

O ABC DAS CÂMARAS CCD

Pedro Ré

<http://astrosurf.com/re>

O aparecimento recente de câmaras CCD¹ refrigeradas e não refrigeradas tem vindo a revolucionar as técnicas de obtenção de imagens astronómicas. Estes dispositivos foram desenvolvidos pela primeira vez em 1970 nos Laboratórios Bell por W. Boyle e G. Smith.

Os sensores ou detectores CCD são constituídos por uma superfície sólida sensível à luz, dotada de circuitos que permitem ler e armazenar electronicamente imagens digitais. O conjunto formado pelo detector CCD, circuitos electrónicos, sistema de refrigeração e suporte mecânico constituem uma câmara CCD (Figura 1).

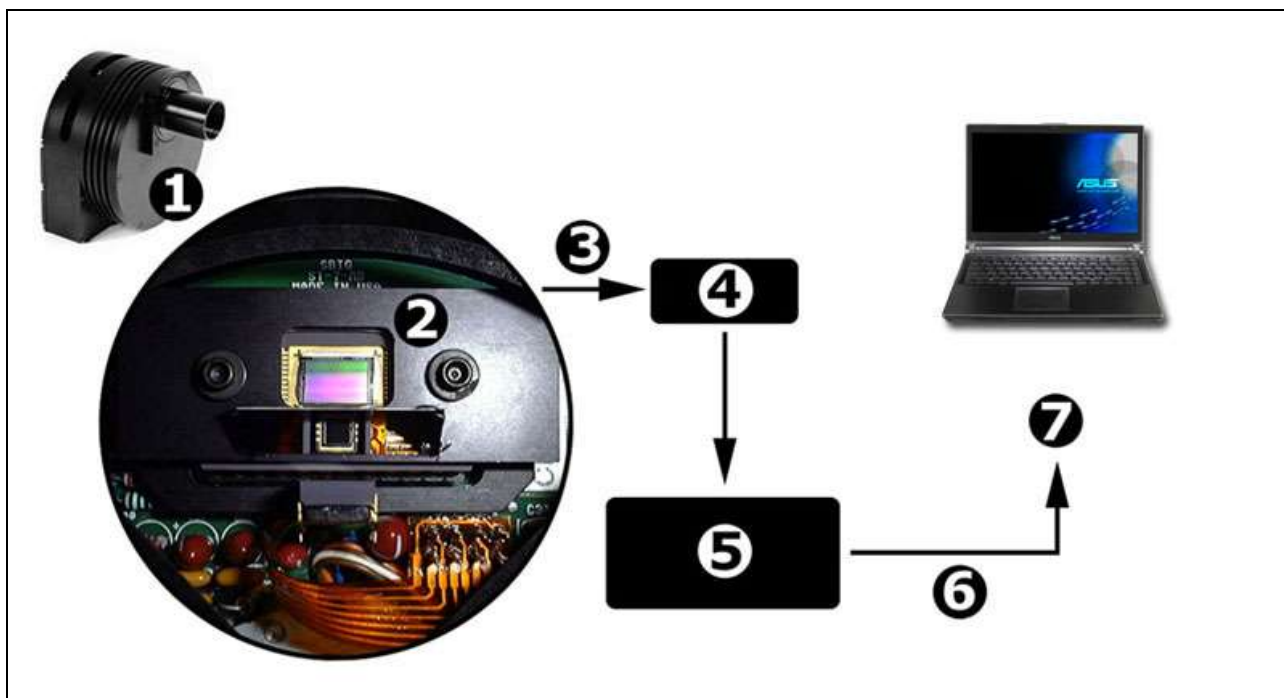


Figura 1- Esquema simplificado de uma câmara CCD. 1- Câmara CCD, 2- Sensor CCD, 3- Leitura e amplificação (sinal analógico), 4- Amplificador, 5- Conversor analógico/digital, 6- Digitalização (sinal digital), 7- *Download* para computador. Pedro Ré (2005).

O modo como um sensor CCD transforma uma imagem num ficheiro de computador é relativamente simples. A luz que incide num conjunto de centenas de milhares de detectores ("pixels²"), produz cargas eléctricas, que são por sua vez lidas, medidas, convertidas em números e gravadas num ficheiro de computador. As câmaras deste tipo, necessitam portanto, de um computador (PC ou Mac) para poderem ser operadas.

O funcionamento dos sensores CCD baseia-se no efeito fotoeléctrico. Algumas substâncias têm a propriedade de absorver fotões e libertar no processo um electrão. Os painéis solares fotovoltaicos foram concebidos com base neste princípio. Nestes últimos, os electrões gerados ao incidir a luz, são recolhidos e convertidos em energia eléctrica. O mesmo material empregue nos painéis solares, o silício, constitui a matéria-prima para a construção dos sensores CCD. Um CCD típico consiste numa placa quadrada ou rectangular de silício com 125 a 500 micrómetros de espessura e alguns milímetros de comprimento. Neste, é implantada uma rede de eléctrodos que capturam e analisam os electrões gerados pelo efeito fotoeléctrico. Cada trio de eléctrodos actua como uma ratoeira electrostática, acumulando em seu redor os electrões gerados na placa de silício. O eléctrodo central de cada trio mantém uma carga positiva, enquanto que os restantes mantêm um potencial nulo. Deste modo os electrões, cuja carga é negativa, acumulam-se em volta do eléctrodo central à medida que a luz incide no detector (Figura 2). Os trios de eléctrodos são dispostos em colunas que cobrem a totalidade do sensor CCD. As diferentes colunas são isoladas entre si por um material que gera um potencial negativo permanente ao entrar em contacto com a placa de silício, o que evita a contaminação entre colunas. As linhas de eléctrodos consideradas perpendicularmente às colunas são designadas como filas. Cada trio de eléctrodos é uma peça fundamental do detector CCD e corresponde a um elemento da imagem digital final, e é designado *pixel* ou elemento de imagem. O tamanho físico do *pixel* é variável. Existem *pixels* rectangulares e *pixels* quadrados. As suas dimensões variam habitualmente entre 6 e 27 micrómetros.

¹ Dispositivo de carga acoplada – CCD, sigla formada pelas iniciais de *Charge Coupled Device*.

