

Мираж, тепловизор и другие способы увидеть распределение температуры



Уваров А.В., проф., д.ф.-м.н.
Винниченко Н.А., снс, к.ф.-м.н.

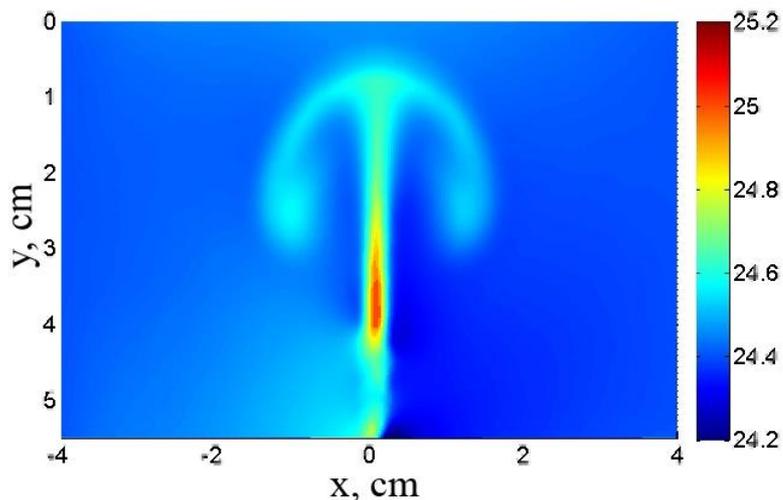


“Первый закон лабораторных исследований”:

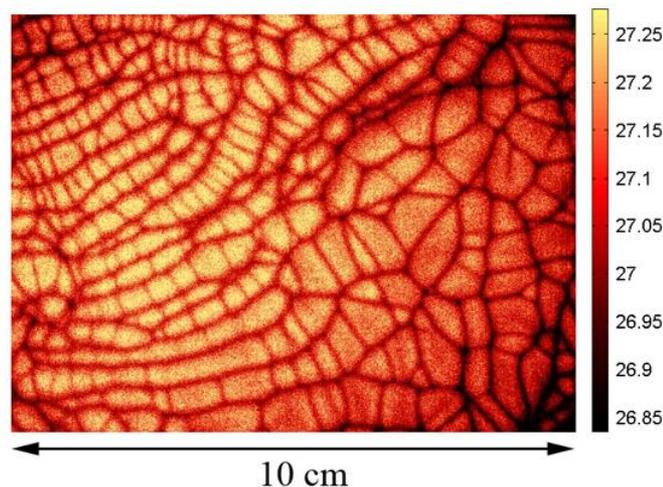
Горячая колба выглядит так же, как и холодная.

Это не совсем так: оптическими методами можно не только отличить холодную колбу от горячей, но и измерить распределение температуры в течении прозрачной жидкости или газа.

Конвективная струя при нагреве горизонтальной проволоки в воде:
теневого фоновый метод

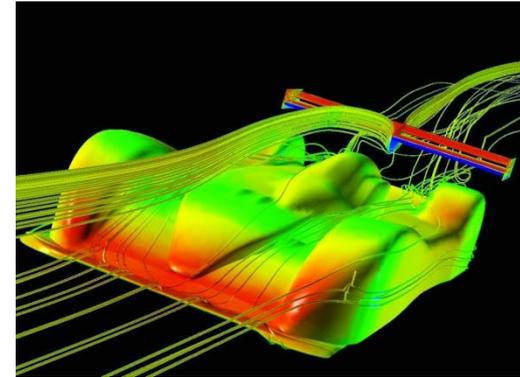
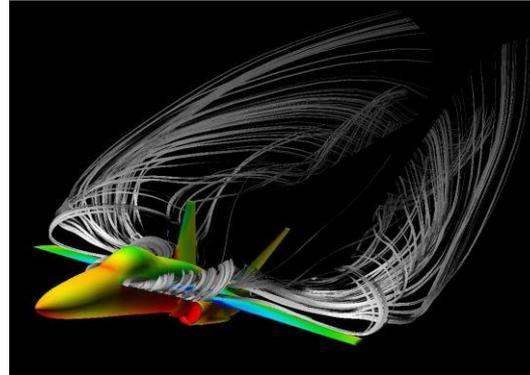


Поверхность испаряющегося этилового спирта:
инфракрасная термография



Зачем в современной гидро- и аэродинамике измерять поле температуры?

Гидро- и аэродинамика — это не только обтекание самолетов и спортивных машин скоростными потоками воздуха.



Еще это охлаждение электронных плат в гаджетах, комнатные обогреватели и кондиционеры, пламена, заморозка продуктов в пищевой промышленности, циркуляция воды в озерах и многое другое.



конвекция и конденсация над озером и над чашкой



тепловые трубки для теплоотвода внутри ноутбука



Почему температуру трудно измерить?

Вспомним определение: температура это мера средней кинетической энергии хаотического движения молекул. Получается, нужно измерить скорость каждой молекулы, вычесть среднюю скорость и усреднить кинетическую энергию?

Почти все измерения — косвенные.

Жидкостной термометр — измеряем не температуру, а высоту столбика жидкости, которая с ней связана.

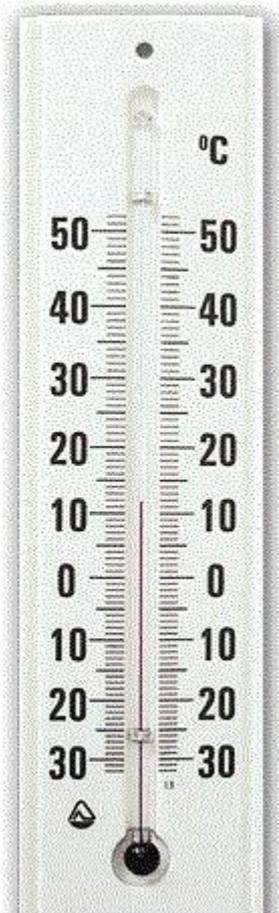
Помимо расширения жидкости, есть:

- 1) капиллярные явления в трубке,
- 2) тепловое расширение стекла,
- 3) зависимость коэффициентов теплового расширения от температуры

На практике термометры градуируют по формуле

$$\Delta h = 1.275 \frac{V(\beta_{жс} - \beta_{ст})}{d^2} \Delta t$$

— математическая модель, лежащая в основе измерения



Революция в экспериментальной гидродинамике, произошедшая в последние 20-30 лет, связана с переходом от качественной визуализации течений и измерений зондами к количественным измерениям двух- и трехмерных распределений величин.

Визуализация

между величиной A , которая нас интересует, и величиной B , которую мы можем непосредственно измерить, есть связь.

Измерение

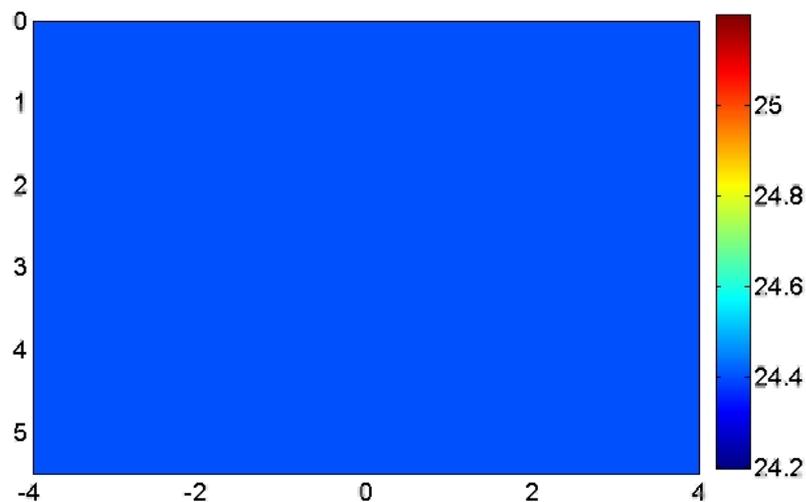
Связь между величинами A и B не просто существует, она однозначна и известна нам. Точность косвенного измерения величины A определяется не только точностью измерения B , но и точностью связи $A=A(B)$.

