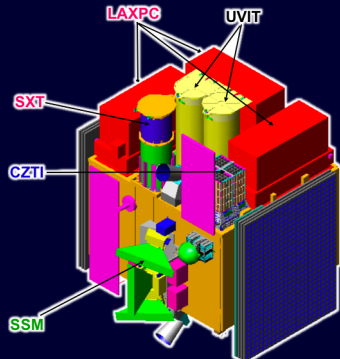
Оптический диапазон

Расположение



Ультрафиолетовый диапазон

Только космические телескопы: UVIT на Astrosat (40 см), HST (2.4 м), UVOT на SWIFT (30 см) и многие другие.



Характеристики детекторов

Размер, количество пикселей (каналов), чувствительность в зависимости от длины волны (квантовая эффективность) и доступный спектральный диапазон, динамический диапазон, линейность, накопление сигнала, временное разрешение, шумовые характеристики, стабильность, цена.

Эволюция детекторов

Историческая эволюция: глаз $\Rightarrow$ фотопластинка $\Rightarrow$ одноканальные фотоэлектрические приемники $\Rightarrow$ сканеры фотопластинок $\Rightarrow$ телевизионные сканеры $\Rightarrow$ полупроводниковые устройства (фотодиоды, ПЗС, композитные ИК приемники, болометры, лавинные фотодиоды, КМОП) $\Rightarrow$ устройства, измеряющие энергию фотона (STJ — на сверхпроводящих туннельных переходах, transition-edge sensor — повышение сопротивления свехпроводящего перехода).

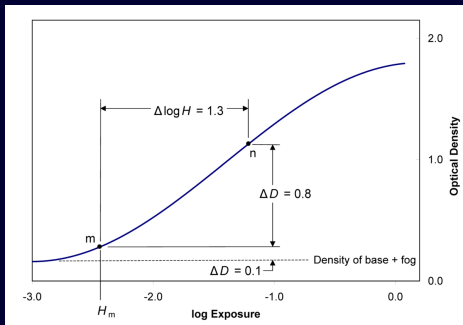
Фотографические пластинки

1826, Нисефор Ньепс, гелиография (полимеризация битума).



Фотографические пластинки

- Большой формат
- Очень низкая эффективность ($< 1\%$)
- Сложность перевода в цифровую форму
- Нелинейность, сложность калибровки



Andrew Ainslie Common, 1883 г. —
туманность Ориона.

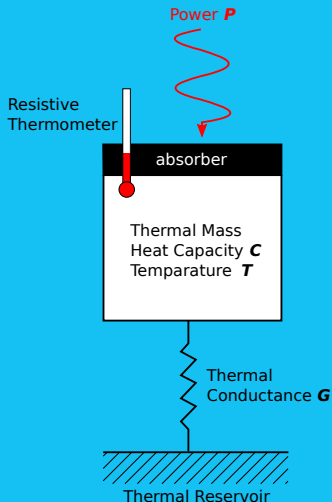
Фотографические пластинки

“Harvard Computers” (Pickering’s Harem)

Edward Charles Pickering, 1881. Привлечение женщин для обработки растущей коллекции фотопластинок Гарвардской обсерватории. The Henry Draper Catalogue. Обнаружение переменных звезд, изучение спектров, классификация галактик.

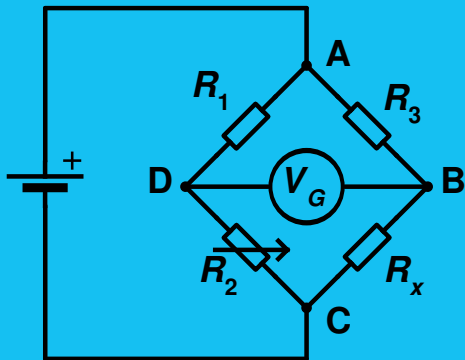


Болометр



1878 г. Сэмюэль Лэнгли изобрел болометр: две платиновые полоски, зачерненные ламповой сажей, включенные по схеме моста Уитсона и подключенные к чувствительному гальванометру. Болометр Лэнгли чувствовал корову за милю! Расширение диапазона до ИК.

Болометр



Мост Уитстона: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_x}{R_3} \Rightarrow R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3$.

$$V_G = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_x + R_3} \right) V_s$$

$\frac{R_x}{R_3} = \frac{V_s - 2V_G}{V_s + 2V_G}$ — если $V_s = 10$ В, то при $V_G = 1$ мВ
относительное изменение сопротивления составит $4 \cdot 10^{-4}$.
 R_3 и R_x — зачерненные платиновые полоски. Точность
измерений — до 10^{-5}°C .

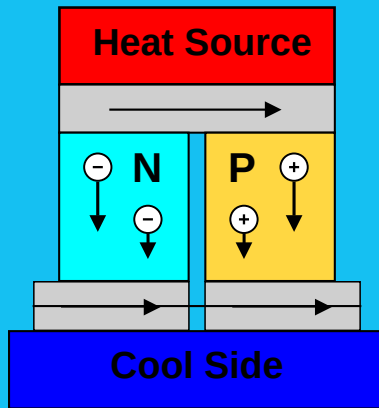
Термопара

Эффект Зеебека

Величина возникающей термо-ЭДС в первом приближении зависит только от материала проводников и температур горячего (T_1) и холодного (T_2) контактов:

$$\mathcal{E} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dT.$$

Объясняется совокупностью трех эффектов: зависимостью от температуры скорости электронов и энергии Ферми (контактная разность потенциалов) и фононным увлечением электронов.



Термоэлектрический генератор на элементах Пельтье

Фотоэффект

Внешний фотоэффект

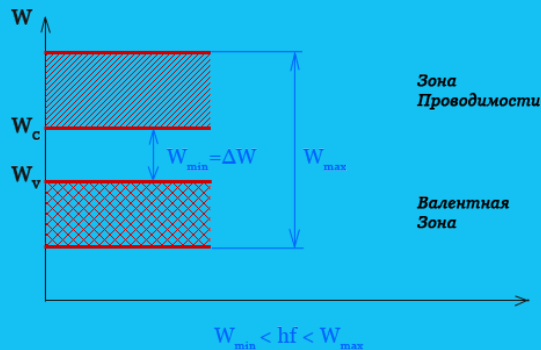
$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

Внутренний фотоэффект

W_{min} — ширина запрещенной зоны. W_{max} — энергия выхода.

Фотон с требуемой энергией формирует электронно-дырочную пару. Примеси позволяют уменьшить красный предел (электрон находится в запрещенной зоне).

Фоторезисторы.



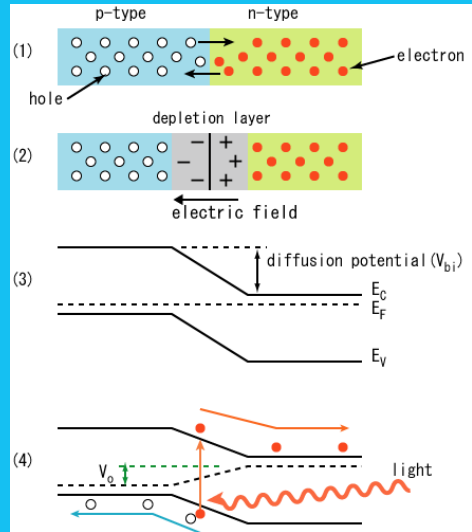
Фотоэффект

Фотовольтаический (фотогальванический) эффект

Напрямую связан с фотоэлектрическим эффектом. Режимы: фотогальванический (без внешнего напряжения) и фотопроводимости (обратное смещение).

