

Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике  
«Физические процессы в космосе и околоземной среде»  
Иркутск, 14-18 сентября 2015 г.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ  
КРУПНОГО СОЛНЕЧНОГО ТЕЛЕСКОПА:  
ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Гелиогеофизический комплекс РАН  
Институт солнечно-земной физики СО РАН  
г. Иркутск*

Д.Ю. Колобов, В.М. Григорьев, М.Л. Демидов, С.А. Чупраков,  
В.И. Скоморовский, П.Г. Ковадло, В.А. Пуляев, А.Ю. Шиховцев

# Солнце

- наиболее значимый астрономический объект для человечества
- фундаментальный аспект:
  - особая лаборатория для детальных исследований процессов взаимодействия плазмы и электромагнитных полей
  - наблюдаемые условия не могут быть воспроизведены ни в эксперименте, ни в текущих модельных вычислениях
  - явления на других звездах имеют свои аналоги на Солнце; но только на Солнце они доступны для прямых наблюдений (вспышки, корональные выбросы массы, процессы генерации и всплытия магнитного потока, астросейсмология)
- прикладной аспект:
  - определяет физические условия в межпланетной среде и околоземном космическом пространстве – главный возмутитель космической погоды
  - изучение влияния на климат Земли
  - термоядерный синтез

# Солнце

- наиболее значимый астрономический объект для человечества
- фундаментальный аспект:
  - особая лаборатория для детальных исследований процессов взаимодействия плазмы и электромагнитных полей
  - наблюдаемые условия не могут быть воспроизведены ни в эксперименте, ни в текущих модельных вычислениях
  - явления на других звездах имеют свои аналоги на Солнце; но только на Солнце они доступны для прямых наблюдений (вспышки, корональные выбросы массы, процессы генерации и всплытия магнитного потока, астросейсмология)
- прикладной аспект:
  - определяет физические условия в межпланетной среде и околоземном космическом пространстве – главный возмутитель космической погоды
  - изучение влияния на климат Земли
  - термоядерный синтез

# Солнце

- наиболее значимый астрономический объект для человечества
- фундаментальный аспект:
  - особая лаборатория для детальных исследований процессов взаимодействия плазмы и электромагнитных полей
  - **наблюдаемые условия не могут быть воспроизведены ни в эксперименте, ни в текущих модельных вычислениях**
  - явления на других звездах имеют свои аналоги на Солнце; но только на Солнце они доступны для прямых наблюдений (вспышки, корональные выбросы массы, процессы генерации и всплытия магнитного потока, астросейсмология)
- прикладной аспект:
  - определяет физические условия в межпланетной среде и околоземном космическом пространстве – главный возмутитель космической погоды
  - изучение влияния на климат Земли
  - термоядерный синтез

# Солнце

- наиболее значимый астрономический объект для человечества
- фундаментальный аспект:
  - особая лаборатория для детальных исследований процессов взаимодействия плазмы и электромагнитных полей
  - наблюдаемые условия не могут быть воспроизведены ни в эксперименте, ни в текущих модельных вычислениях
  - явления на других звездах имеют свои аналоги на Солнце; но только на Солнце они доступны для прямых наблюдений (вспышки, корональные выбросы массы, процессы генерации и всплытия магнитного потока, астросейсмология)
- прикладной аспект:
  - определяет физические условия в межпланетной среде и околоземном космическом пространстве – главный возмутитель космической погоды
  - изучение влияния на климат Земли
  - термоядерный синтез

# Солнце

- наиболее значимый астрономический объект для человечества
- фундаментальный аспект:
  - особая лаборатория для детальных исследований процессов взаимодействия плазмы и электромагнитных полей
  - наблюдаемые условия не могут быть воспроизведены ни в эксперименте, ни в текущих модельных вычислениях
  - явления на других звездах имеют свои аналоги на Солнце; но только на Солнце они доступны для прямых наблюдений (вспышки, корональные выбросы массы, процессы генерации и всплытия магнитного потока, астросейсмология)
- прикладной аспект:
  - определяет физические условия в межпланетной среде и околоземном космическом пространстве — главный возмутитель космической погоды
  - изучение влияния на климат Земли
  - термоядерный синтез