Пример:

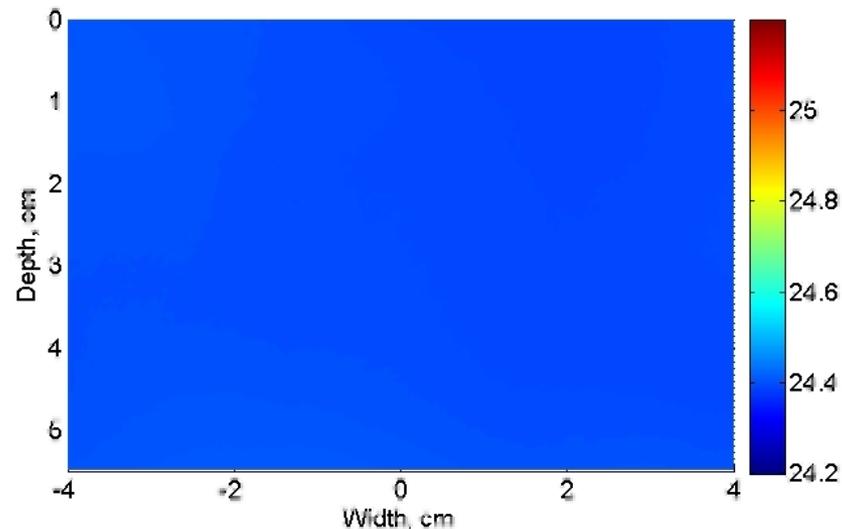
конвективная струя от горизонтальной нагретой проволоки,
натянутой в 71 мм под поверхностью воды

Температура (°C)

Численное моделирование



Эксперимент (теневой фоновый метод)



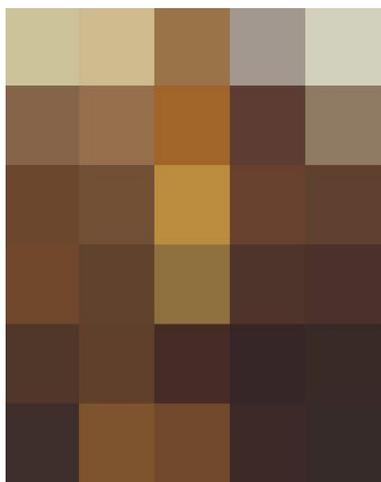
Разрешение 565x344

— почти 200 000 точек!

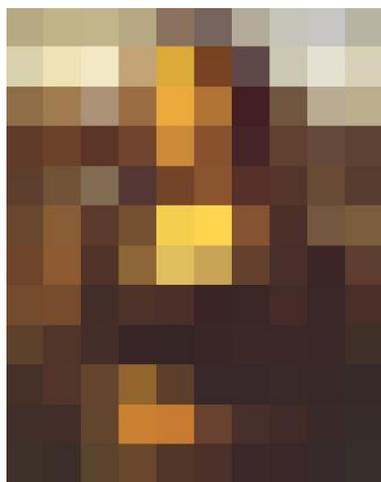
Теперь мы умеем получать экспериментальные данные с разрешением,
сравнимым с разрешением численного моделирования — можно
напрямую сравнивать.

Почему пространственное разрешение так важно?

5x6 датчиков



10x12 датчиков



20x24 датчиков



оригинал

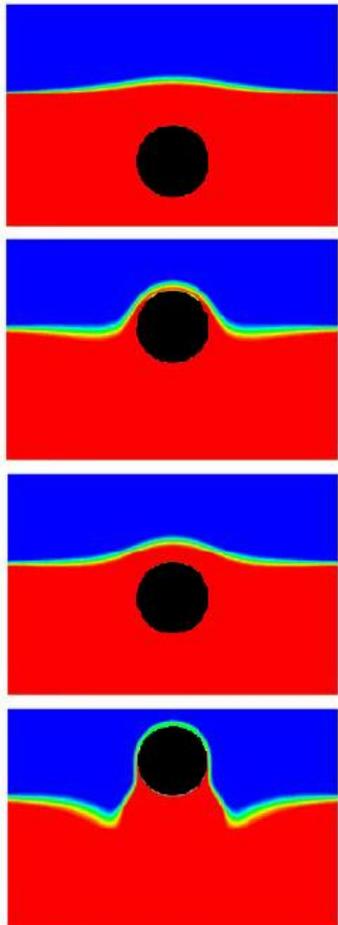


Рекорд по количеству отдельных датчиков — 340 (установка для измерения деформаций крыла компании Airbus). Это огромная связка проводов к датчикам и огромный труд по их калибровке. Если просто нанести на поверхность крыла пятнышки краски и фотокамерой фиксировать их смещения, можно измерить деформацию с разрешением, по крайней мере, $200 \times 300 = 60\,000$ точек.

Более того, в отличие от зондов, оптические методы не возмущают течение.

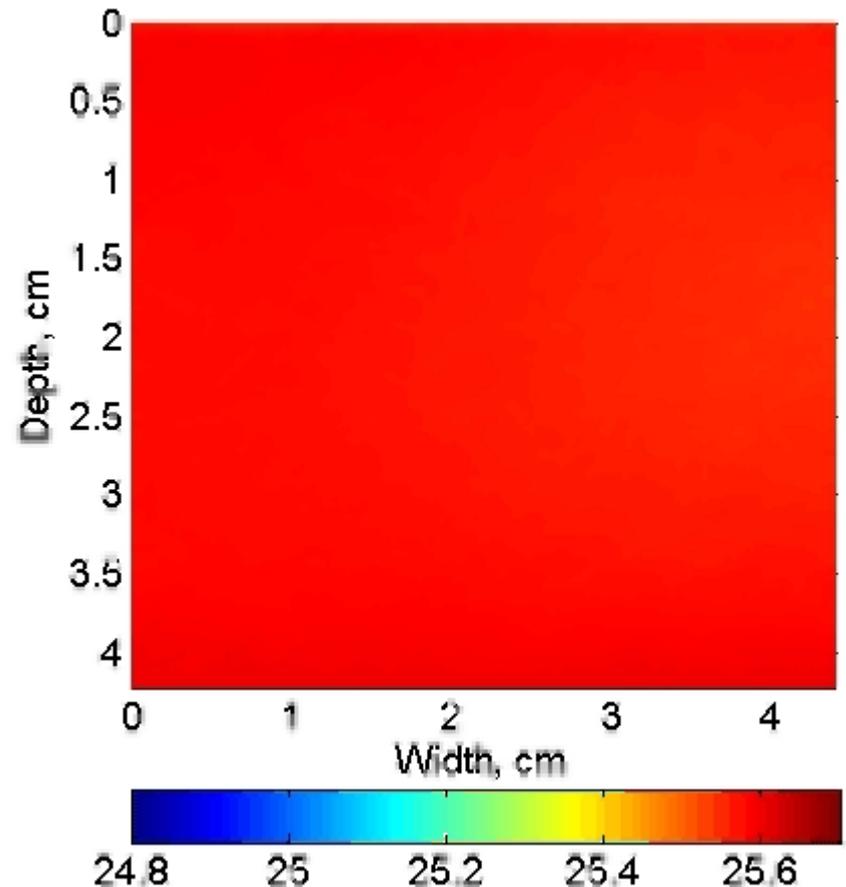
Пример: измерение вертикального профиля температуры под поверхностью испаряющейся воды

зондовый метод:
термопара движется
к поверхности со
стороны жидкости

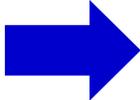
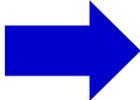
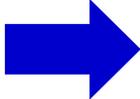
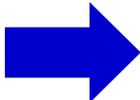


два неприятных
эффекта:
1) из-за
поверхностного
натяжения зонд
деформирует
поверхность воды
2) с выходом части
зонда на воздух
начинается
испарение, которое
охлаждает зонд