² Elementos de imagem

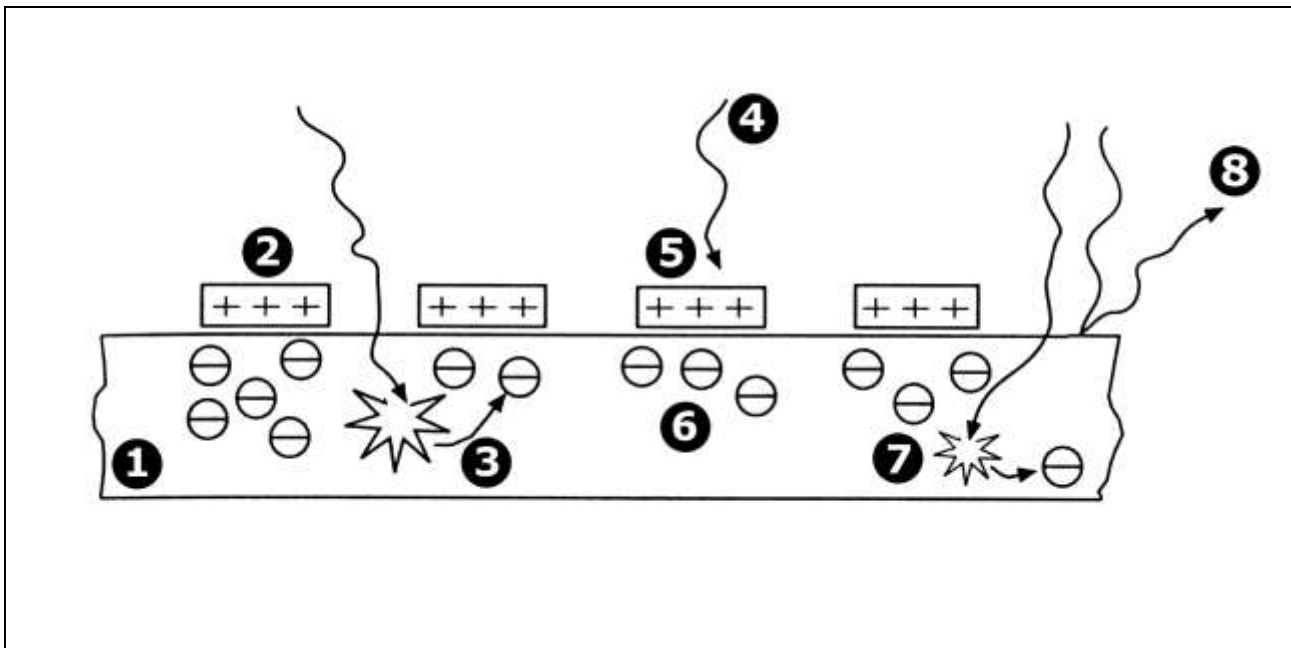


Figura 2- Captura e acumulação de luz num detector CCD. 1- Placa de silício, 2- eléctrodos, 3- fóton que gera um electrão capturado, 4- fótons incidentes, 5- fóton absorvido pelo eléctrodo, 6- electrões capturados, 7- fóton que gera um electrão perdido, 8- fóton reflectido. Pedro Ré (2005).

Após a exposição do sensor CCD aos fótons incidentes, estes são convertidos em electrões e acumulados nas proximidades dos eléctrodos. Quando a exposição ou integração termina, obtemos uma imagem latente, convertida em electrões no interior do CCD. O passo seguinte consiste na sua leitura e armazenamento.

A leitura da imagem latente efectua-se através de um processo denominado transferência de carga. Este mecanismo baseia-se na leitura das voltagens respeitantes a cada pixel ou elemento de imagem. Os valores são transferidos para a memória de um computador passando através de um amplificador e de um conversor analógico/digital. Torna-se deste modo possível gravar a imagem obtida em formato digital para posterior processamento.

Se existirem *pixels* que não acumulem electrões (*pixels* mortos) produzem-se geralmente colunas de elementos de imagem que não conseguem registar qualquer tipo de informação.

Os sensores CCD utilizados em astronomia são fundamentalmente de 3 tipos: 1- sensores de transferência inter-linha³; 2- sensores de transferência progressiva⁴ e 3- sensores de transferência de matriz⁵ (Figura 3).

A eficiência quântica de um sensor CCD descreve a resposta deste a diferentes comprimentos de onda do espectro electromagnético. Os sensores *standard* (iluminação frontal⁶) são mais sensíveis ao verde, vermelho e infravermelho (comprimentos de onda entre 500 e 800 nm) relativamente aos comprimentos de onda na região do azul (400-500 nm). Um outro tipo de sensores CCD (retro-iluminados⁷) possui uma eficiência quântica muito superior, que pode por vezes atingir ou mesmo ultrapassar os 90%. Recentemente surgiram no mercado sensores CCD de iluminação frontal mais sensíveis na região azul do espectro visível⁸ (Figura 4a, 4b e 5). Os sensores CCD retro-iluminados têm uma espessura de apenas 10 micrómetros.

Devido à sua grande sensibilidade à luz, os elementos (*pixels*) dos sensores CCD apresentam um sinal de saída elevado quando expostos a luminosidades relativamente baixas. Por exemplo, uma estrela de 6ª magnitude criará essas condições, em menos de 1 s. A partir daí, para registar as regiões menos brilhantes de uma nebulosa, a exposição terá de continuar, mas os elementos de imagem que já leram a máxima saída não responderão proporcionalmente, ocorrendo saturação ou *blooming* (Figura 6).

Alguns sensores CCD têm como opção um sistema *antiblooming* concebido para eliminar o excesso de carga dos elementos de imagem saturados. Nos sensores em que este não esteja presente, as estrelas brilhantes produzem uma riscas vertical (ou horizontal) que é característica da saturação. Os sensores que integrem um sistema *antiblooming* são 30% menos sensíveis.

A maioria dos CCD tem a possibilidade de agrupar electronicamente os elementos de imagem ou *pixels* formando-se deste modo um *super pixel*. Este *super pixel* integra a área de todos os elementos de imagem que contribuem para a carga eléctrica. A esta característica chama-se *binning*. Um *binning* de 1x1 significa que não são agrupados individualmente quaisquer elementos de imagem. Um *binning* de 2x2 equivale à soma da informação

³ "Interline-Transfer CCD".

⁴ "Progressive-Scan CCD".

⁵ "Frame-Transfer CCD".

⁶ "Front-illuminated CCD".

⁷ "Back-illuminated CCD".

⁸ "Blue-Enhanced CCD".

proveniente de uma área com 4 elementos de imagem adjacentes. Neste último caso a sensibilidade é aumentada cerca de 4 vezes mas a resolução da imagem é diminuída para cerca de metade (Figura 7).

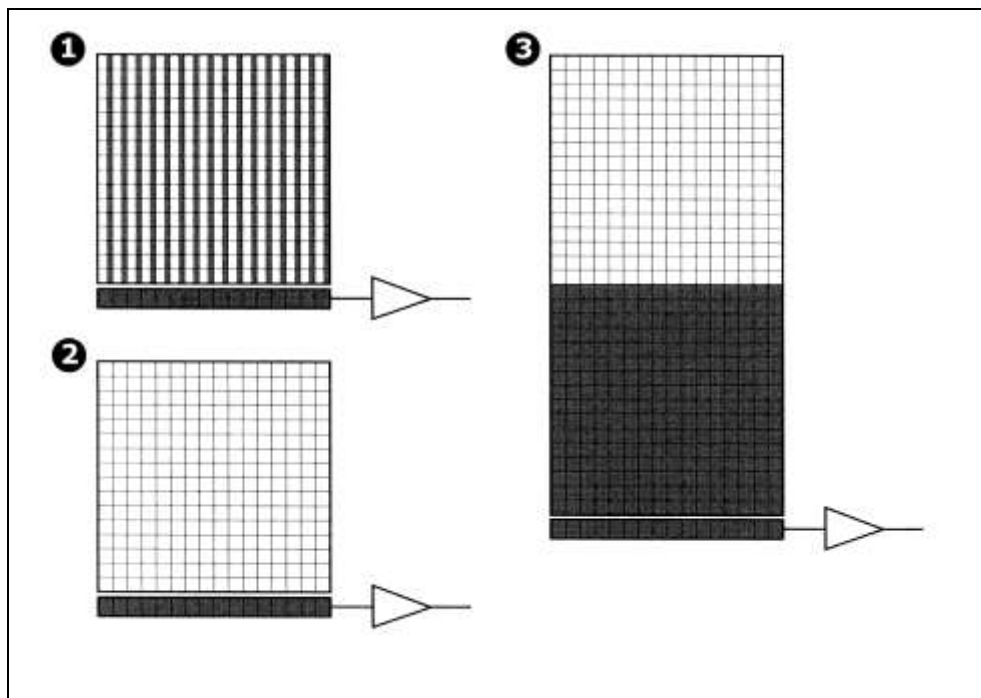


Figura 3- Principais tipos de sensores CCD. 1- transferência inter-linha, 2- transferência progressiva e 3 – transferência de matriz. Os elementos de imagem (*pixels*) activos estão representados a branco. Pedro Ré (2005).