# Солнце

- наиболее значимый астрономический объект для человечества
- фундаментальный аспект:
  - особая лаборатория для детальных исследований процессов взаимодействия плазмы и электромагнитных полей
  - наблюдаемые условия не могут быть воспроизведены ни в эксперименте, ни в текущих модельных вычислениях
  - явления на других звездах имеют свои аналоги на Солнце; но только на Солнце они доступны для прямых наблюдений (вспышки, корональные выбросы массы, процессы генерации и всплытия магнитного потока, астросейсмология)
- прикладной аспект:
  - определяет физические условия в межпланетной среде и околоземном космическом пространстве – главный возмутитель космической погоды
  - изучение влияния на климат Земли
  - термоядерный синтез

# Солнце

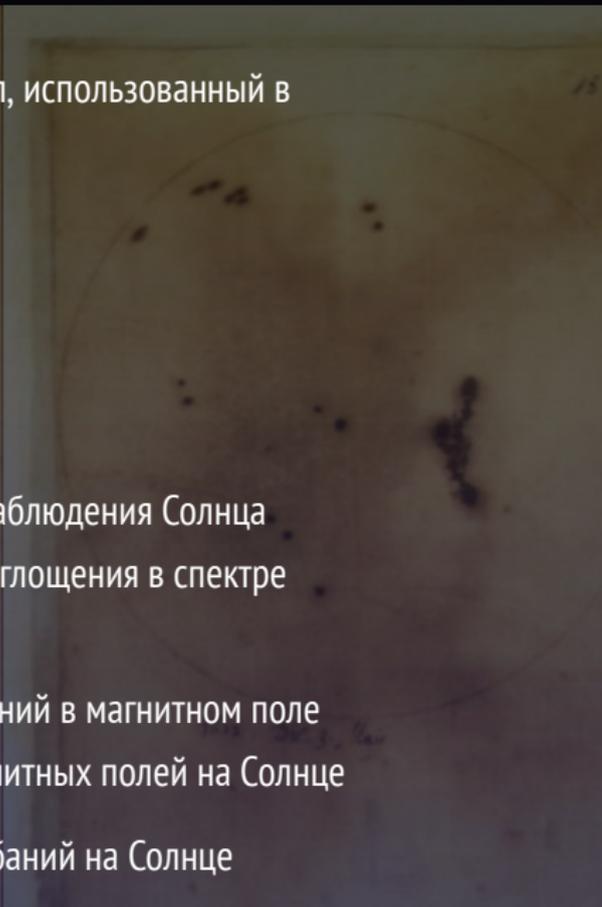
- наиболее значимый астрономический объект для человечества
- фундаментальный аспект:
  - особая лаборатория для детальных исследований процессов взаимодействия плазмы и электромагнитных полей
  - наблюдаемые условия не могут быть воспроизведены ни в эксперименте, ни в текущих модельных вычислениях
  - явления на других звездах имеют свои аналоги на Солнце; но только на Солнце они доступны для прямых наблюдений (вспышки, корональные выбросы массы, процессы генерации и всплытия магнитного потока, астросейсмология)
- прикладной аспект:
  - определяет физические условия в межпланетной среде и околоземном космическом пространстве – главный возмутитель космической погоды
  - изучение влияния на климат Земли
  - **термоядерный синтез**

# Изучение Солнца ← телескоп

- 1609–1611 г., Галилей Галилео, первый телескоп, использованный в научных целях:
  - пятна – на Солнце
  - эволюция солнечных пятен
  - появление пятен около экватора
  - вращение Солнца вокруг своей оси
- 1704, Исаак Ньютон, спектроскоп
- 1802, В. Волластон, щелевой спектроскоп для наблюдения Солнца
- 1814, Й. Фраунгофер, отождествление линий поглощения в спектре Солнца → спектральный анализ
- 1896, П. Зееман, расщепление спектральных линий в магнитном поле
- 1908, Д. Хейл, спектрогелиограф, открытие магнитных полей на Солнце
- 1962, Р. Лейтон, открытие “пятиминутных” колебаний на Солнце