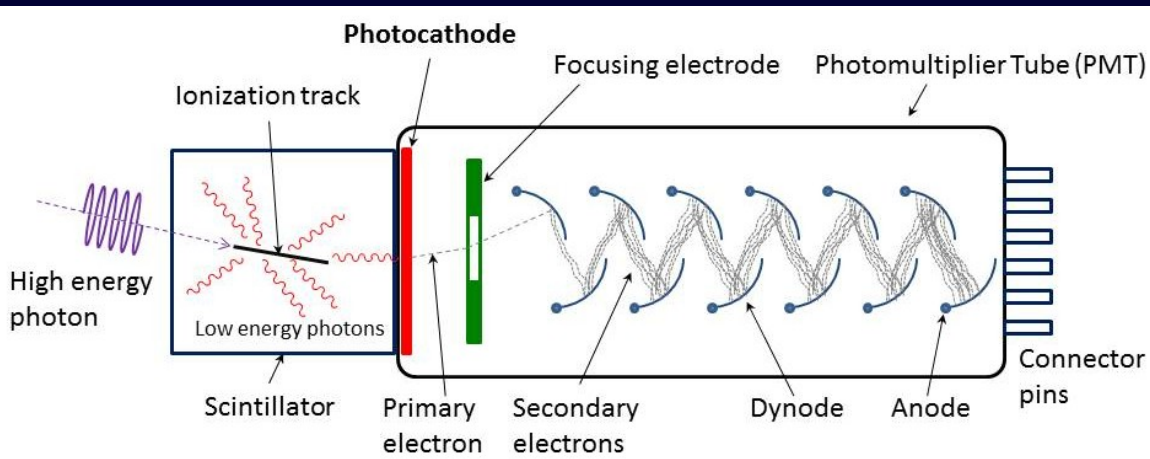
Генерируемая в обедненной области пара разрывается потенциалом Гальвани. Происходит накопление заряда.

Фотодиоды, ПЗС, CMOS.



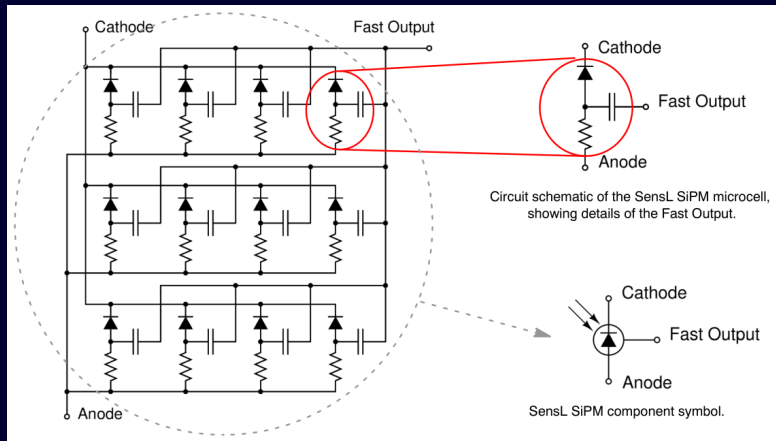
Ускорение и размножение электронов

1940-е годы. Счет фотонов. Большие — потому одноканальные.



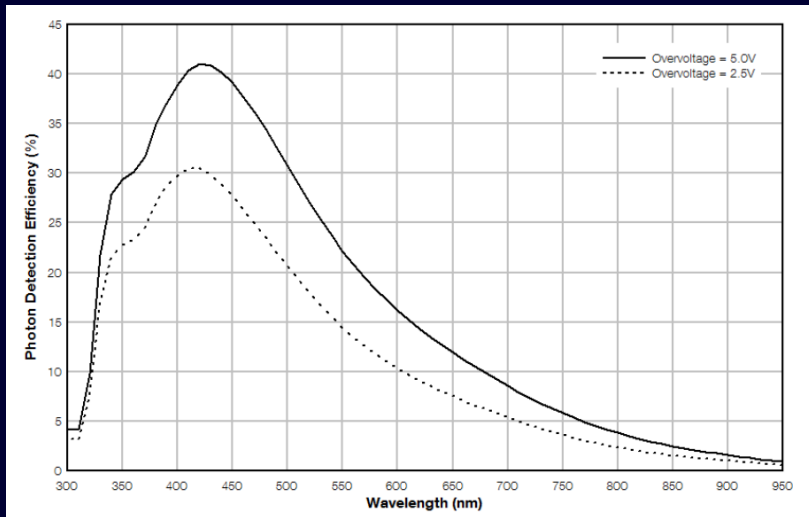
Ускорение и размножение электронов

Твердотельные фотоумножители (SiPM): массивы (сотни или даже тысячи) лавинных фотодиодов. Вместо киловольт — 10-50 В. Квантовая эффективность около 40%. Fast output реакция ~ 1 нс.



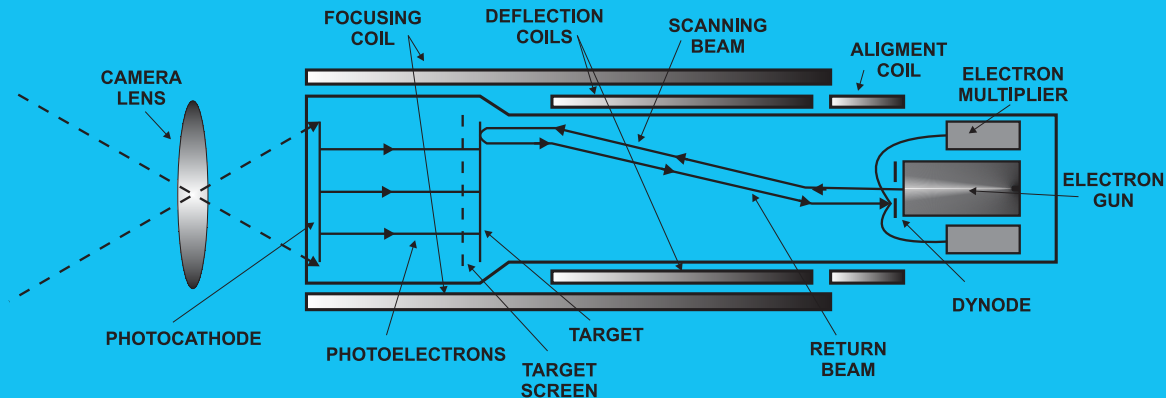
Ускорение и размножение электронов

SiPM performance



1964, E. Luedicke, A. D. Cope, and L. E. Flory. Astronomical Image-Integration System Using a Television Camera Tube.

На $3^m \div 4^m$ чувствительнее фотопластинок.

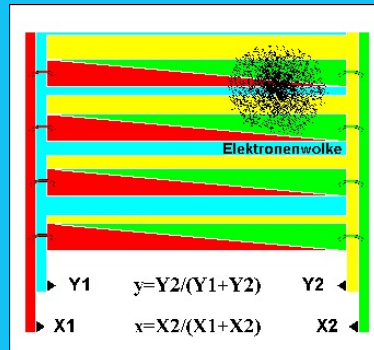
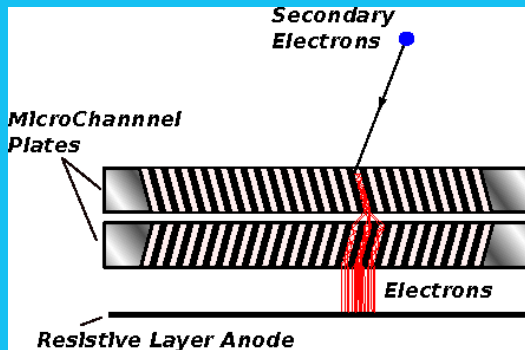


Position sensitive devices

Конец 1970-х — микроканальные пластины.