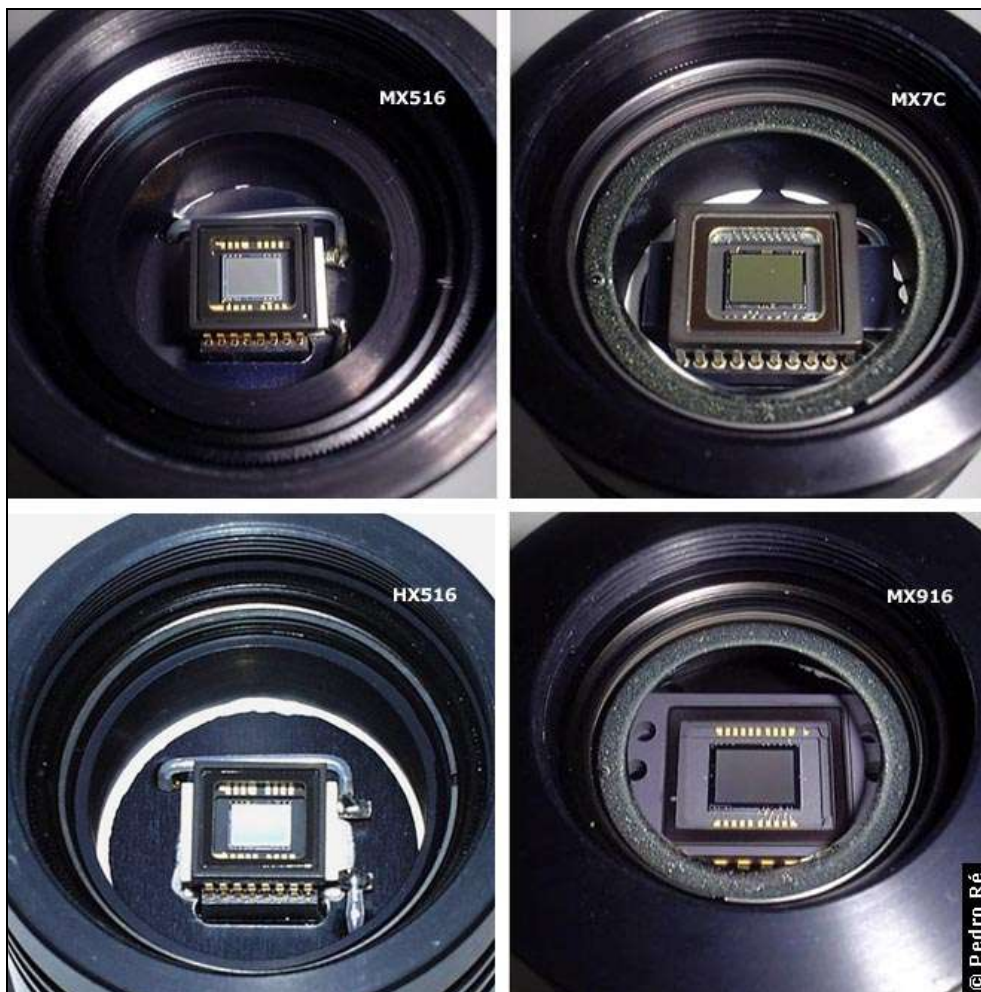


Figura 4ª- Sensores CCD de transferência inter-linha. Câmaras Starlight Xpress. Pedro Ré (2002).

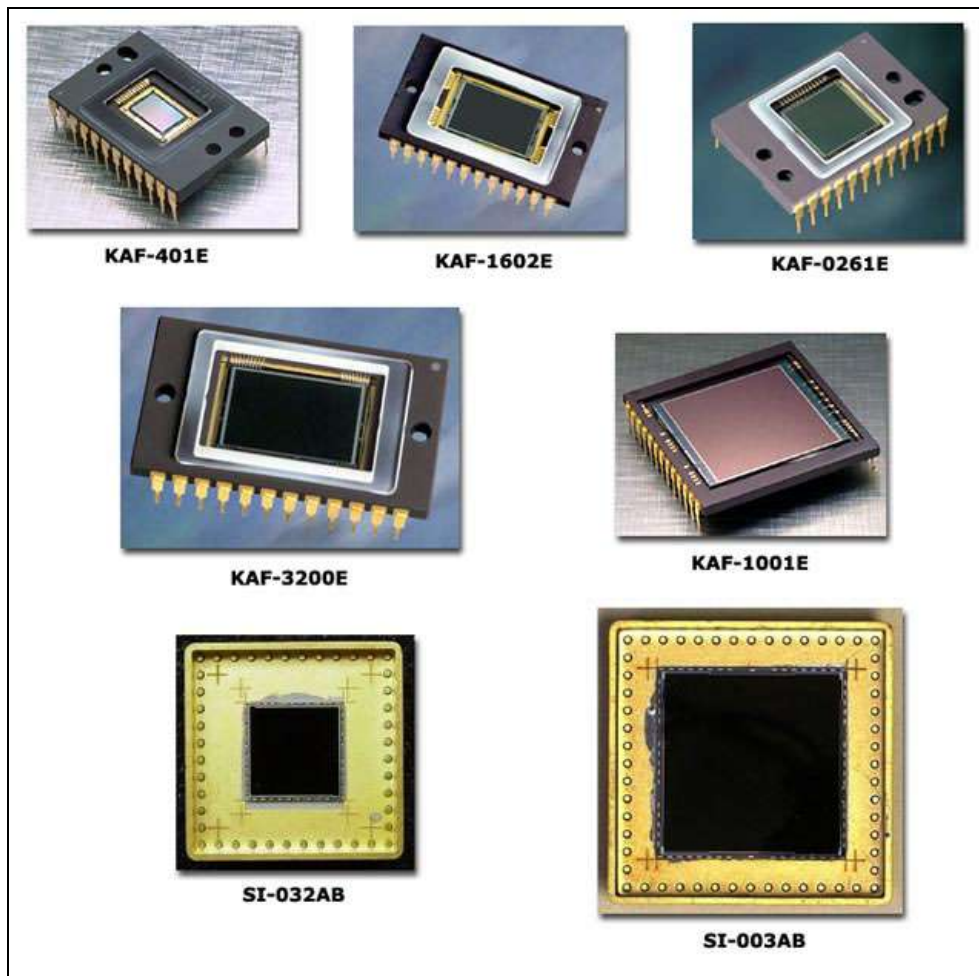


Figura 4b- Exemplos de alguns sensores CCD actuais (iluminação fronta- - KODAK KAF e retro-iluminados SITE) que equipam algumas câmaras actuais. Câmaras SBIG e Apogee. Pedro Ré (2002).