*Del Sig. Galileo Galilei*

69



# Исследования Солнца

ОПТИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН

- Наблюдения пятен в белом свете:
  - 11 летняя периодичность появления (закон Швабе-Вольфа)
  - широтный дрейф (закон Шпёрера).
- Спектральный анализ, измерение магнитного поля:
  - конвективные и турбулентные движения
  - изменяющаяся структура магнитного поля
  - 22 летняя периодичность в полярности магнитного поля (закон Хейла)
  - наклон оси группы биполярных пятен с увеличением широты (закон Джоя).
- Регистрация колебательных движений
  - глобальная и локальная гелиосейсмология
  - корональная сейсмология
  - сейсмология солнечных пятен, активных областей

# Исследования Солнца

ОПТИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН

- Наблюдения пятен в белом свете:
  - 11 летняя периодичность появления (закон Швабе-Вольфа)
  - широтный дрейф (закон Шпёрера).
- Спектральный анализ, измерение магнитного поля:
  - конвективные и турбулентные движения
  - изменяющаяся структура магнитного поля
  - 22 летняя периодичность в полярности магнитного поля (закон Хейла)
  - наклон оси группы биполярных пятен с увеличением широты (закон Джоя).
- Регистрация колебательных движений
  - глобальная и локальная гелиосейсмология
  - корональная сейсмология
  - сейсмология солнечных пятен, активных областей
- Солнечное динамо
- внутреннее строение Солнца
- строение атмосферы Солнца
- Знание об изменчивости солнечной активности
- Прогноз состояния межпланетной среды и околоземного космического пространства

# Солнце, научные задачи

- Природа магнитных полей и цикла солнечной активности:
  - процессы генерации магнитных полей на Солнце и звездах
  - передача спиральности в верхние слои атмосферы
  - распределение мелкомасштабных магнитных полей и их связь с крупномасштабными
  - образование и исчезновение кГс полей
  - природа межсеточных магнитных полей, полярных полей, локальное динамо
  - измерение магнитного поля в короне с помощью эффекта Зеемана
  - исчезновение магнитного потока в “спокойном” Солнце
  - связь фотосферы-хромосферы

# Солнце, научные задачи

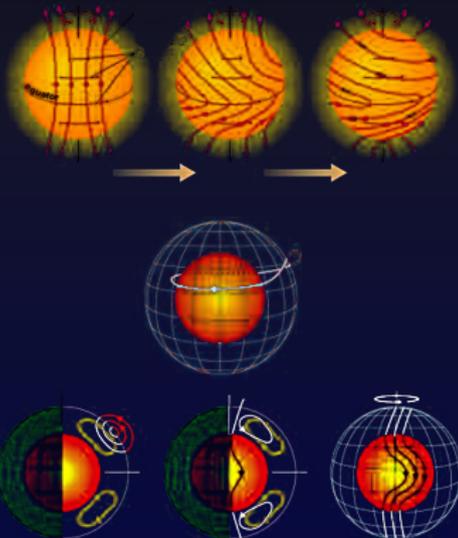
- Структура и эволюция магнитных структур:
  - солнечные пятна
  - факелы
  - волокна и протуберанцы
- Структура, динамика и нагрев солнечной атмосферы:
  - распространение волн (фотосфера–хромосфера–корона)
  - крупномасштабные события высвобождения энергии магнитного поля
  - экспериментальное обнаружение электрических токов
  - происхождение солнечных вспышек
- Обнаружить, что-то новое, неизвестное ранее
  - ...
  - ...
  - ...