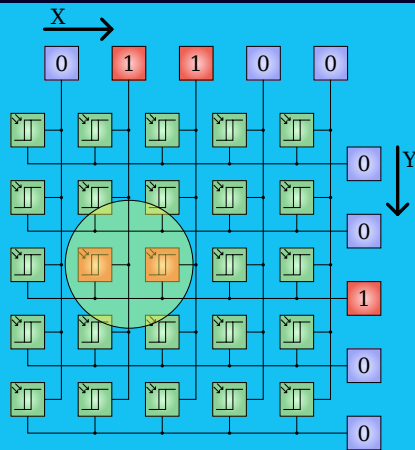
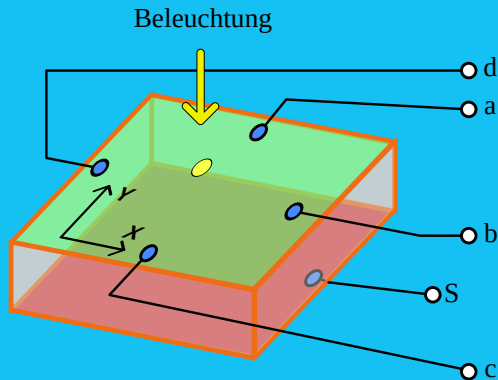
1983, Siegmund, O.H.W. et al. "Application of the wedge and strip anode to position sensing with microchannel plates and proportional counters".

1986, Siegmund, O.H.W. et al. "Wedge and strip image readout systems for photon-counting detectors in space astronomy".



Position sensitive devices

Полупроводниковые КЧД: на PIN-диодах (I – «собственный» (intrinsic) полупроводник без легирования)



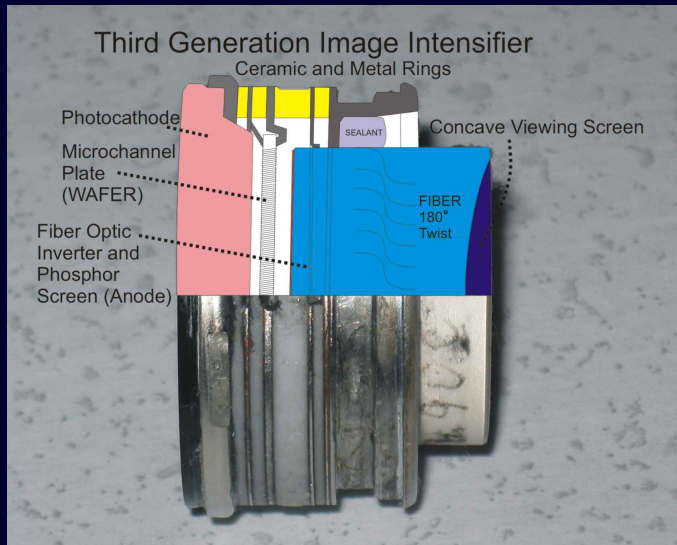
Первую конструкцию ЭОП предложили в 1928 г. изобретатели из компании Philips.

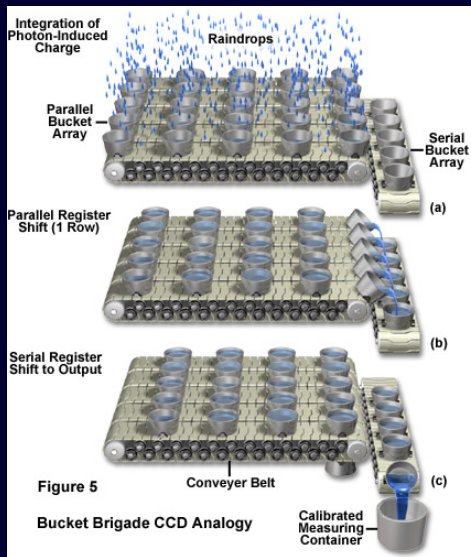
Первое поколение — каскады ФЭУ.

Второе — микроканальная технология (уменьшение паразитной засветки).

Третье — фотокатоды на арсениде галлия (больше усиление, меньше размеры).

Четвертое (2014 г!) — чувствительность $400 \div 1000$ нм, лучшее качество изображения, уменьшение размеров.

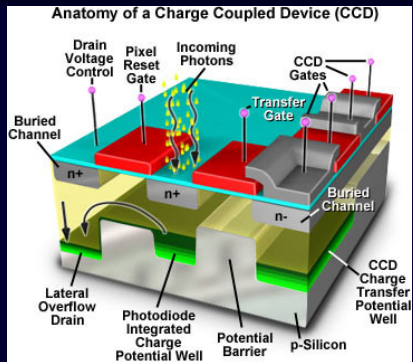




1969, Уиллард Бойл и Джордж Смит, лаборатории Белла.

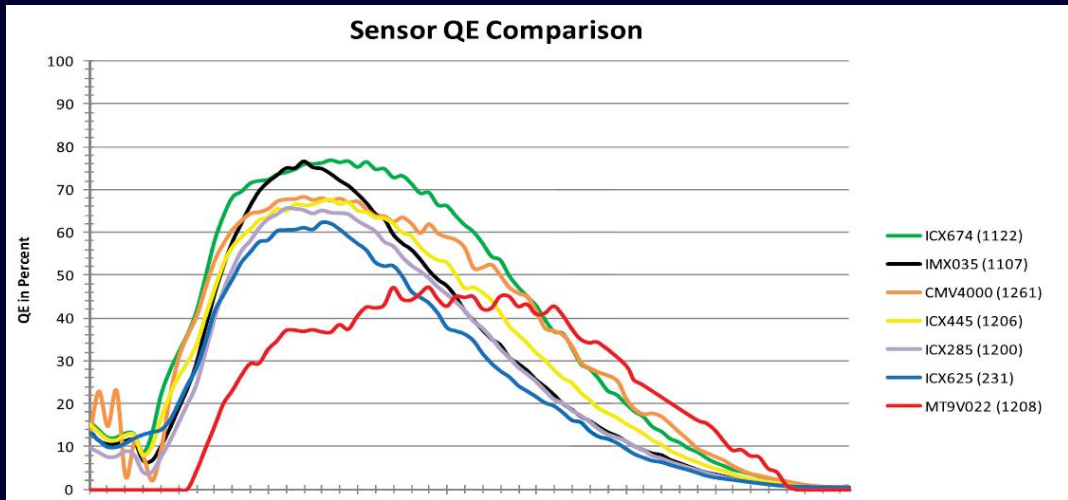
1975 — первая ПЗС 100x100 (Steven Sasson, Kodak).

1976 — запуск спутника-шпиона с ПЗС 800x800.