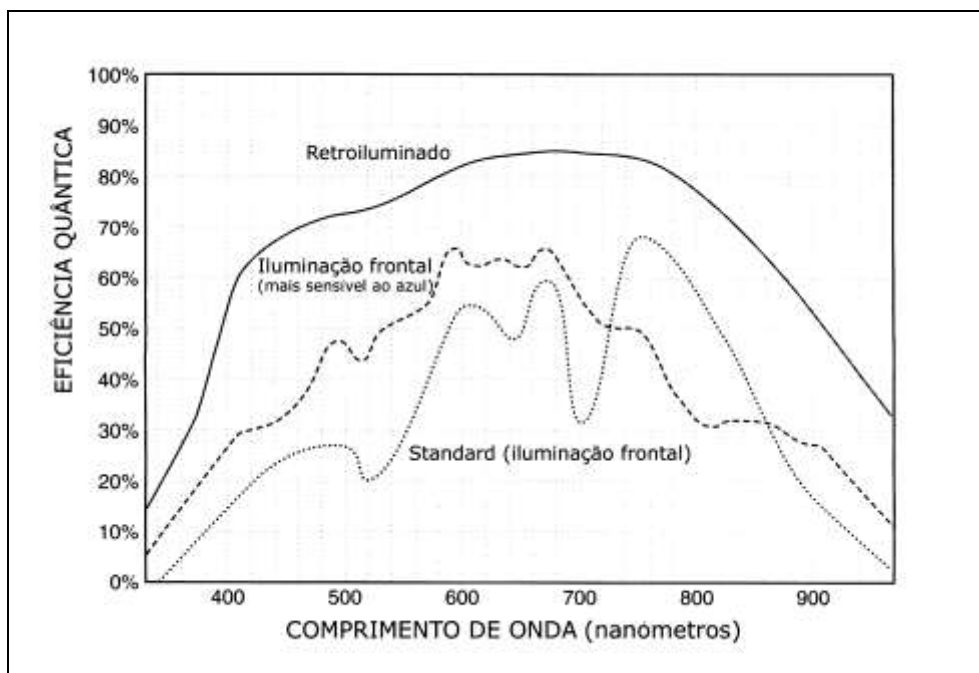


Figura 5- Eficiência quântica de alguns sensores CCD actuais. Adaptado de Berry e Burnell (2000)⁹.

⁹ Berry, R., J. Burnrell (2000). *The handbook of astronomical image processing*. Willmann-Bell, Inc.

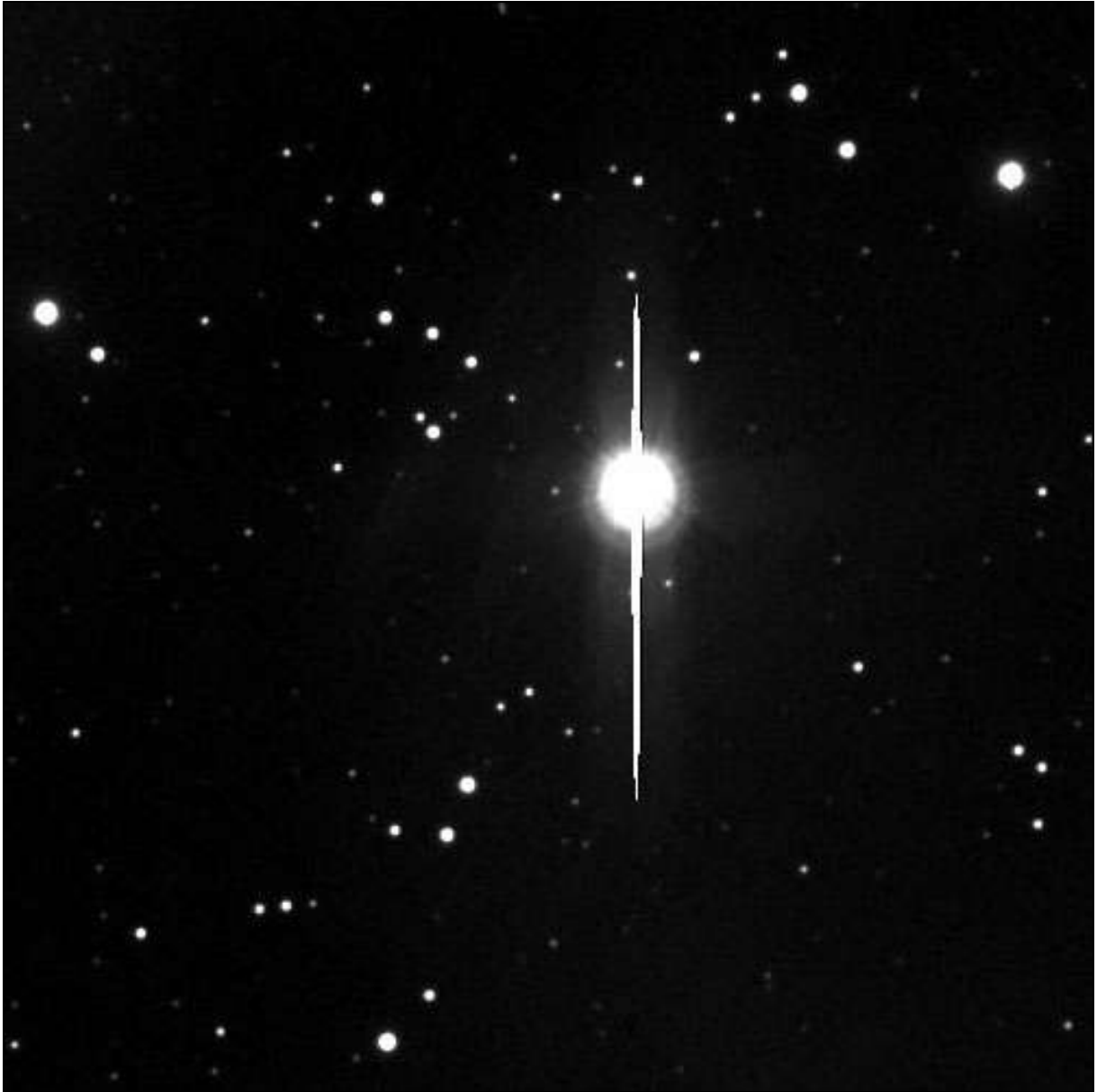


Figura 6- Imagem saturada de uma estrela obtida com um sensor CCD sem *antiblooming*. Pedro Ré (2001).

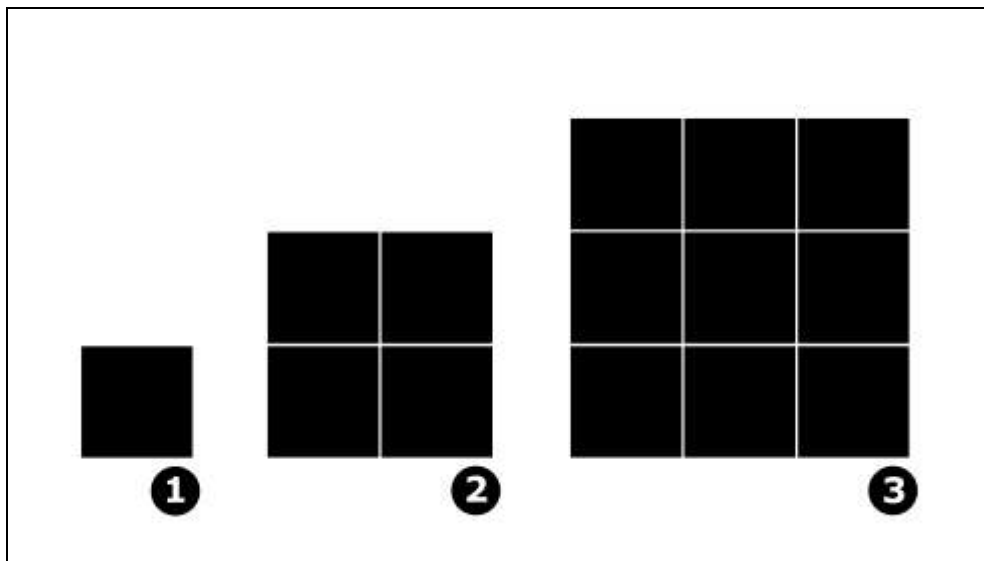


Figura 7- Exemplos de diversos tipos de *binning*: 1- *binning* 1x1, 2- *binning* 2x2, 3- *binning* 3x3. Pedro Ré (2002).