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

Природа магнитных полей и цикла солнечной активности

Солнечное динамо:

- глобальное динамо
- мелкомасштабное динамо



переход энергии из кинетической в магнитную форму



– полоидальное магнитное поле превращается дифференциальным вращением в тороидальное

– тороидальное поле под действием силы магнитной плавучести всплывает

– за счет силы Кориолиса и турбулентности тороидальное поле трансформируется в полоидальное

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

Природа магнитных полей и цикла солнечной активности

Солнечное динамо:

- глобальное динамо
- мелкомасштабное динамо

спиральность  $h_c =$

$$B_x \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) +$$
$$B_y \left( \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) +$$
$$B_z \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right)$$

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

Природа магнитных полей и цикла солнечной активности

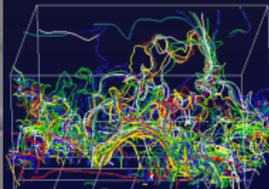
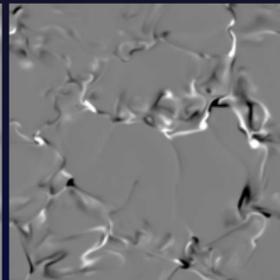
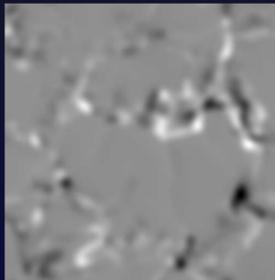
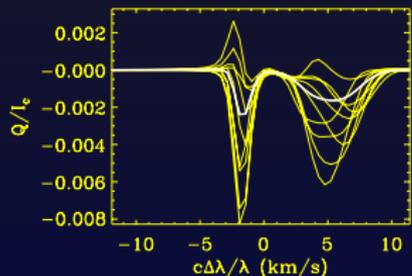
Солнечное динамо:

- глобальное динамо
- мелкомасштабное динамо

$$\begin{aligned} \text{спиральность } h_c = & \\ & B_x \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) + \\ & B_y \left( \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) + \\ & B_z \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

Моделирование процессов мелкомасштабной магнитоконвекции:

регистрируемый магнитный поток ← данные из симуляции



Размер элемента:

$\sim 200 \times 200$  км

$\sim 0.3'' \times 0.3''$

$25 \times 25$  км

$\sim 0.03'' \times 0.03''$

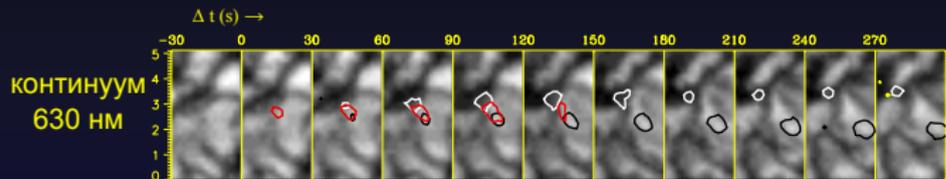
Stein and Å. Nordlund, ApJ 2006

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

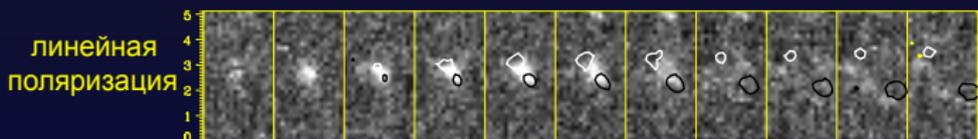
“Спокойное” Солнце: ФОРМИРОВАНИЕ И ИСЧЕЗНОВЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА

- Исчезновение магнитного потока – часто наблюдаемое явление:
  - магнитное пересоединение?
  - погружение U-подобной петли?
  - всплытие  $\Omega$ -подобной петли?

Martínez González & Bellot Rubio, 2009, ApJ



данные  
Hinode/SOT



время жизни  
 $\sim 2 - 40$  мин.