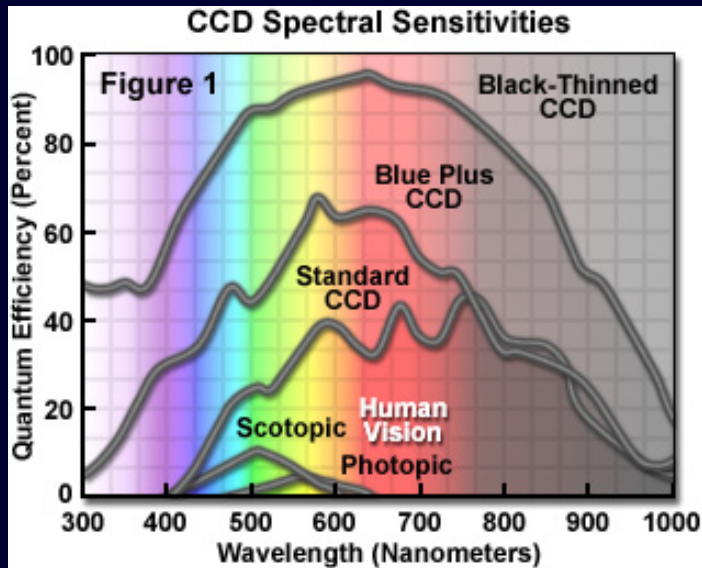


Квантовая эффективность ПЗС

QE — отношение количества падающих фотонов к детектируемым. Красная граница (Si: 1.12эВ) — 1 мкм.

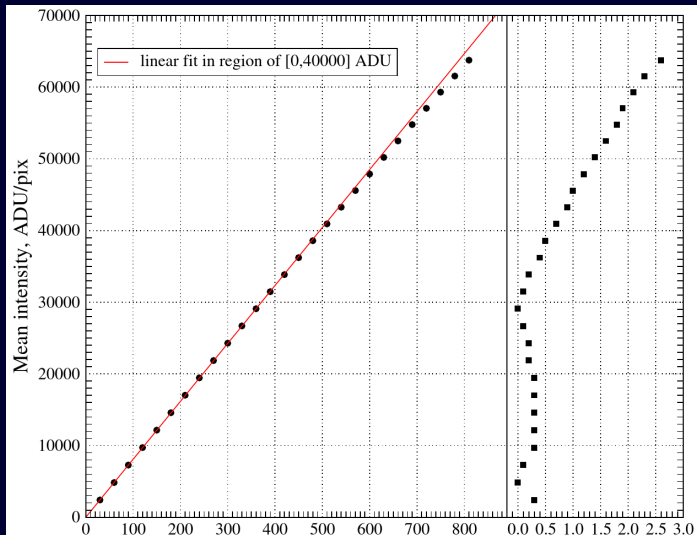


Квантовая эффективность ПЗС



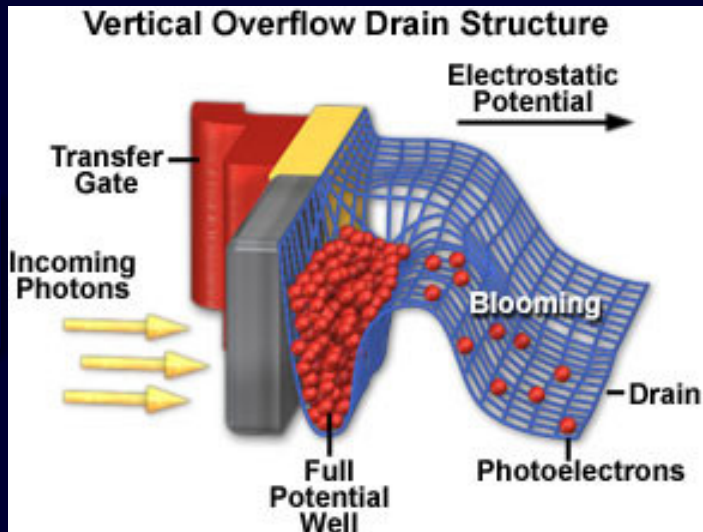
Линейность

Линейность ПЗС-камеры Apogee Alta 16M-NC (Kodak KAF-16803).



Динамический диапазон

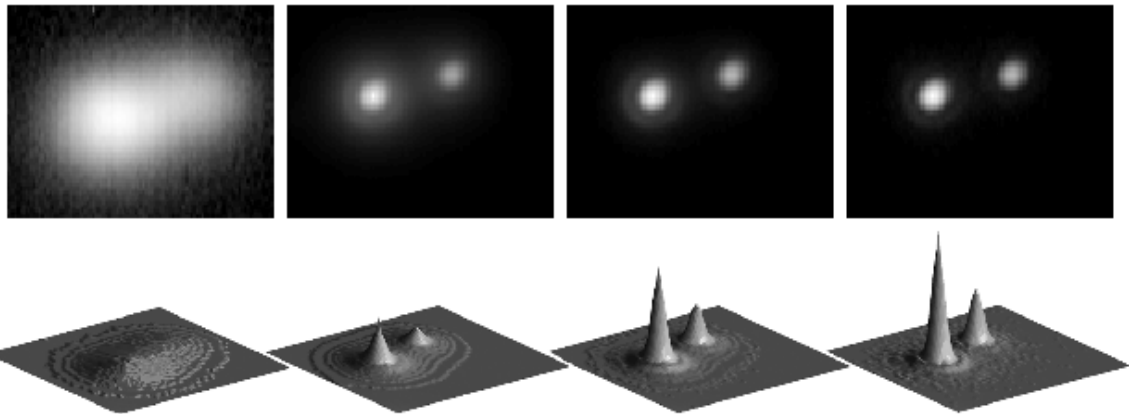
Максимальный размах уровней сигнала, при котором он регистрируется без потерь.
Идеал — бесконечный динамический диапазон.



Временное разрешение

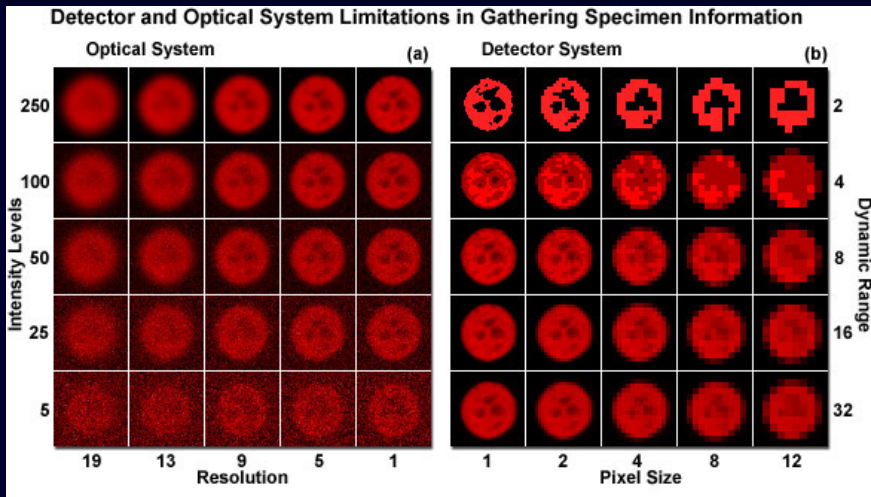
Минимальный интервал времени, в течение которого можно обнаружить изменение потока излучения.

Потери времени на считывание и сохранение.



Пространственное разрешение

Степень детализации изображения зависит от условий наблюдения, оптики телескопа и прибора, размера пикселя.