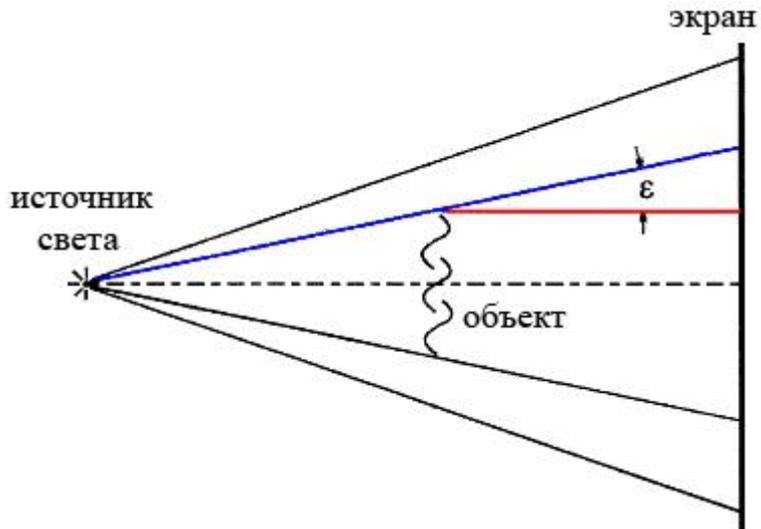
Теневой фоновый метод



Оптические величины, которые зависят от температуры

показатель преломления		рефракционные методы: теневого, шлирен, теневого фонового, ...
фаза когерентного излучения		интерферометрия
характеристики излучения частиц, подмешанных в течение (интенсивность, длина волны, время свечения)		лазерно-индуцированная флуоресценция, использование фосфорных порошков, жидких кристаллов
интенсивность излучения самого объекта		инфракрасная термография, пирометрия

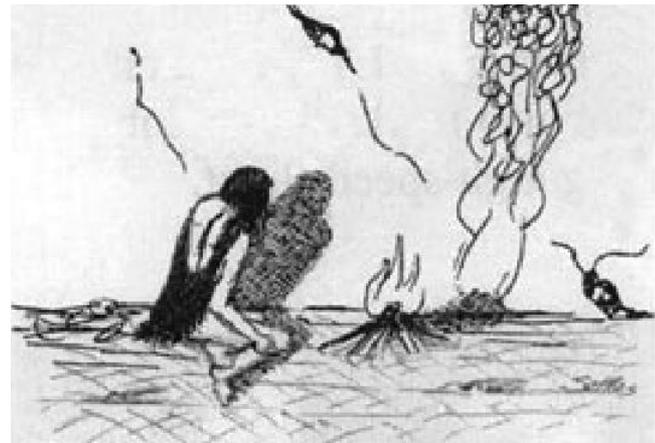
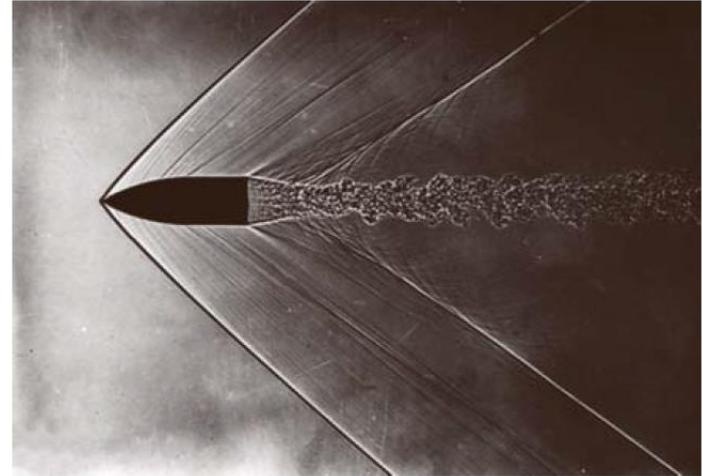
Теневой метод



Истоки теряются в веках.

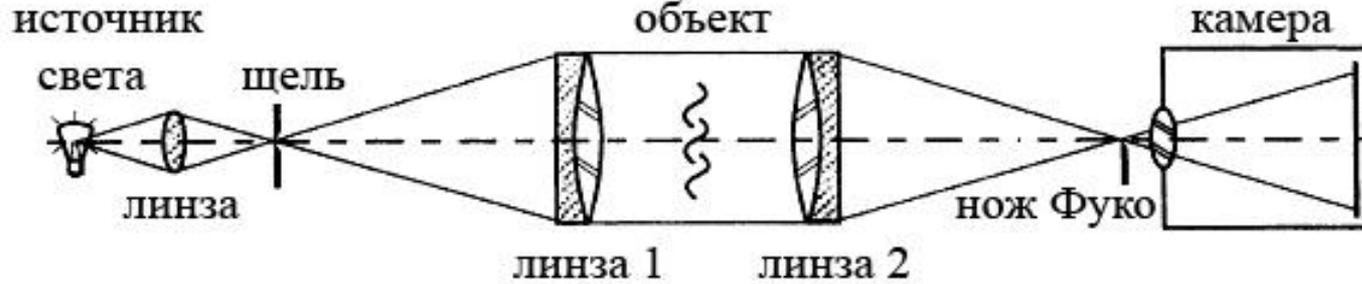
Но в числе первых пионеров были Роберт Гук и Жан-Поль Марат (до того, как занялся революционной деятельностью).

теневой снимок пули, летящей со сверхзвуковой скоростью



“пещерный” теневой метод
(источник света — солнце на закате)

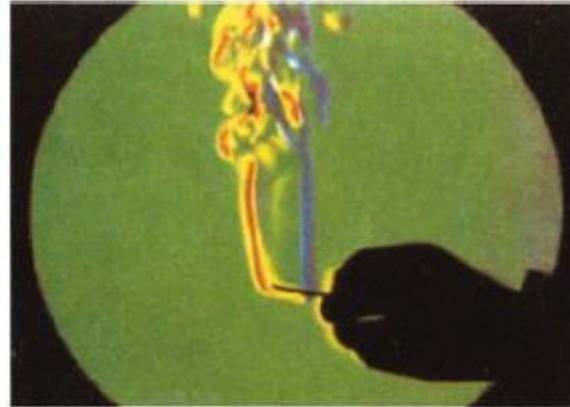
Шлирен (нем. Schlieren — дрожание воздуха)