A digitalização, ou seja a conversão analógica/digital, constitui o processo de tradução da carga proveniente do sensor CCD num formato binário que é posteriormente reconhecido pelo computador. Uma câmara com 12 bits tem um *output* de 2^{12} o que equivale a 4096 níveis de cinzento, enquanto que um câmara com 16 bits possui um *output* de 65 536 níveis de cinzento (2^{16}).

Na fotografia convencional, chama-se tempo de exposição ao tempo durante o qual a película recebe luz do objecto que se quer registar. Na captação de imagens CCD, a este tempo chama-se tempo de integração.

As integrações de longa duração obtidas com o auxílio de um sensor CCD enfermam fundamentalmente de três tipos de defeitos que se descrevem seguidamente.

Corrente negra

Durante o tempo de integração, é acumulada uma interferência térmica em cada *pixel* ou elemento de imagem. O sensor CCD necessita de ser refrigerado a uma temperatura muito baixa (da ordem dos $-173^{\circ}\text{C} = 100\text{ K}$) para que este sinal seja reduzido a um nível negligenciável¹⁰. A maioria das câmaras CCD é afectada por esta interferência, uma vez que habitualmente os sensores CCD não são refrigerados a temperaturas inferiores a -50°C . A imagem é deste modo afectada por uma corrente negra ou *dark current* (cujo nome é derivado do facto desta interferência estar presente mesmo quando o sensor se encontre no escuro). O ruído produzido tem duas origens principais: ruído de leitura e ruído espacial. O primeiro está relacionado com flutuações registadas durante o processo de leitura, e o único modo de o ultrapassar consiste em efectuar uma média ou soma mediana de diversas imagens do mesmo objecto. O segundo deriva do facto de cada *pixel* reagir de modo distinto à corrente negra, produzindo-se um aspecto granulado na imagem. É possível construir um mapa de referência da corrente negra (usualmente uma soma mediana de 7 a 10 imagens obtidas em total obscuridade) uma vez que esta apresenta sempre um padrão recorrente e característico para cada detector (Figura 8).

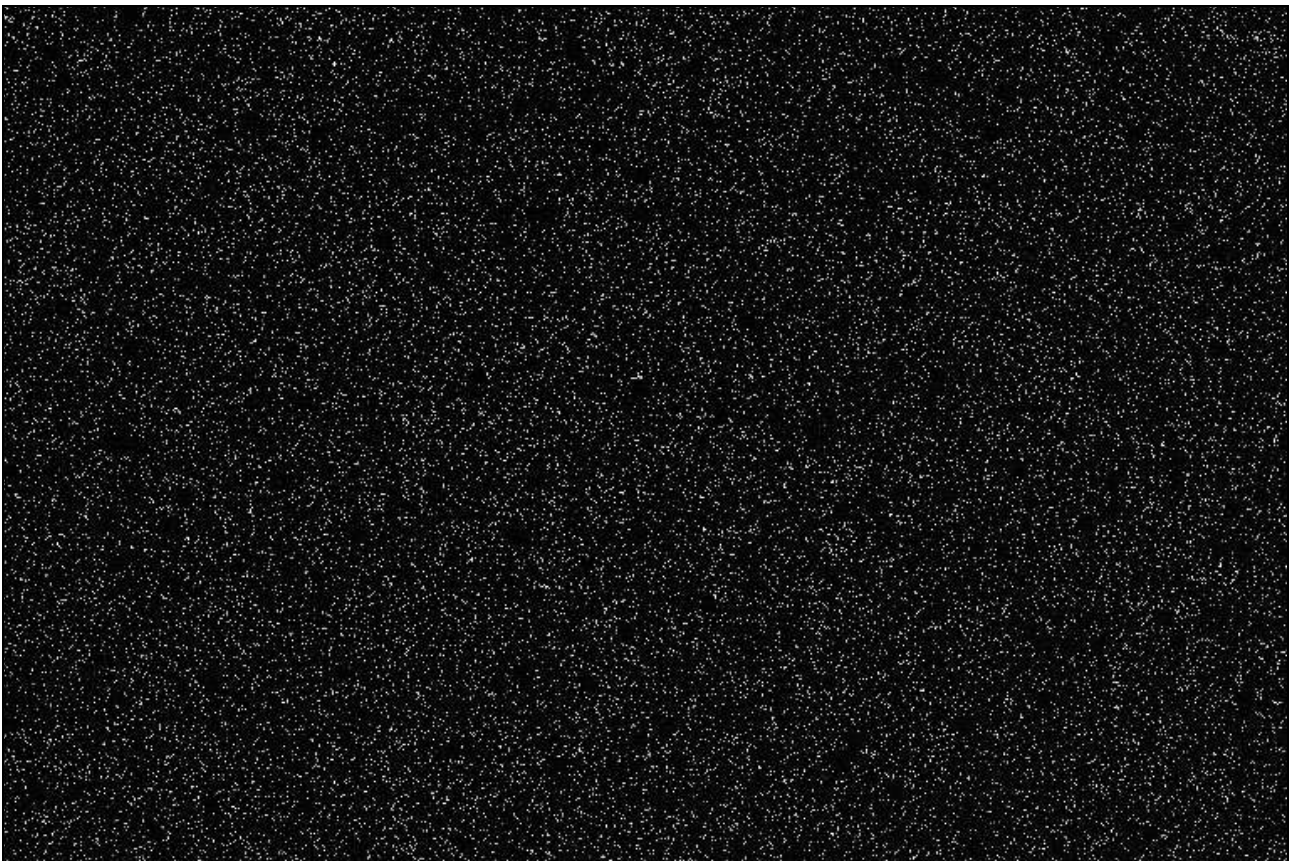


Figura 8- Mapa de corrente negra ou *dark current*. Pedro Ré (2002).

¹⁰ De um modo geral o ruído de uma imagem decresce 50% por cada abaixamento da temperatura de 6°C . As vantagens da refrigeração tornam-se, por isso, óbvias.

Enviesamento

Adicionalmente existe ainda um enviesamento também designado *offset* ou *bias* que é independente do tempo de integração e da temperatura do sensor. Este *offset* é induzido pelas características do *output* do sensor CCD e dos circuitos electrónicos do processador do sinal de vídeo. Um mapa de *offset* pode ser facilmente fabricado recorrendo a uma soma mediana de algumas imagens obtidas em escuridão total com um tempo de integração mínimo (Figura 9).