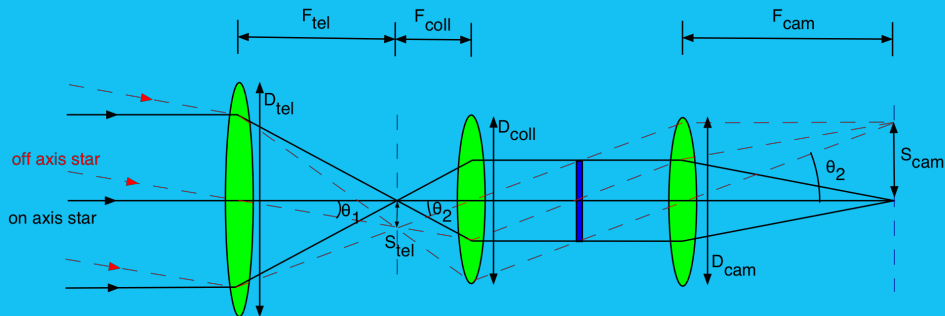
Выбор светоприемника под масштаб

Масштаб изображения

$$5a \geq \Delta x \geq 2a, \quad S_{tel} = \frac{F_{tel}}{206265}, \quad m = \frac{S_{cam}}{S_{tel}} = \frac{F_{cam}}{F_{coll}}.$$

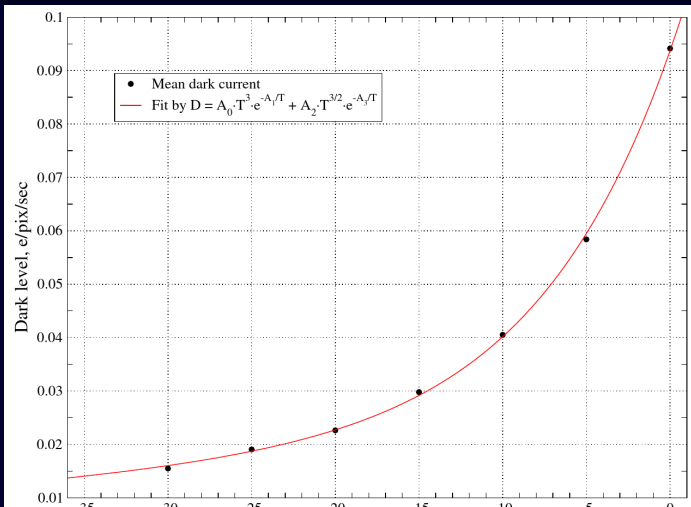
БТА: $1/S = 8.6''/\text{мм}$, $\Delta x_{1''} = 116.36 \text{ мкм}$

$a_{opt} = 13 \text{ мкм}$. Нужен редуктор ~ 2.5 раз!



Шумы

Выходной сигнал всегда отличается от входного: пуассонова статистика фотонов, фон неба, тепловой (темновой) шум, космические частицы, шум считывания и т.п.



Если пуассонов шум фотонов плоского поля превышает шум считывания, гистограмма имеет почти гауссову форму.

$$\sigma_{\text{ADU}} = \frac{\sqrt{\overline{F} \cdot G}}{G}$$

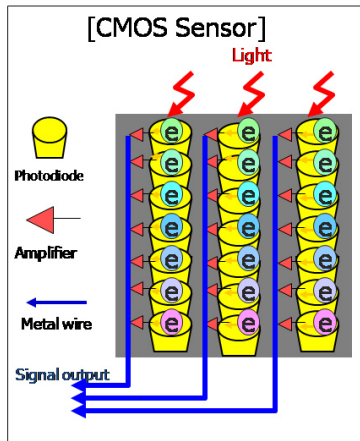
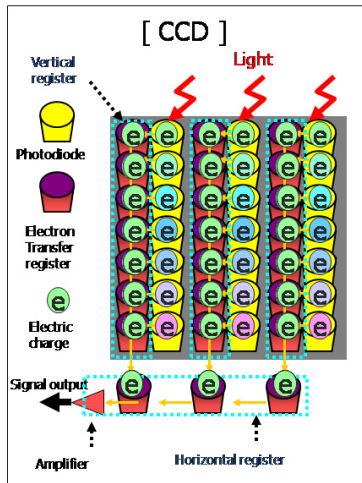
σ_{ADU} – полуширина гистограммы плоского поля, $\overline{F}$ – средний уровень плоского, G – gain (коэффициент преобразования фотоэлектронов в ADU).

Два кадра bias (B) и плоского (F):

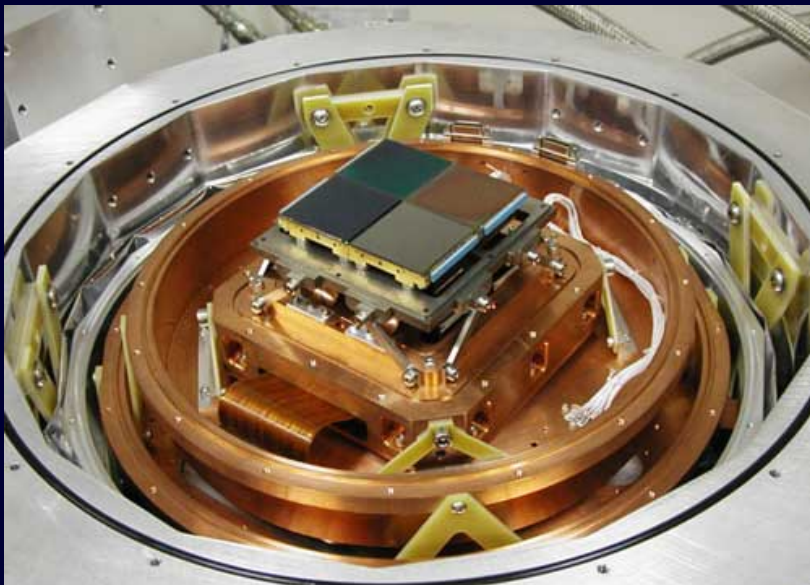
$$G = \frac{(\overline{F_1} + \overline{F_2}) - (\overline{B_1} + \overline{B_2})}{\sigma_{F_1-F_2}^2 - \sigma_{B_1-B_2}^2}$$

Шум считывания:

$$RN = \frac{G \cdot \sigma_{B_1-B_2}}{\sqrt{2}}$$



Конец 1980-х —
«активно-пиксельные датчики». Недеструктивное считывание, произвольный доступ. Но низкая квантовая эффективность.
ИК-детекторы на HgCdTe



Конец 1980-х —
«активно-пиксельные
датчики». Недеструктивное
считывание, произвольный
доступ. Но низкая квантовая
эффективность.
ИК-детекторы на HgCdTe

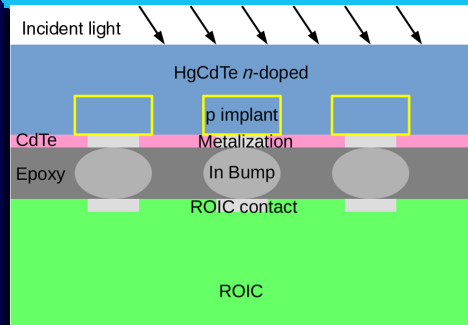
Гибридные матрицы (Focal Plane Array)

В n-канальном полупроводнике легируются p-канальные площадки — пиксели.

Каждый пиксель является конденсатором, накапливающим фотогальванические дырки, либо же конденсаторы легируются в ROIC.