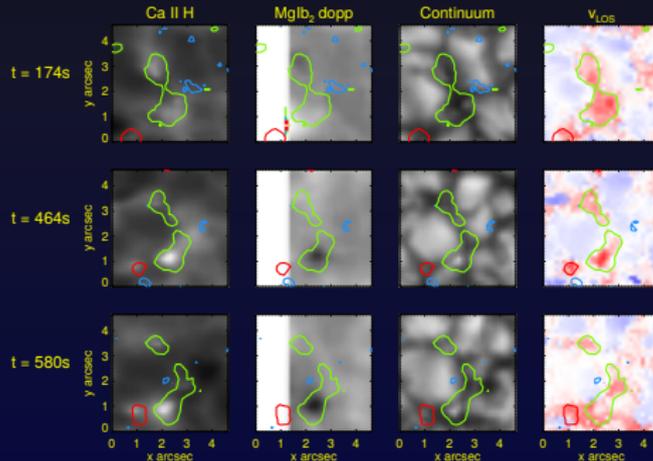
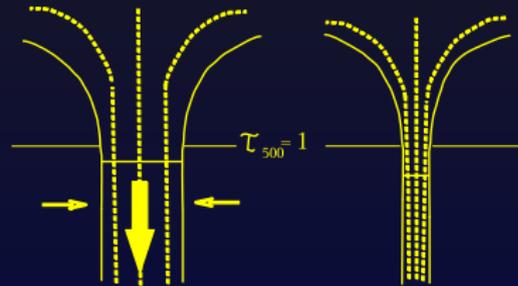
поля 10–100 Гс  
чувствительность  
 $\sim 10 - 100$  Гс.

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

Конвективный коллапс: образование трубки с магнитным полем  $> \text{kG}$

- Усиление магнитного потока механизмом конвективного коллапса (Parker, 1978)
  - увеличение поля до  $\text{kG}$  значений
  - нисходящий поток в магнитной трубке
  - увеличение яркости в магнитной трубке и окрестности

Fischer et al., 2009 A&A

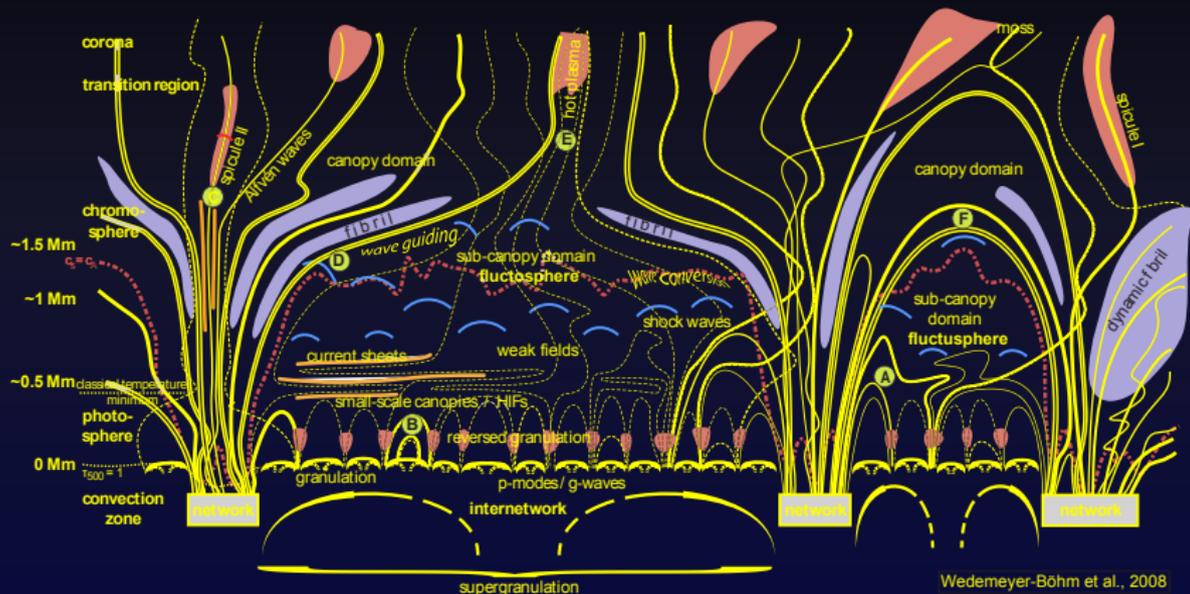


# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ СОЛНЦА

Wedemeyer-Böhm et al., 2008:

Упрощенная (!) структура нижней атмосферы спокойного (!) Солнца



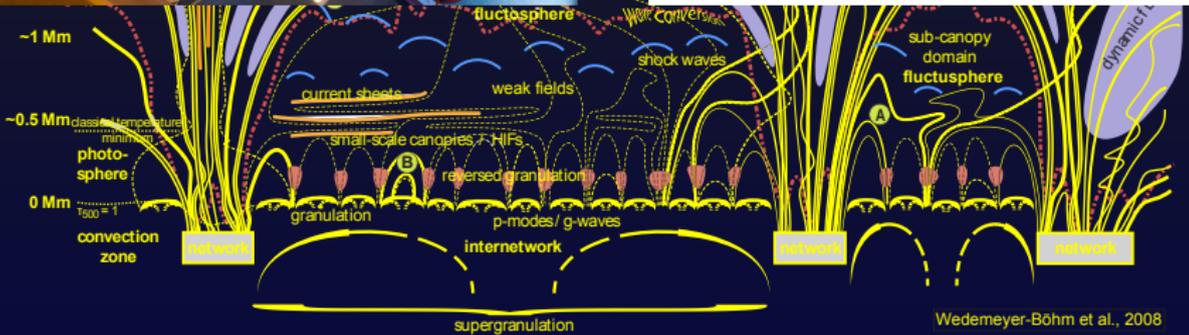
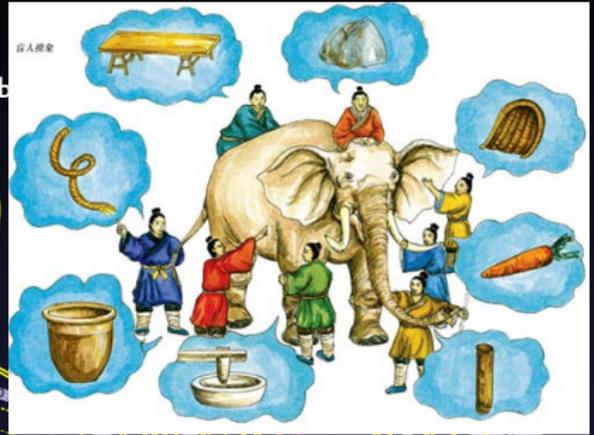
⇒ Требуются наблюдения, разрешающие 3D структуру солнечной атмосферы