Август Теплер,
Эрнст Мах,
вторая половина 19 в

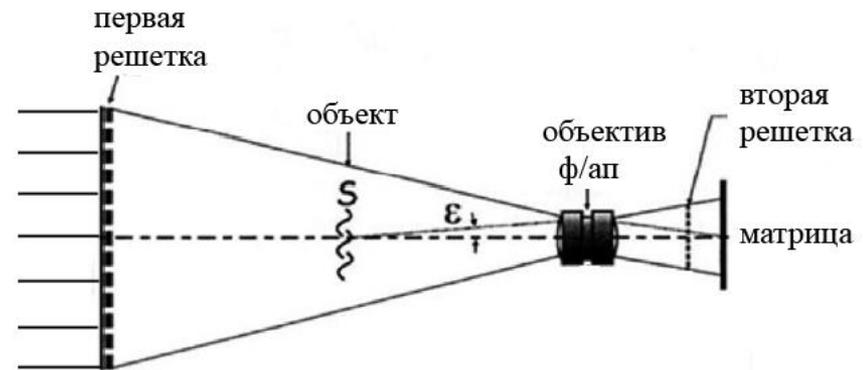


пуля, проходящая
через пламя свечи



цветной шлирен:
если вместо ножа
Фуко поставить
фильтр с плавным
переходом цвета

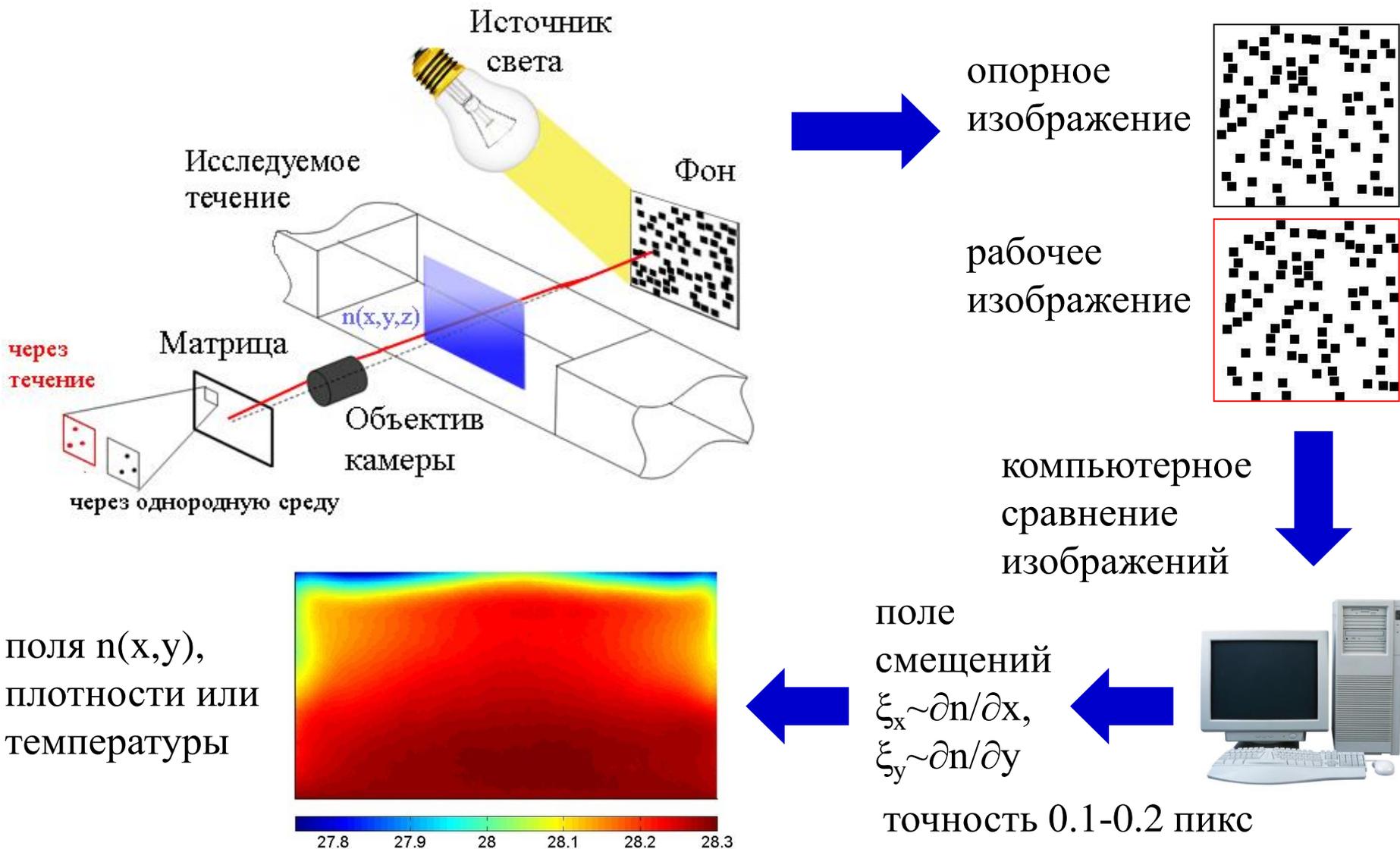
шлирен с двумя
совпадающими
решетками:
много источников
света и ножей Фуко



Теневой фонный метод (Background Oriented Schlieren)

1999-2002

две группы в Германском Авиакосмическом Центре (DLR) и в Кембридже



Визуализация

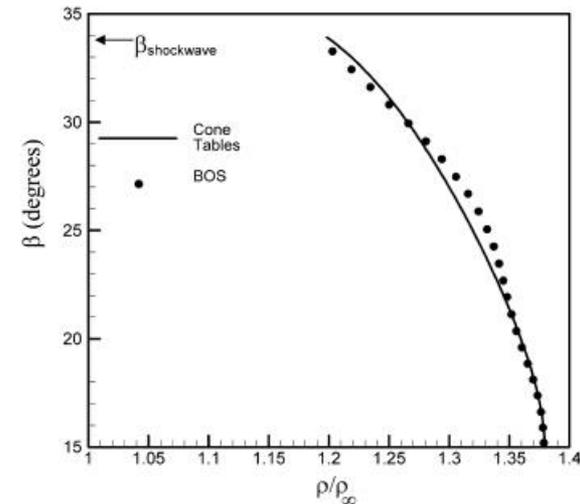
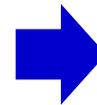
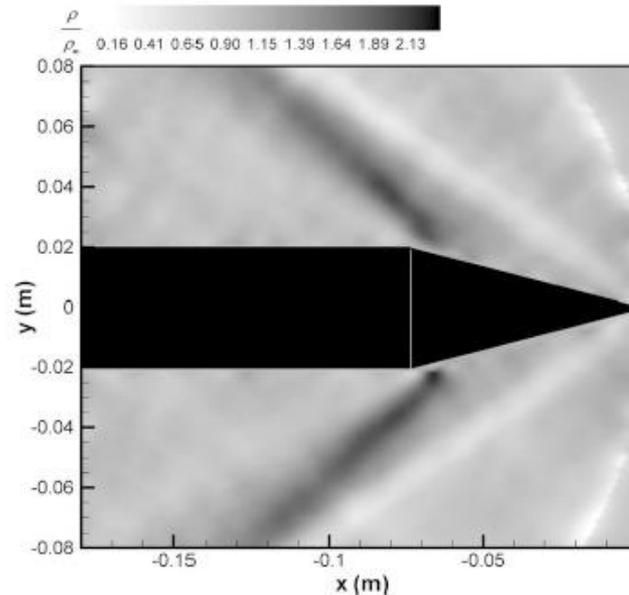


обтекание
цилиндра с
конусом на конце
сверхзвуковым
потокком воздуха

Гораздо больше информации!
Но основную сложность
теперь представляет не
экспериментальная процедура,
а компьютерный анализ
изображений.

Измерение

Шлирен



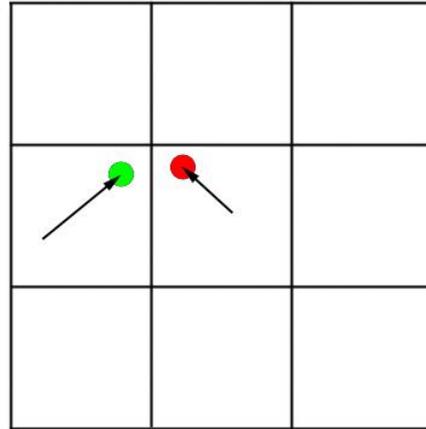
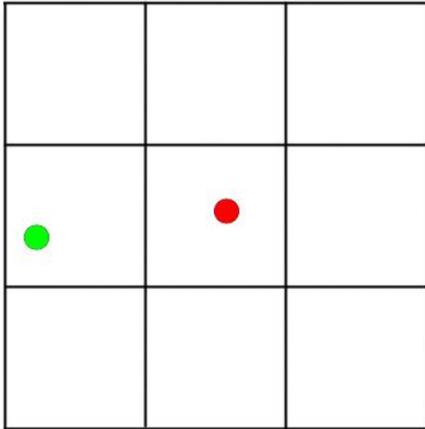
Теневой фоновый метод (поле плотности)