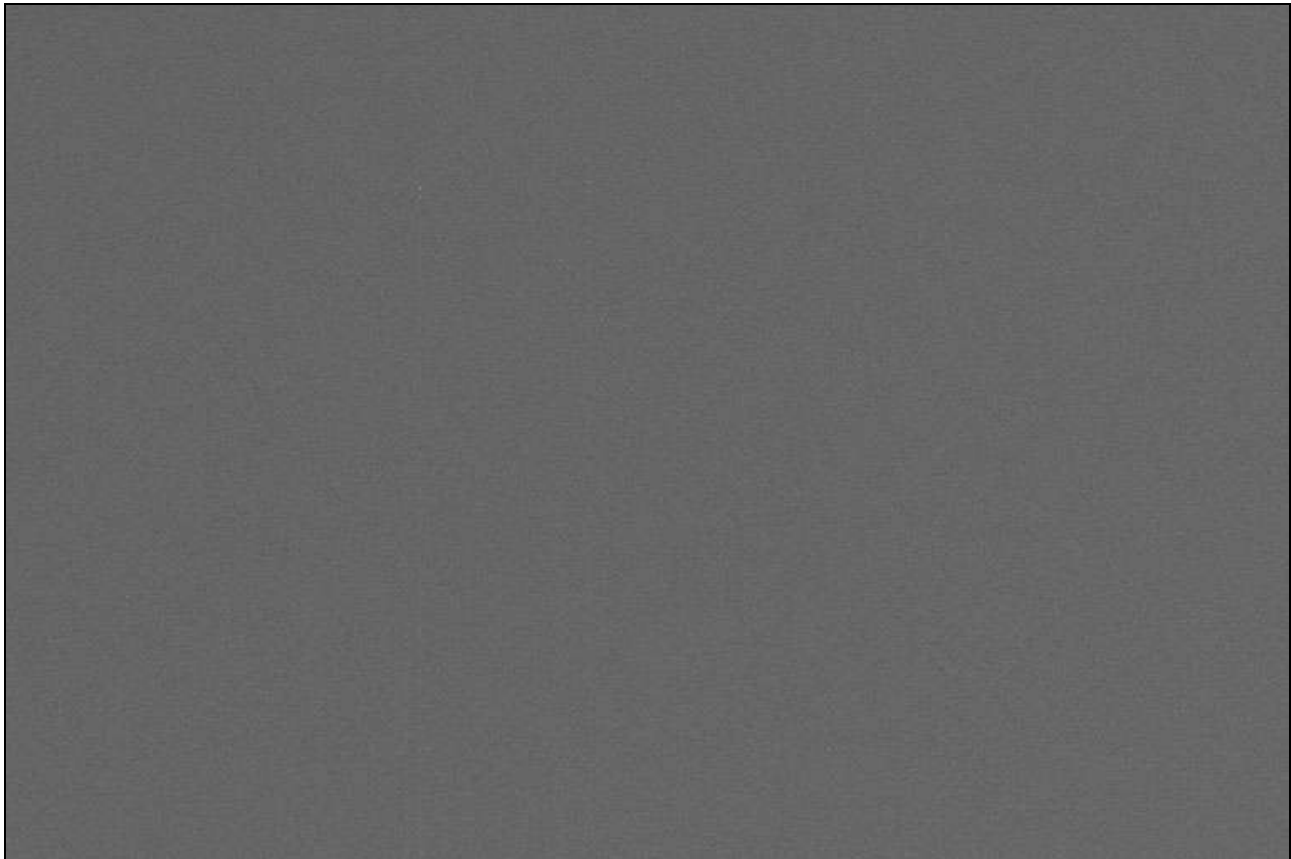


Figura 9- Mapa de enviesamento ou *offset*. Pedro Ré (2002).

Não uniformidade da sensibilidade à luz

A sensibilidade à luz não é idêntica para todos os elementos que constituem um sensor CCD. Se este for iluminado por uma fonte luminosa uniforme (por exemplo o céu crepuscular ou um ecrã branco) o resultado não é necessariamente uma imagem uniforme. Pode deste modo produzir-se um outro tipo de mapa que habitualmente é designado *flat field* ou mapa de iluminação uniforme. Este tipo de mapa é também utilizado na correcção de diversos defeitos que se produzem no plano focal de um telescópio: menor iluminação nos cantos da imagem (problema geralmente conhecido como *vignetting*), sujidade, entre outros (Figura 10).

Todos estes defeitos podem ser corrigidos com relativa facilidade. O pré-processamento de uma imagem obtida com um sensor CCD envolve uma série de procedimentos no computador utilizando *software* apropriado, nos quais se inclui a *subtracção* do mapa de corrente escura e mapa de *offset*, e a *divisão* pelo mapa de iluminação uniforme ou *flat field*. O resultado é uma imagem calibrada ou pré-processada. A soma ou média de diversas imagens pré-processadas produz sempre melhores resultados (ver adiante).

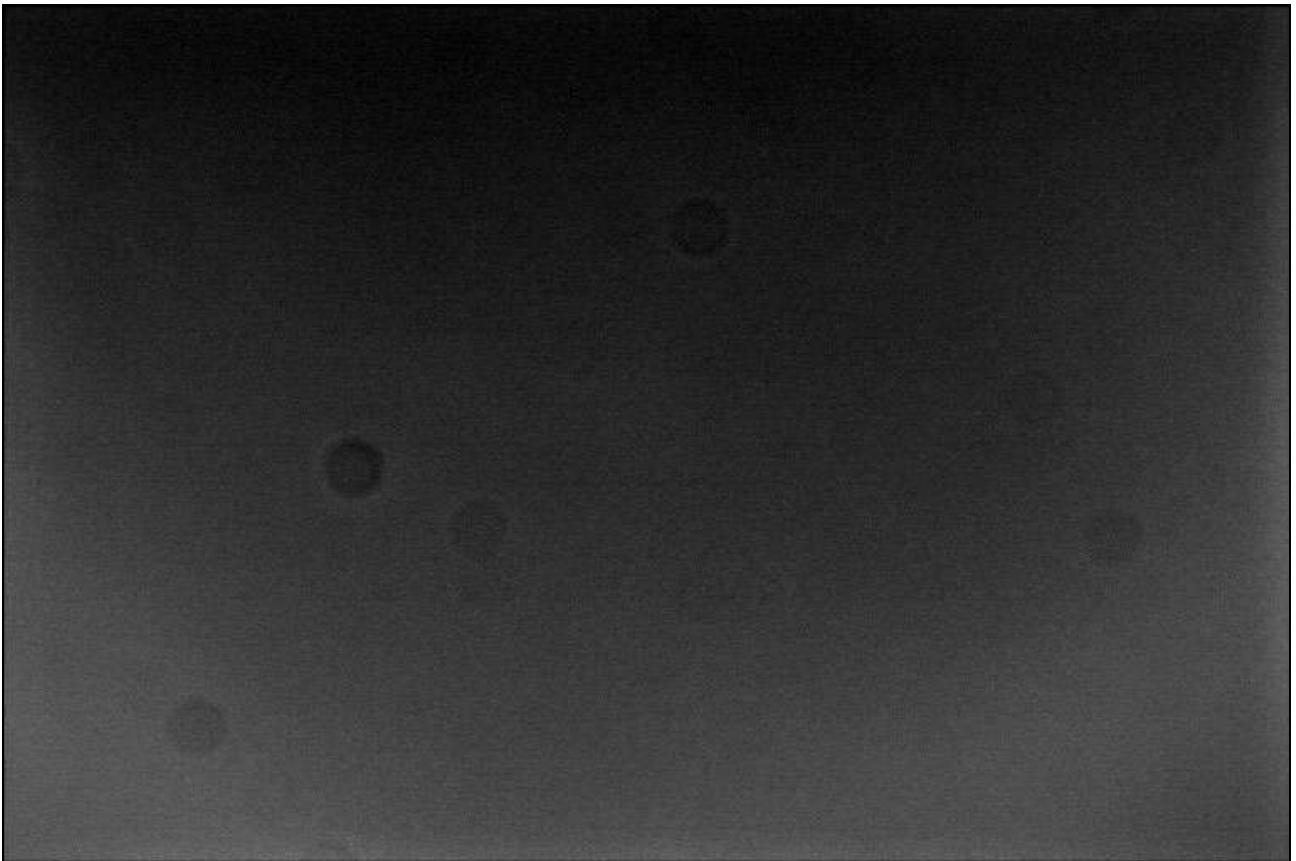


Figura 10- Mapa de iluminação uniforme ou *flat field*. Pedro Ré (2002).