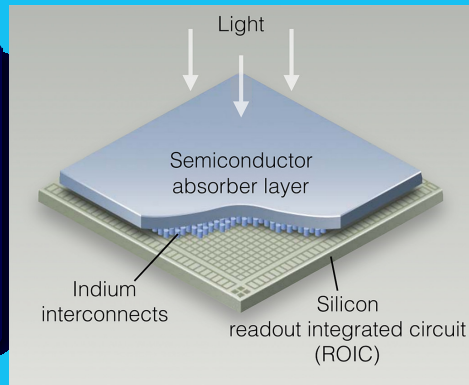
Толщина полупроводника: слишком маленькая — прозрачная для фотонов, слишком большая — рекомбинация пар в процессе экспозиции. Обычно около 10 мкм.

Просветляющее покрытие.



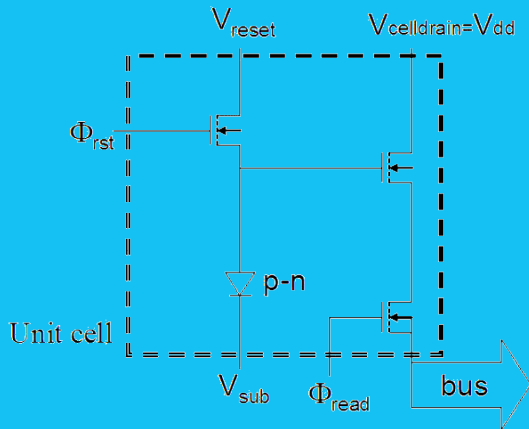
Гибридные матрицы (Focal Plane Array)

На кремнии — считывающая схема (ReadOut Integrated Circuit).
Регистрирующая структура прижимается к считывающей.
Контакт посредством индиевых шариков (мягкий металл даже при криогенных температурах).
Индивидуальная цепь считывания для каждого пикселя.
Независимая адресация, неdestructивное считывание.
Отсутствие растекания заряда, как в ПЗС. «Плохие» пиксели не влияют на окружение!



Гибридные матрицы (Focal Plane Array)

V_{reset} — уровень смещения (bias), $V_{read} \propto q$.
Усилитель на МОП позволяет практически свести к нулю утечки при неdestructивном считывании.
 Φ_{read} подается через элемент «2И» на двух МОП (адресация столбца и строки).



Гибридные матрицы (Focal Plane Array)

Hawaii HgCdTe 1024x1024.

Пиксель 18.5 мкм.

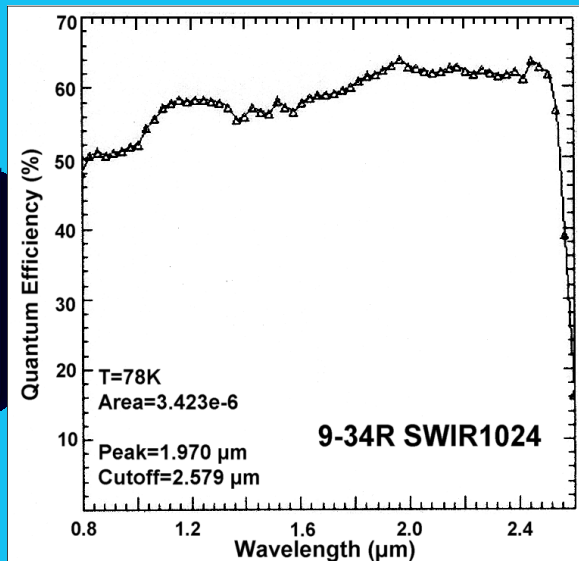
Gain 5.4 e-/ADU.

RON 2.1 ADU.

Около 10000 плохих пикселей.

Нелинейность меньше 1.5% от 0 до 10000 ADU.

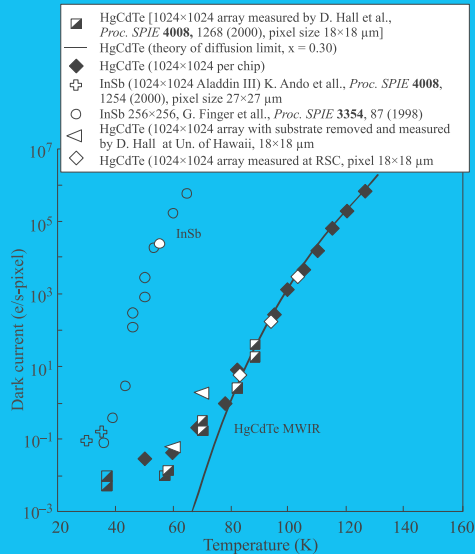
Темновой ток при T=78 K меньше 0.1 e-/s.

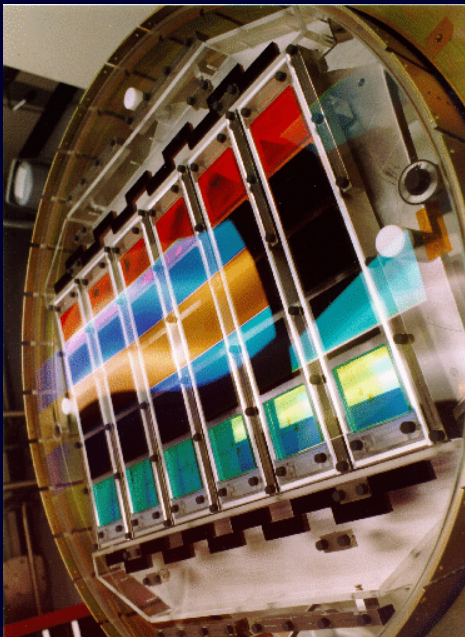


Гибридные матрицы (Focal Plane Array)

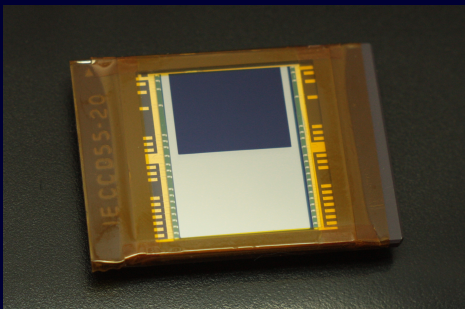
Высокий шум InSb при $T > 60$ K определяется большим уровнем генерационно-рекомбинационных токов.
У HgCdTe в этом диапазоне г-р токи практически нулевые, шум определяется в основном диффузными токами.

$$T_{max} = \frac{200 \text{ K}}{\lambda_c \mu\text{m}}$$





Слоановский обзор SDSS, 30 ПЗС 2048x2048 в сканирующем режиме.



ПЗС с переносом заряда позволяют уменьшить воздействие посторонней засветки во время считывания.

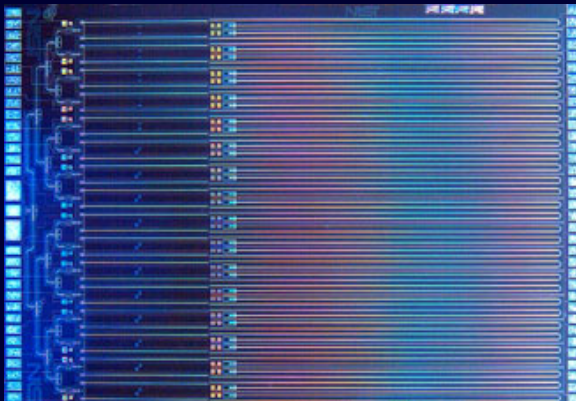
STJ, TES — измерение энергии фотона

STJ

Два сверхпроводника, разделенных тонким изолятором.