Обработка изображений: определение смещения

слежение за отдельными пятнами — то, что делал бы человек

снимок 1

снимок 2



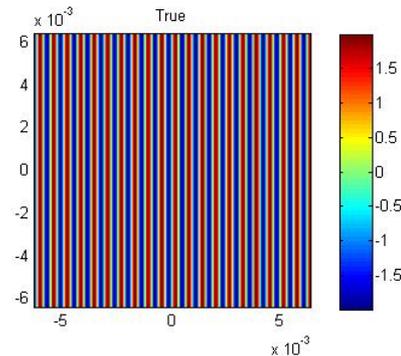
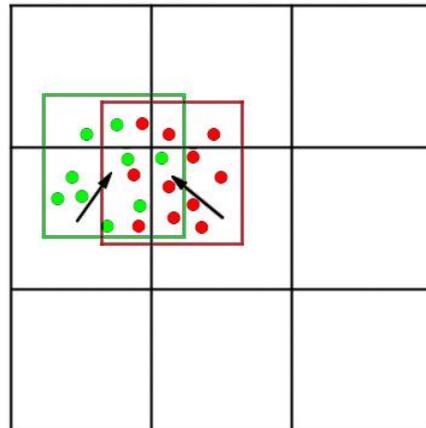
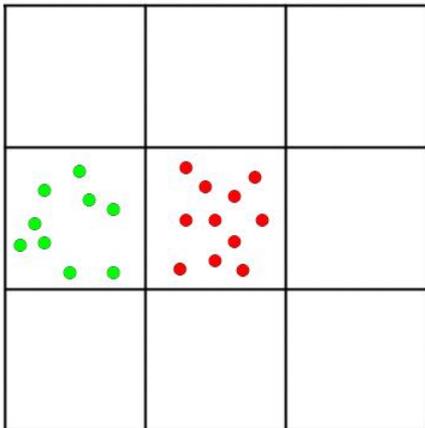
но при больших смещениях
есть риск перепутать
соседние пятна и получить
неверные значения смещения

кросс-корреляционный метод — слежение за группами пятен

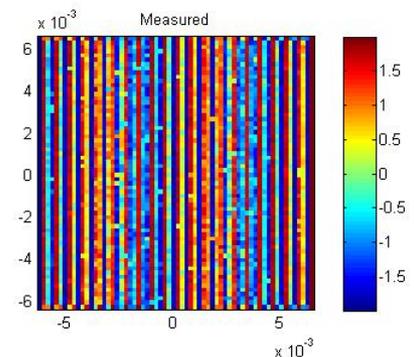
снимок 1

снимок 2

точное поле смещения

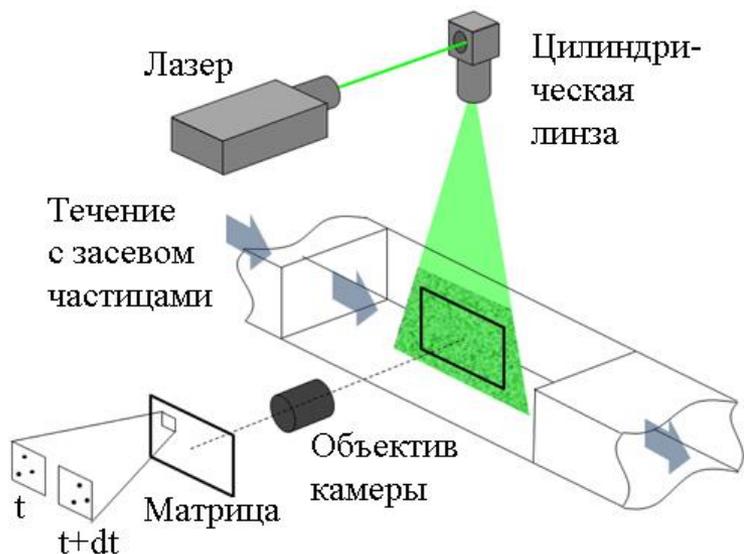


результат обработки

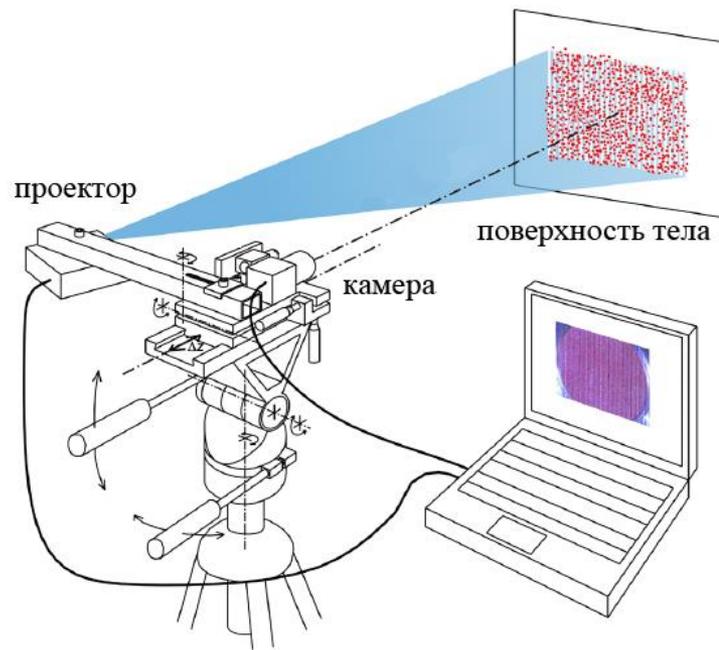


Задача определения смещения по двум изображениям: не только теневой фоновый метод

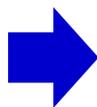
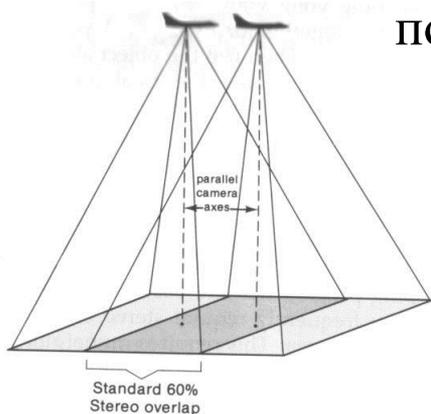
измерение полей скорости методом PIV



измерение деформации твердого тела



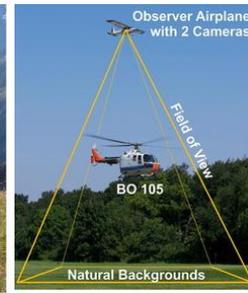
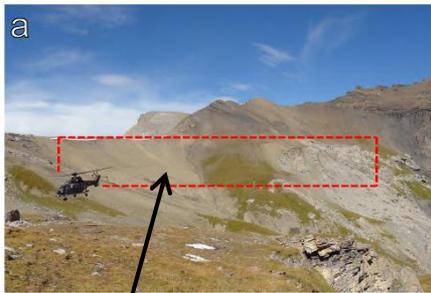
построение 3D карты местности по данным аэрофотосъемки



ТФМ с естественным фоном для больших объектов не нужны линзы или зеркала размером с исследуемый объект



кадр из фильма "Top Gun"



фон

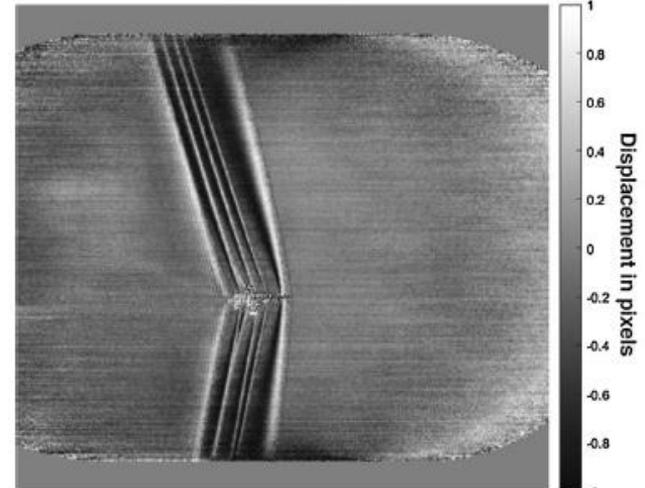
самый большой BOS-фон в истории:

ТОЛЬКО
качественные
результаты
(визуализация)
из-за сложного
трехмерного
течения

фон - хромосфера Солнца,
снятая через фильтр для
линии ионизованного Ca
(393.4 нм)