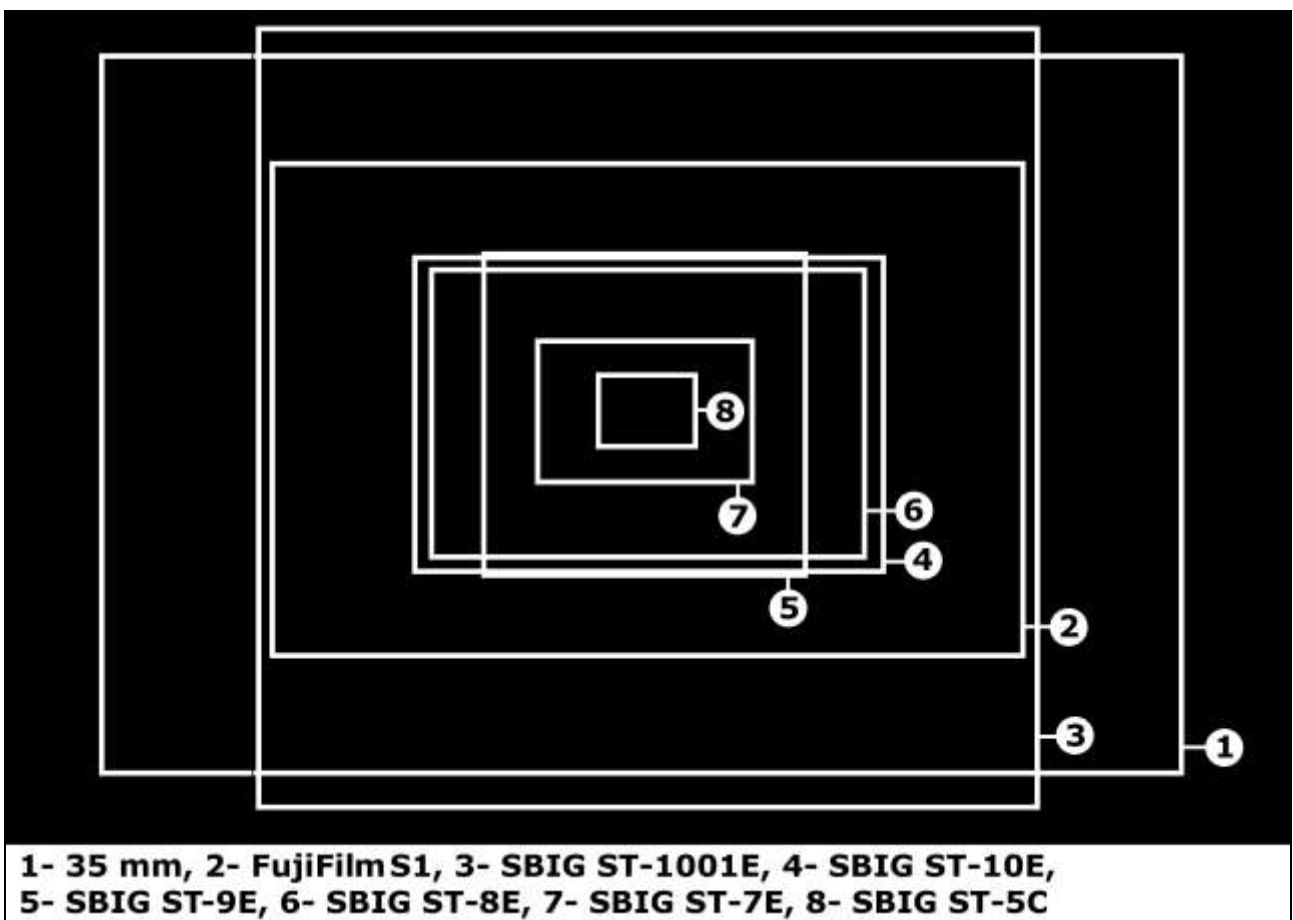


Figura 11- Dimensões relativas de alguns sensores CCD: 1- Filme 35 mm; 2- *FujiFilm* Fine Pix S1 Pro; 3- *SBIG* ST-1001E; 4- *SBIG* ST1-10E; 5- *SBIG* ST-9E; 6- *SBIG* ST-8E; 7- *SBIG* ST-7E, 8- *SBIG* ST-5C. Pedro Ré (2002).

As câmaras CCD podem ser acopladas a um telescópio de um modo idêntico a uma câmara fotográfica convencional. O sensor CCD deve ser colocado rigorosamente no plano focal do telescópio.