Алюминий (1.2K), ниобий (4.2K).

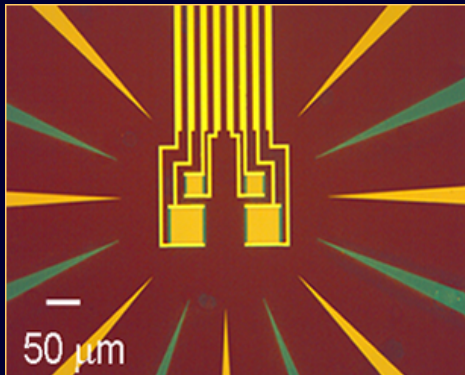
100..1000ГГц — радиоастрономия. Счетчик фотонов в широком диапазоне.



STJ, TES — измерение энергии фотона

TES

Transition-edge sensor — криогенный датчик, в основе работы которого используется зависимость от температуры сопротивления на границе фазового перехода в сверхпроводящее состояние.



arXiv:astro-ph/9705165, 1997

The Orthogonal Transfer CCD позволяет переносить заряд в любом из четырех направлений. Отслеживание атмосферных наклонов волнового фронта с частотой до 100 Гц. Проще tip-tilt систем.

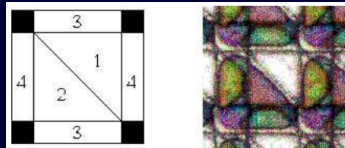


Fig. 1.— On the left is a schematic of how the four gates of an OTCCD are organized. On the right is a photomicrograph of an OTCCD pixel. In this device gate #1 is aluminum and therefore appears bright.

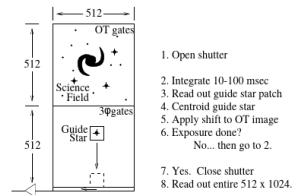
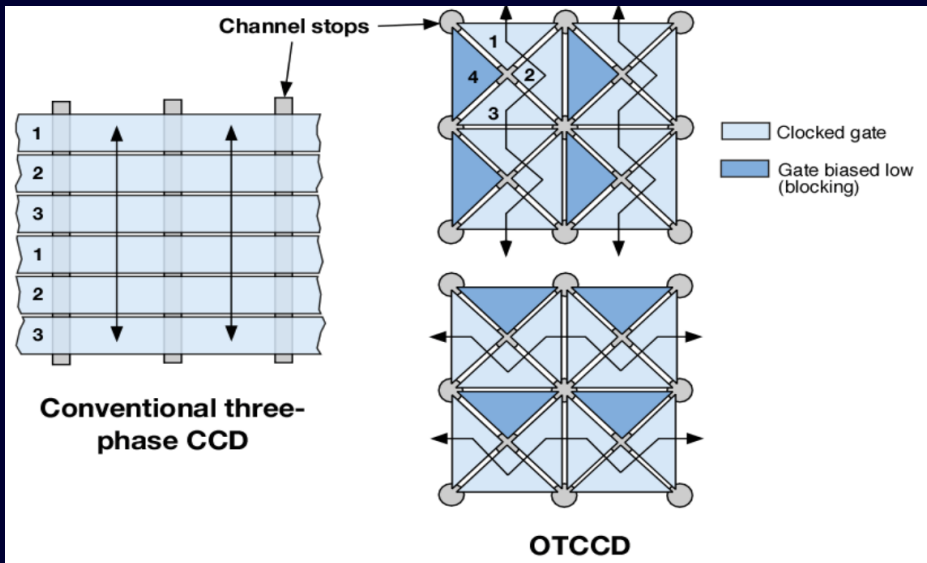


Fig. 2.— The OTCCD is used to track image motion by placing the science field on the portion of the CCD with OT gates and a guide star on the frame-store portion of the CCD. A

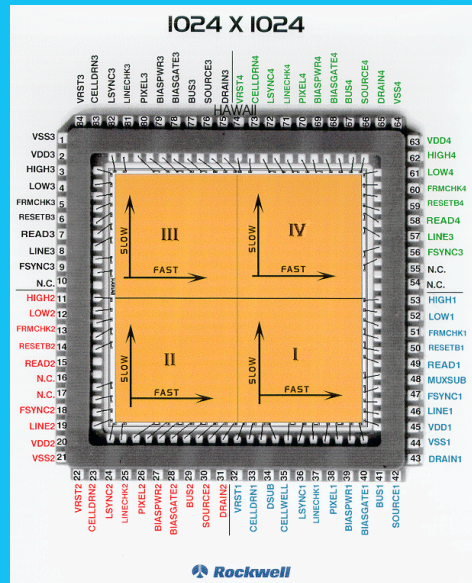
OTCCD



ПЗС, итоги

- Для повышения эффективности толщина рабочего слоя ПЗС должна быть не больше подложки n-типа, back-illuminated. Усложнение техпроцесса, удорожание.
- Глубокое охлаждение чипа: при -80°C с ростом температуры на $\sim 7^{\circ}\text{C}$ темновой шум увеличивается в два раза.
- Кремниевая подложка имеет красную границу на ~ 1.1 мкм, в ИК светоприемники с кремниевыми подложками не будут работать.
- Утончение чипа приводит к росту прозрачности для больших длин волн и появлению фрингов.
- Большой проблемой является растекание заряда с переэкспонированных пикселей.
- ПЗС невозможно оснастить «электронным» затвором, их затвор механический.
- Дефекты подложки приводят к появлению «горячих» и «плохих» пикселей.
- Постоянное воздействие космических частиц вызывает необратимую деградацию.

Сканирование производится построчно.
«Медленная» шина — строки (Y). «Быстрая» — столбцы (X).
Тактирование сдвигового регистра X поочередно адресует пиксели в строке.
Подключение сброса: индивидуально, построчно или глобально.
Если считывание не завершается сбросом, накопление продолжается — неструктивное считывание.



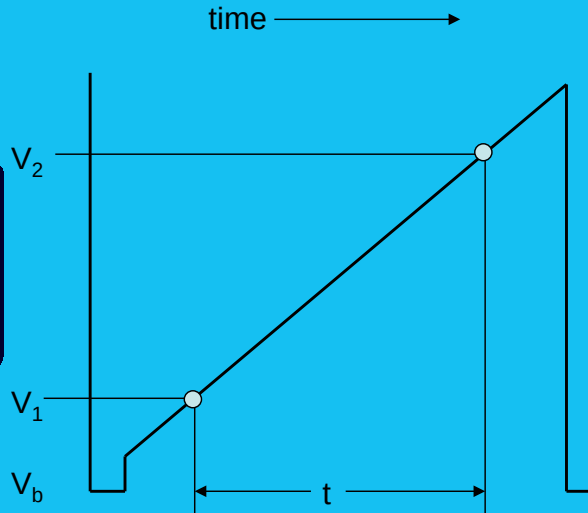
Двойная коррелированная выборка

V_b — начальный уровень смещения.

V_1 — уровень при считывании сразу после сброса.

V_2 — считывание в конце экспозиции.

$V_2 - V_1$ — двойная коррелированная выборка.



Недеструктивное считывание

Fowler (F) and Follow-Up-the-Ramp (FUR, отслеживание наклона) sampling.