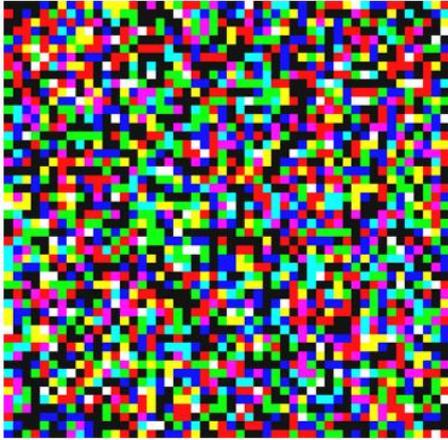


учебный реактивный
Northrop T-38C



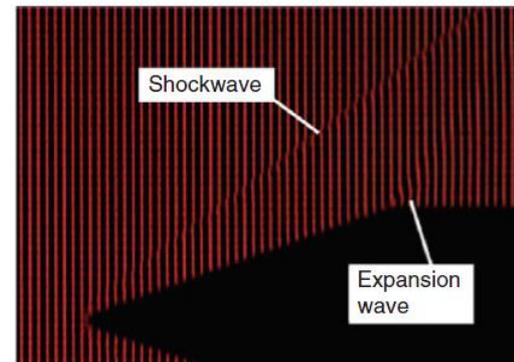
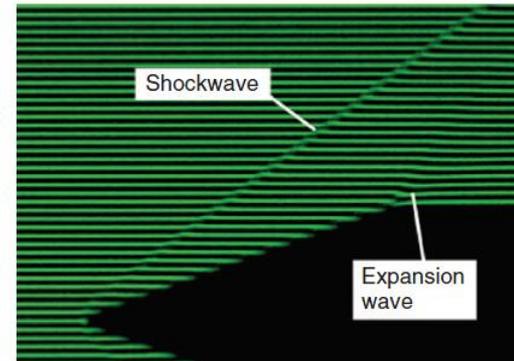
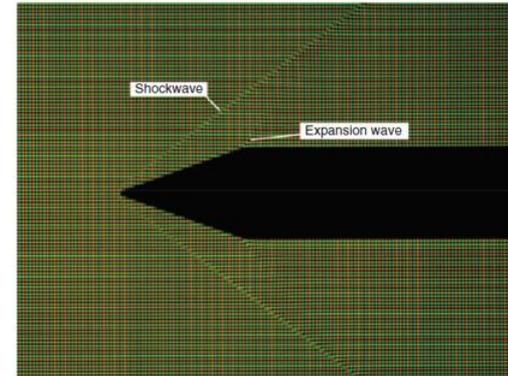
Какой фон и метод обработки лучше использовать?

использование цвета

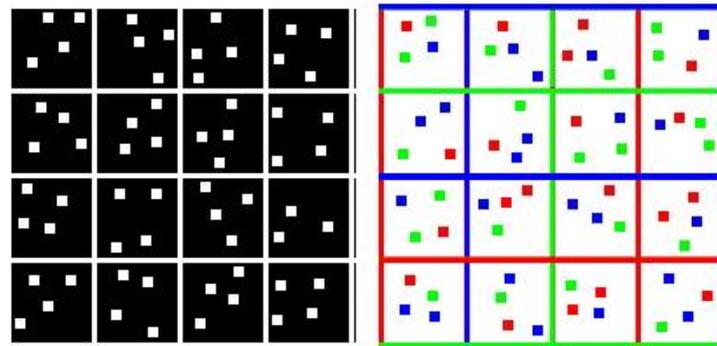


цветной фон с усреднением информации по разным цветам

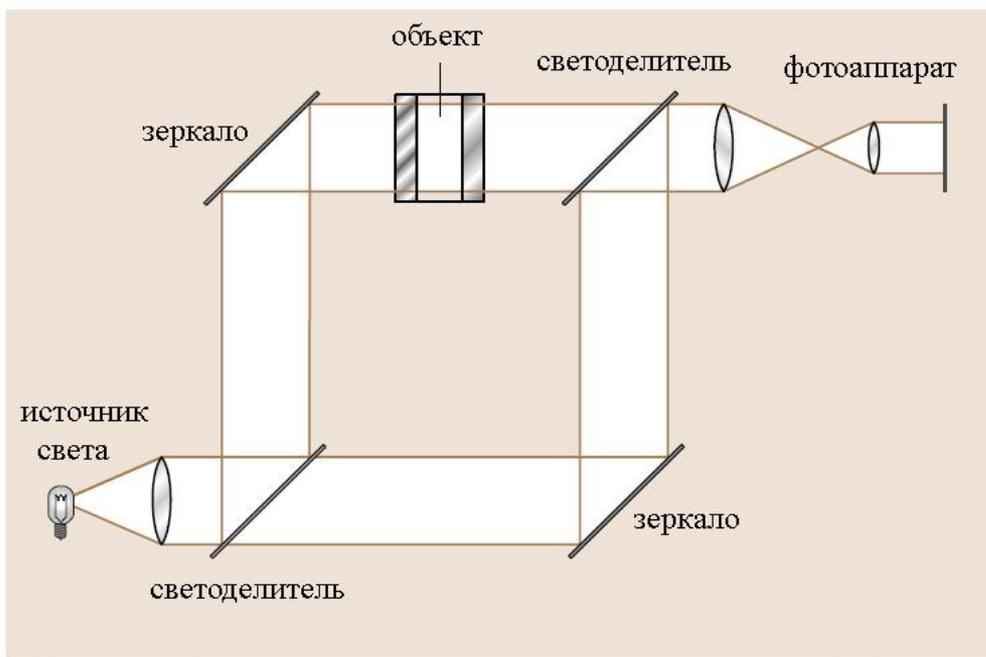
системы цветных полос и методы обработки, взятые из интерферометрии



комбинации полос и пятен, слежение за отдельными пятнами



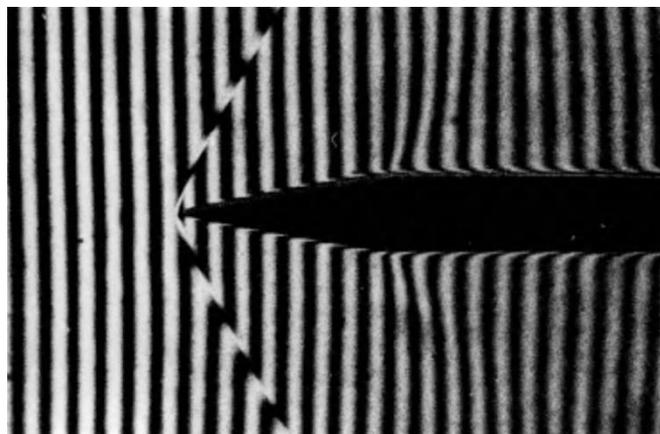
Интерферометрия



интерферометр Маха-Цендера



конвекция в зазоре между двумя цилиндрами (внутренний цилиндр горячий)



обтекание клина сверхзвуковым потоком

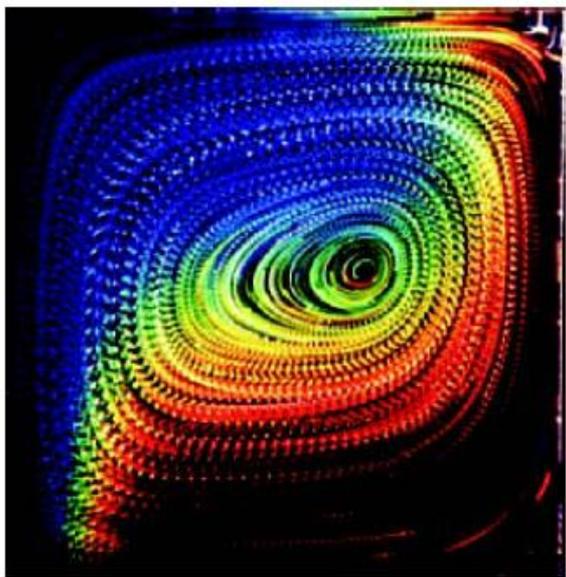
Очень высокая чувствительность. Сложно настраивать, нужна защита от вибраций. Сложно (но можно) получить количественные данные.