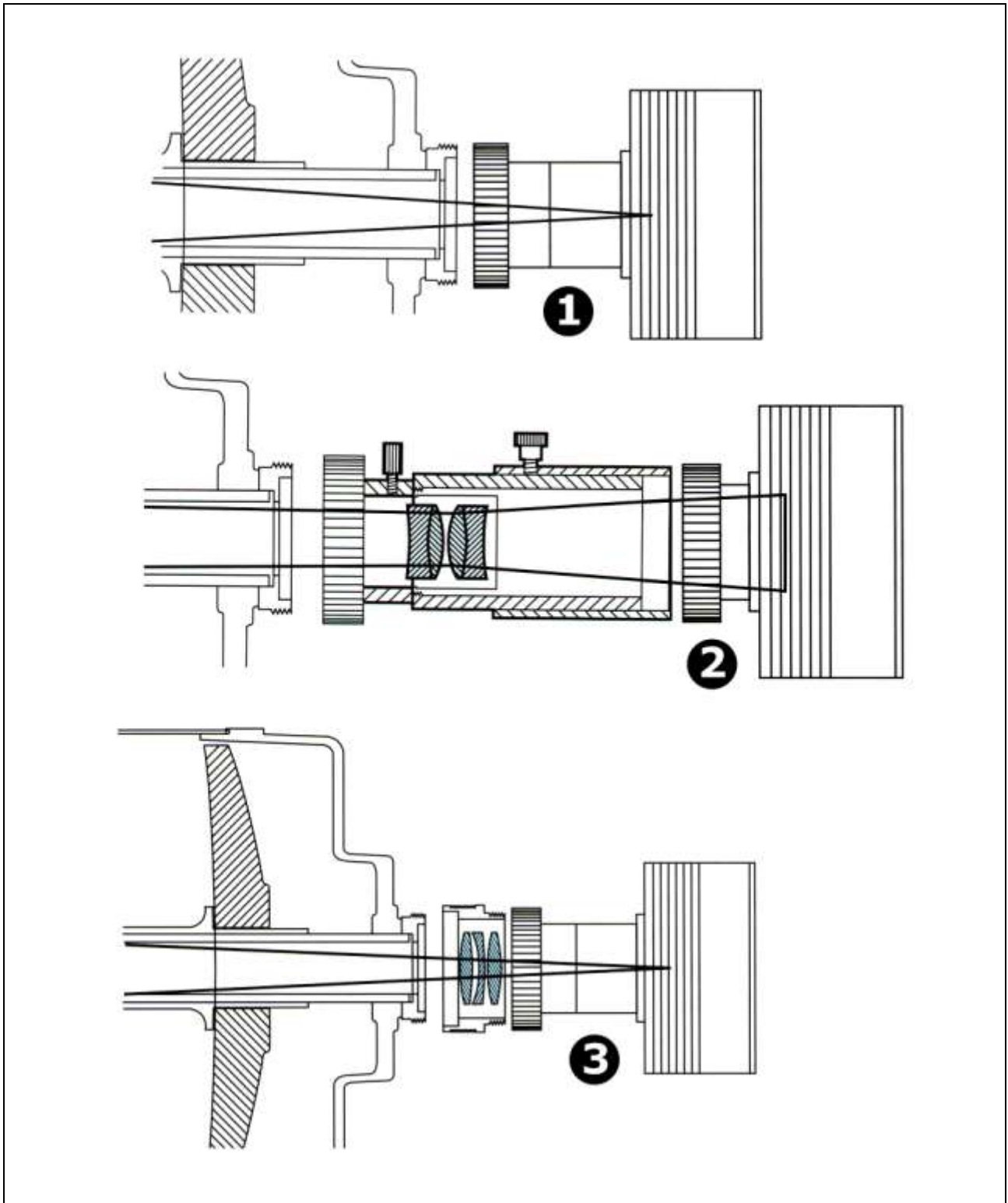


Figura 12- Como acoplar uma câmara CCD a um telescópio: 1- Foco principal; 2- Projecção (positiva); 3- Compressão.
Pedro Ré (2002).

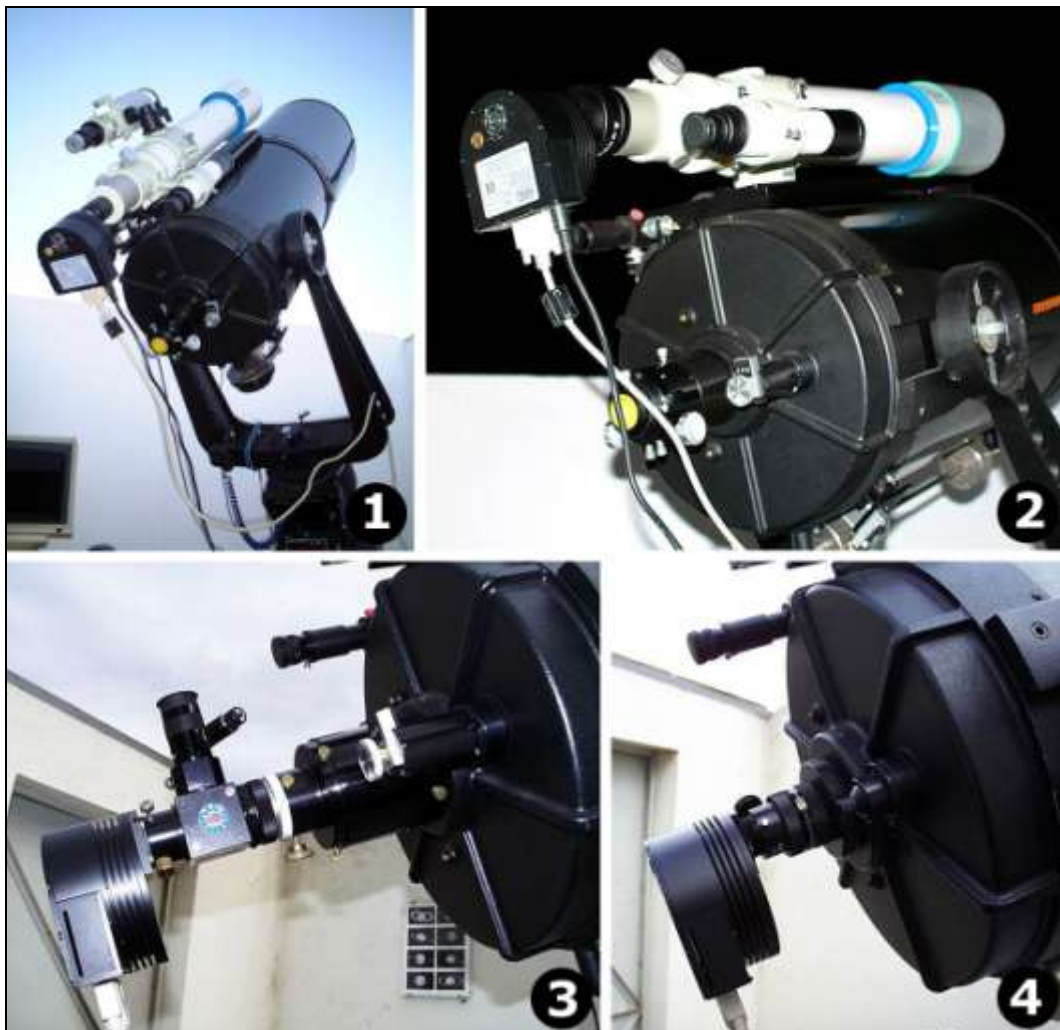


Figura 13- Exemplos de câmaras CCD acopladas a dois telescópios. 1- *SBIG ST-7*, Refractor apocromático *Takahashi FS102 f/8* (foco principal), 2- *SBIG ST-7*, Refractor apocromático *Takahashi FS102 f/6* (reductor/corrector), 3- *SBIG ST-7*, Telescópio Schmidt-Cassegrain C14, 350 mm *f/6* (reductor/corrector *Lumicon*) e *flip-mirror-finder*, 4- *SBIG ST-7*, Telescópio Schmidt-Cassegrain C14, 350 mm *f/4* (reductor/corrector *Meade*). Pedro Ré (2000/2002).

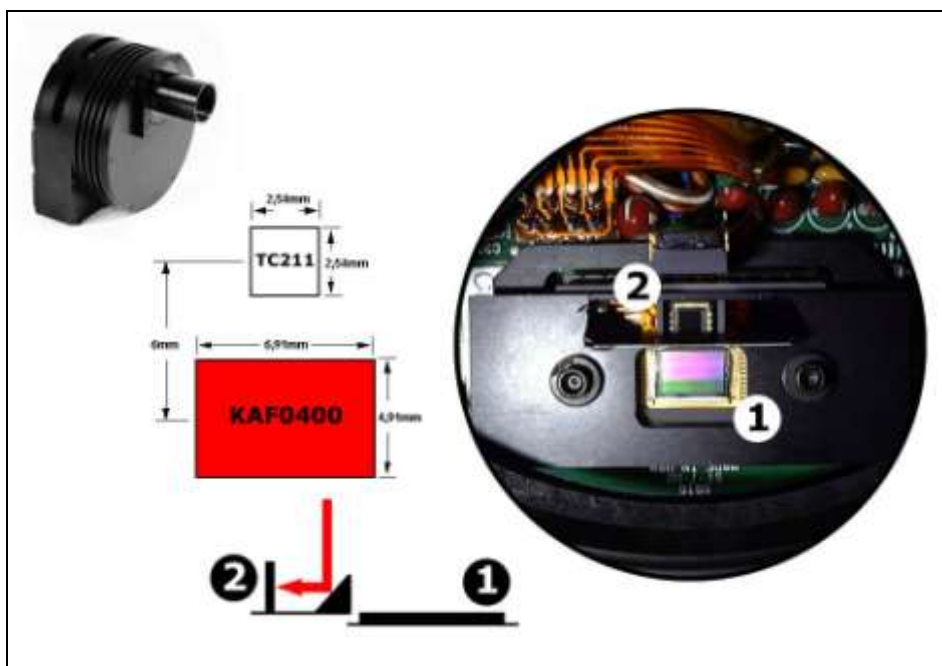


Figura 14- Câmara CCD *SBIG ST-7*. 1- Sensor CCD KAF0400 (integração), 2- sensor CCD TC211 (auto-guiagem). Pedro Ré (2002).