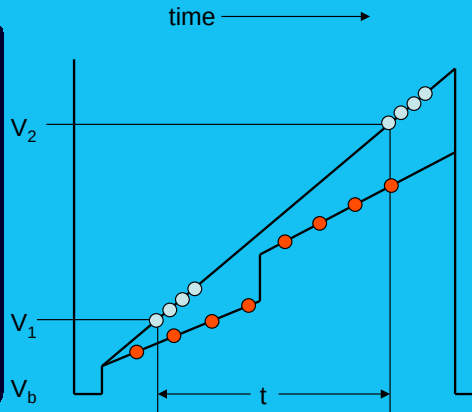
$$\text{SNR}_{FUR} = \text{SNR}_{DC} \sqrt{\frac{n(n+1)}{6(n-1)}}.$$

Для $n \gg 1$

$$t = nT_{read}: \text{SNR}_F = \text{SNR}_{DC} \sqrt{n/8} \approx \text{SNR}_{FUR} \sqrt{6/8}$$

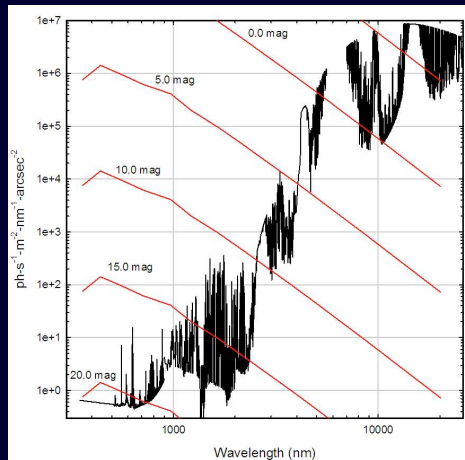
$$t \gg nT_{read}: \text{SNR}_F = \text{SNR}_{DC} \sqrt{n/2} \approx \text{SNR}_{FUR} \sqrt{3}!$$

Однако, FUR более применим в космосе:
восстановление изображений, поврежденных космикой!



Яркость неба

Высокий уровень шумов от самого телескопа.
В дальнем ИК небо ярче объектов!
Фон неба зависит от положения объекта.
«Nodding» — небольшие перемещения
телескопа между экспозициями для
получения снимков неба.

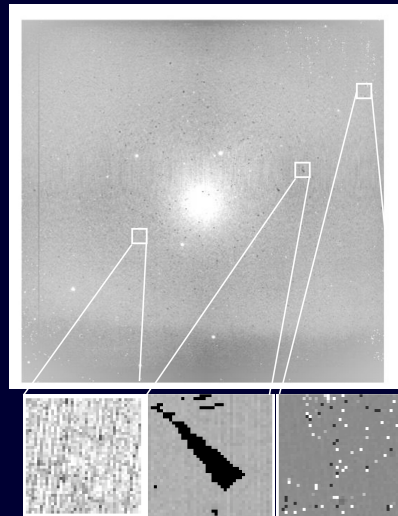


Обработка ИК-снимков

Последовательность обработки

- 1 Медианное усреднение снимков неба.
- 2 Вычитание неба из снимков объекта.
- 3 Деление результата на плоское поле.
- 4 Обработка результата.

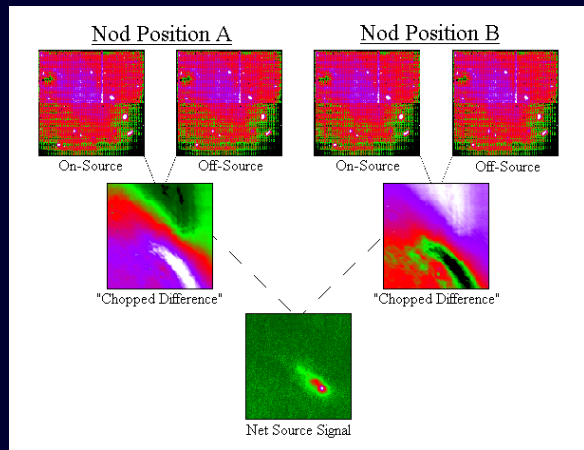
Переполненные поля требуют больших перемещений телескопа для формирования изображения неба.



Mid IR: Chopping + Nodding

В среднем ИК фон неба быстро меняется.
Экспозиции — не более 50 мс!

- 1 «Chopping» $\Rightarrow \text{on}_i / \text{off}_i$.
- 2 $\sum_{i=0}^{i=xxxx} \Rightarrow \text{On}^1 - \text{Off}^1$.
- 3 «Nodding», repeat $\Rightarrow \text{On}^2 - \text{Off}^2$.
- 4 $\text{Sky} = \text{On}^1 - \text{Off}^1 + \text{On}^2 - \text{Off}^2$.
- 5 $\text{Accumulated} = \text{On}^1 - \text{Off}^1 - (\text{On}^2 - \text{Off}^2)$.
- 6 Совмещение $\Rightarrow \text{Shift} + \text{add}$.



Обработка ИК-снимков

Mid IR: Chopping + Nodding

В среднем ИК фон неба быстро меняется.
Экспозиции — не более 50 мс!

1 «Chopping» $\Rightarrow on_i/off_i$.

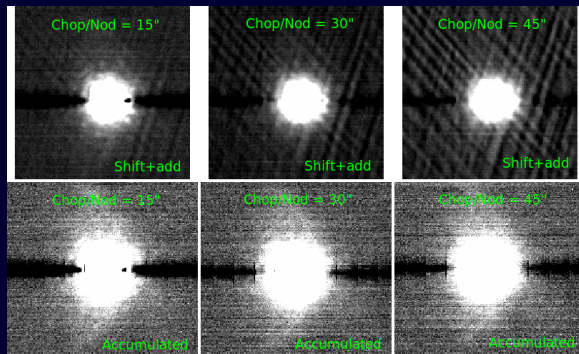
2 $\sum_{i=0}^{i=xxxx} \Rightarrow On^1-Off^1$.

3 «Nodding», repeat $\Rightarrow On^2-Off^2$.

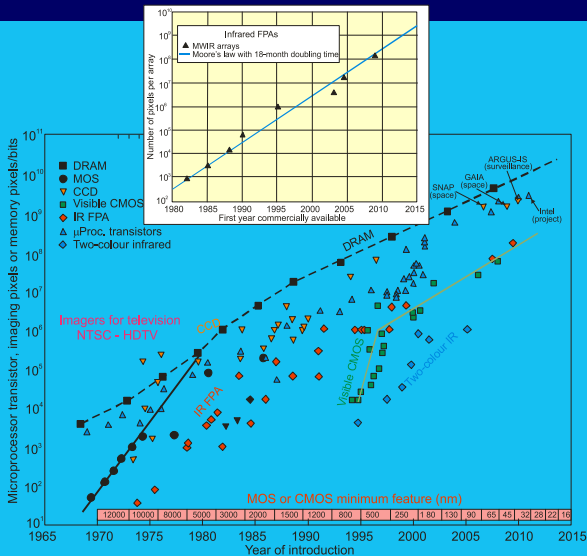
4 $Sky = On^1-Off^1 + On^2-Off^2$.

5 $Accumulated = On^1-Off^1 - (On^2-Off^2)$.

6 Совмещение $\Rightarrow Shift+add$.



Закон Мура



Удвоение числа транзисторов на ИС каждые 2 года.

Спасибо за внимание!

mailto:

eddy@sao.ru

edward.emelianoff@gmail.com