Термография с использованием термотропных частиц

жидкие кристаллы

изменение цвета с

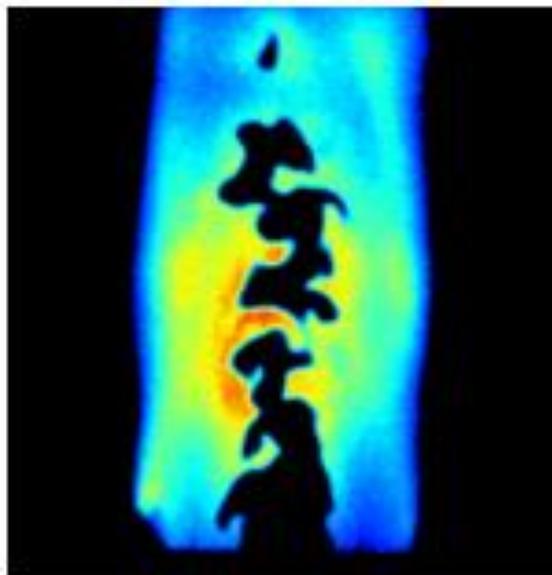
повышением температуры



конвекция в сосуде,
левая стенка горячая,
правая холодная

лазерно-индуцированная флуоресценция (LIF)

облучение лазером одной длины волны вызывает флуоресцентное излучение другой длины волны, характеристики которого зависят от температуры и концентрации частиц



измерение
температуры
пламени с
помощью LIF

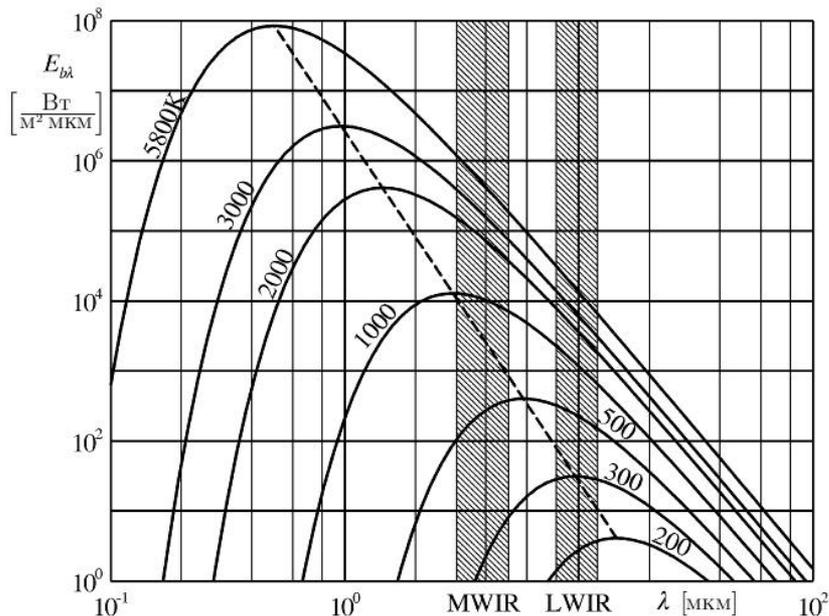
Для получения значений температуры нужна калибровка.

Для каждого интервала температуры — свое вещество.

Зато можно одновременно измерять поля скорости по смещению частиц.

Инфракрасная термография

спектр излучения абсолютно черного тела



два основных
спектральных
диапазона:
MWIR 3-5 мкм
LWIR 8-12 мкм

охлаждение
сенсора, чтобы
не мешало его
собственное
излучение

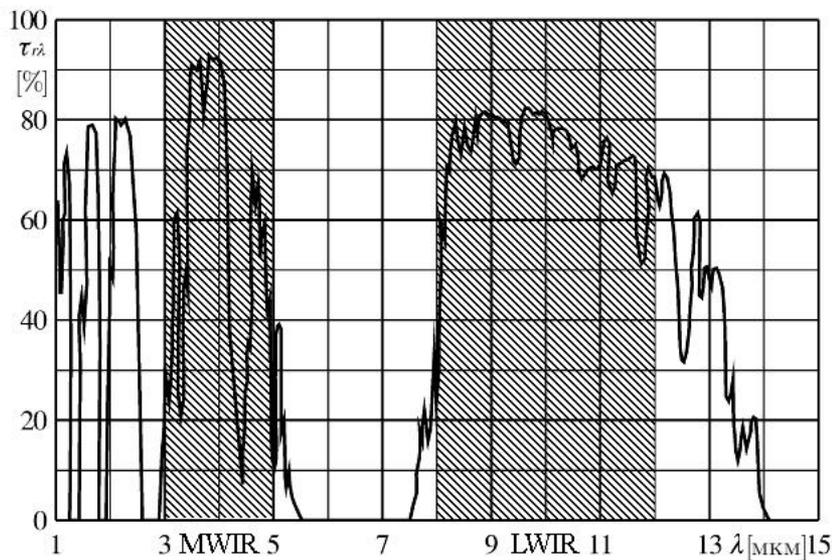
1950-е — первые
камеры для военных



1970-е — энергетический кризис,
кампания правительства Швеции по
энергосбережению

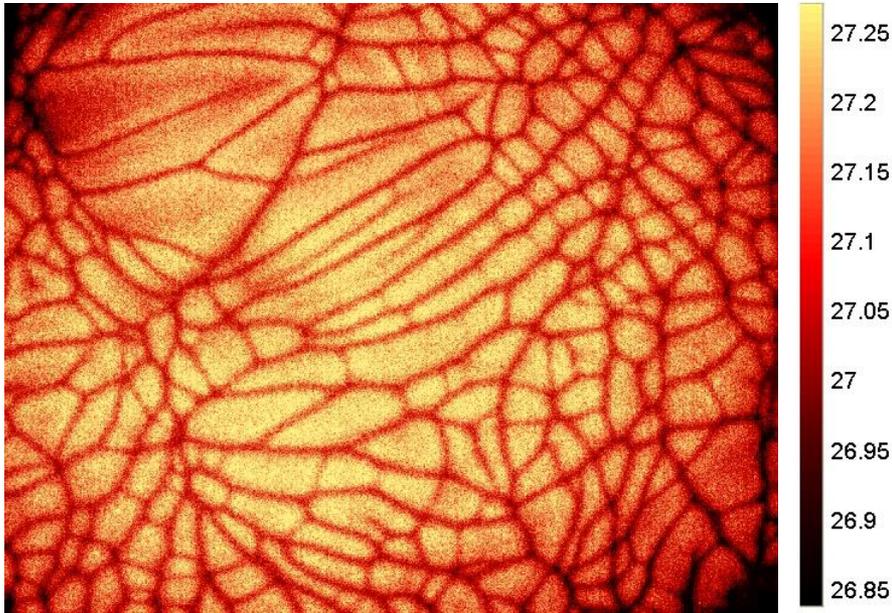
1990-е — начало широкого применения в
аэродинамике

коэффициент пропускания 1 км воздуха



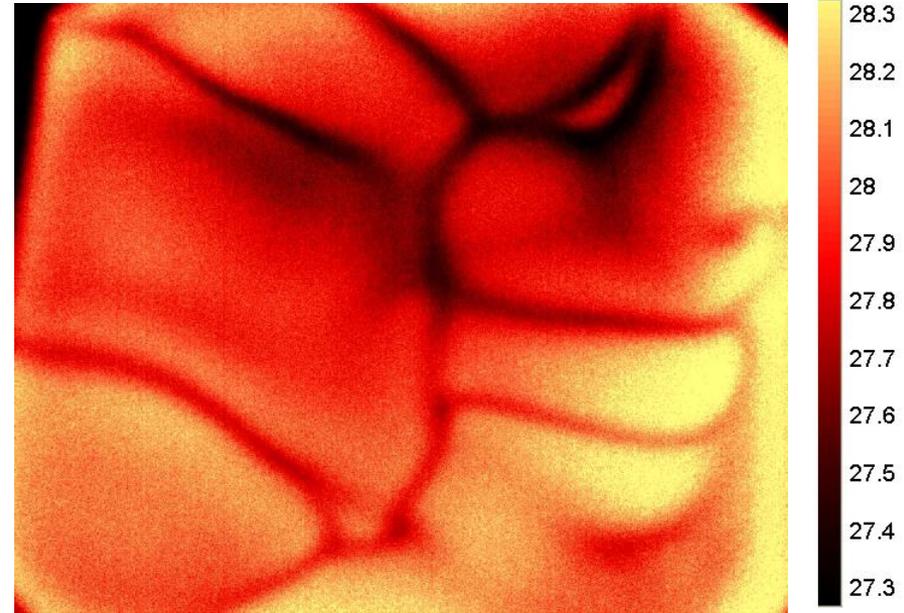
Инфракрасная термография поверхности

Испарение этилового спирта



← 10 см →

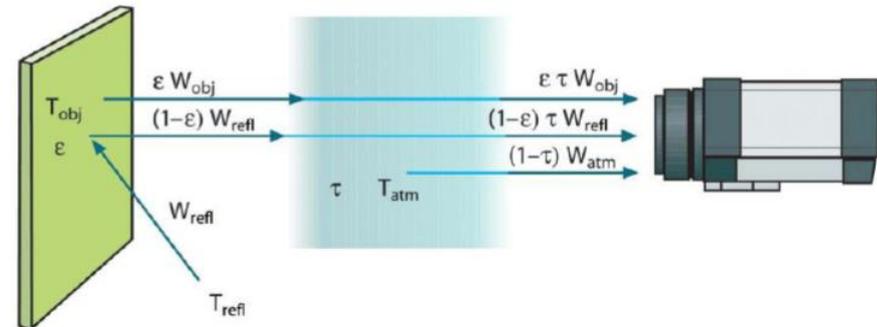
Испарение дистиллированной воды



Тепловизор измеряет поток излучения

$$W = \varepsilon \tau W_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau W_{refl} + (1 - \tau) W_{atm}$$

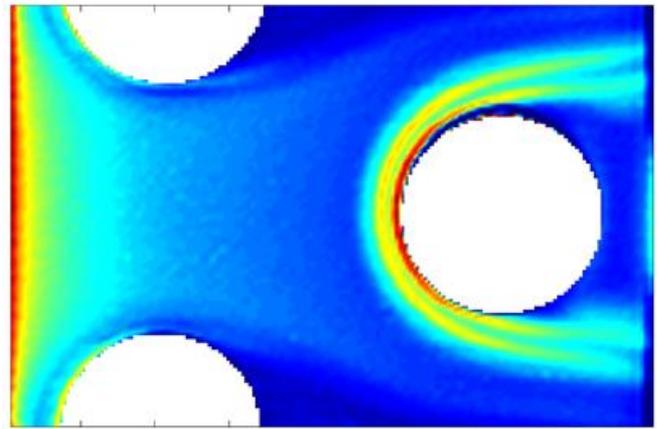
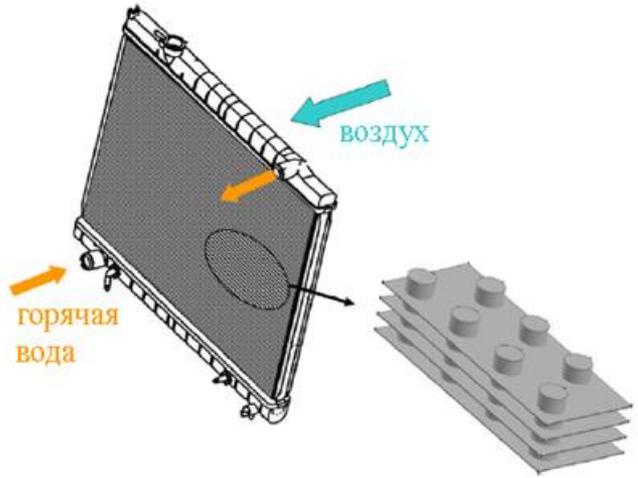
но, если знать ε , τ , T_{refl} и T_{atm} , можно пересчитать в температуру T_{obj}



Измерение тепловых потоков

$$cm \frac{dT}{dt} = Q = qS$$

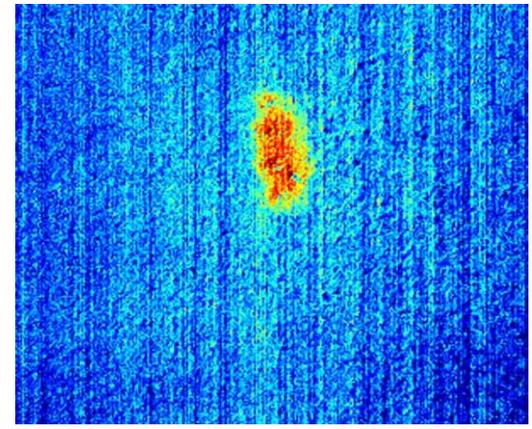
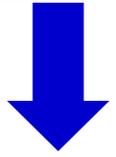
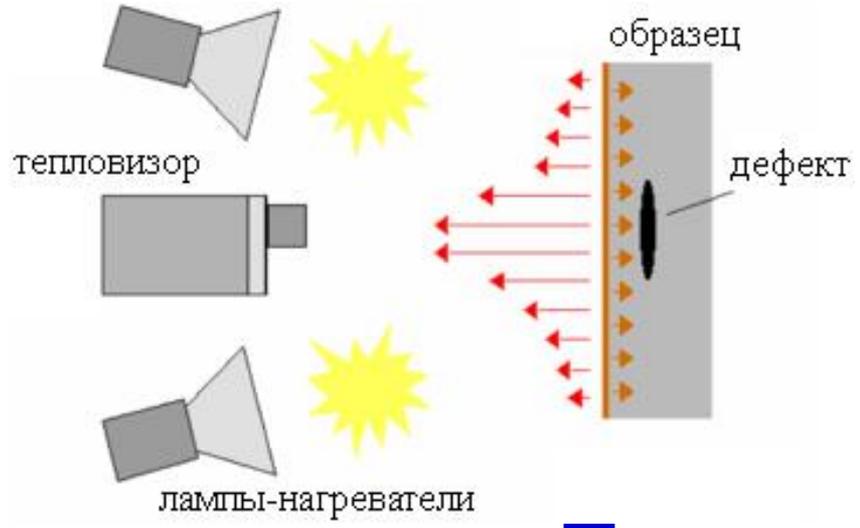
измерение теплотвода для модели автомобильного радиатора



коэффициент теплопередачи [Вт/(м²К)]

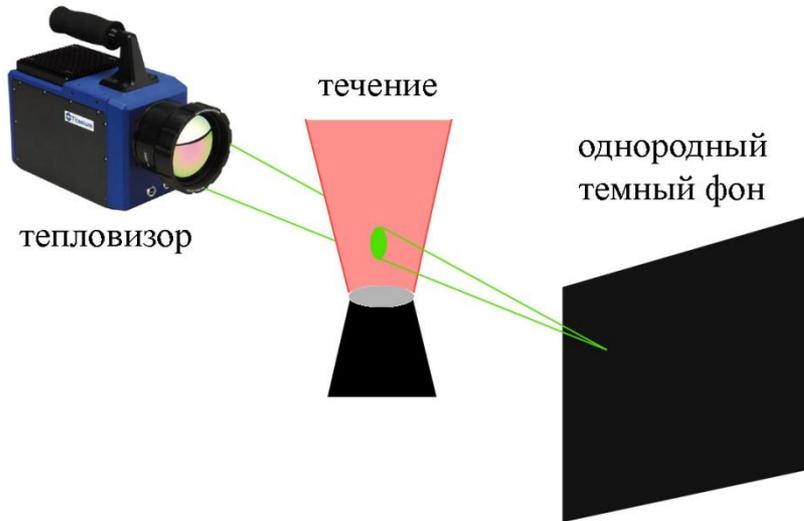
$$h = \frac{q}{T - T_0}$$

Неразрушающий контроль



Инфракрасная термография “на просвет”

можно измерять поле температуры в течении воздуха



Температура (°C) в струе горячего воздуха от строительного фена

нужно просто выразить из того же уравнения другое слагаемое:

$$W_{atm} = \frac{1}{1-\tau} W - \frac{\varepsilon\tau}{1-\tau} W_{obj} - \frac{(1-\varepsilon)\tau}{1-\tau} W_{refl}$$

знаем ε , τ , T_{refl} и T_{obj} — можем найти T_{atm}

Все благодаря тому, что воздух не совсем прозрачен — есть немного углекислого газа, который поглощает ИК-излучение в MWIR.