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ СОЛНЦА



ферь



Wedemeyer-Böhmer et al., 2008

⇒ Требуется наблюдения, разрешающие 3D структуру солнечной атмосферы

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

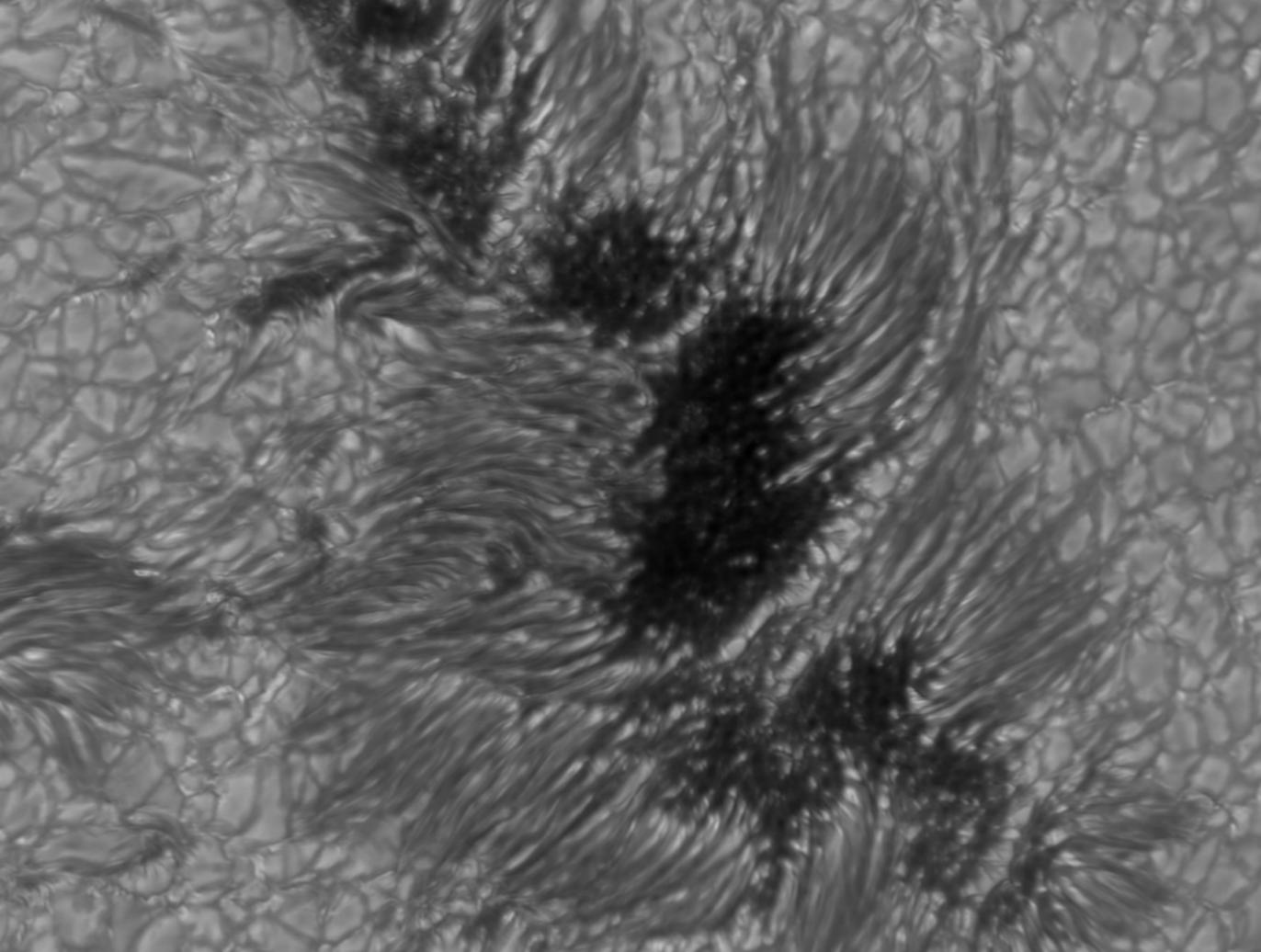
Структура и эволюция магнитных структур: солнечные пятна

## Задачи:

- всплытие магнитного потока
- формирование и распад пятна
- структура пятен под фотосферой и над фотосферой
- тонкая структура тени и полутени

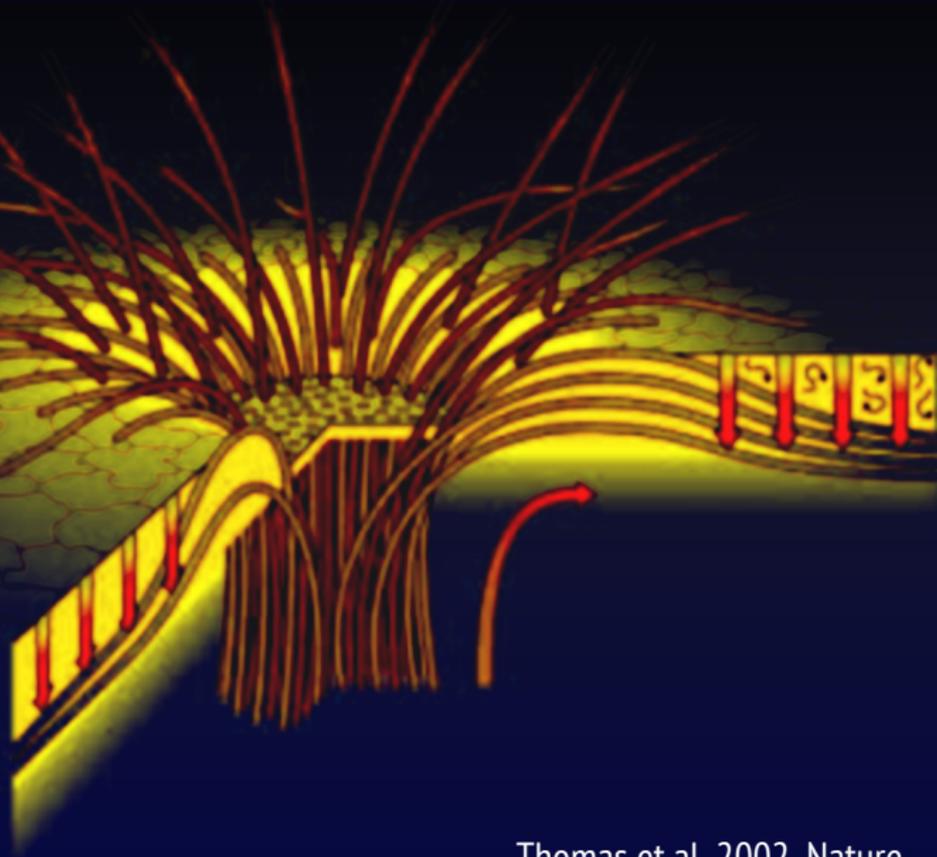
## Феноменология:

- яркие точки в полутени
- волокна полутени
- темные волокна
- поток Эвершеда
- эффект С. Джона
- движущиеся магнитные элементы
- моат-ячейки
- umbral flashes
- яркие мосты



# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

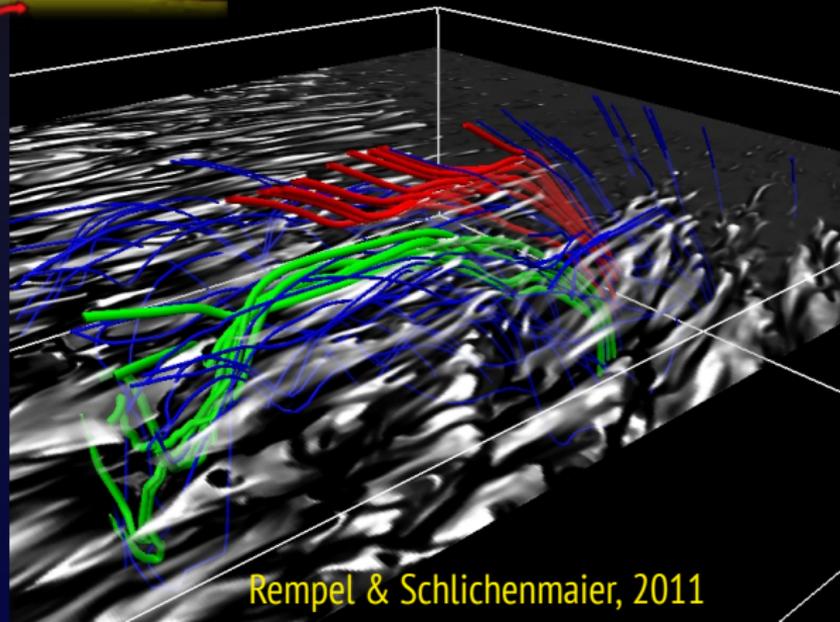
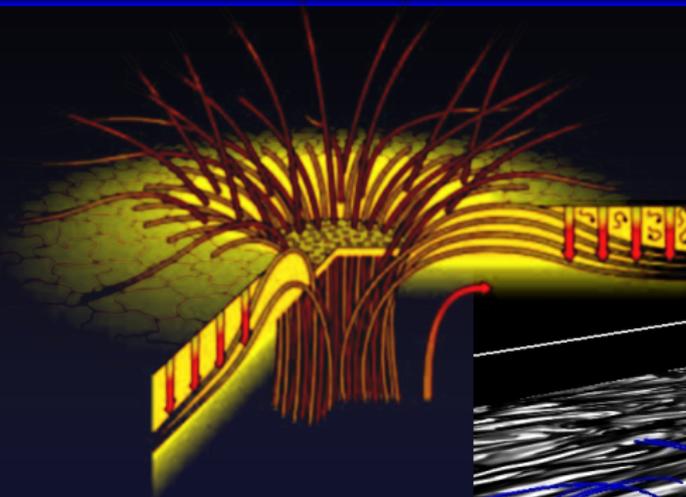
СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА



Thomas et al. 2002, Nature

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА



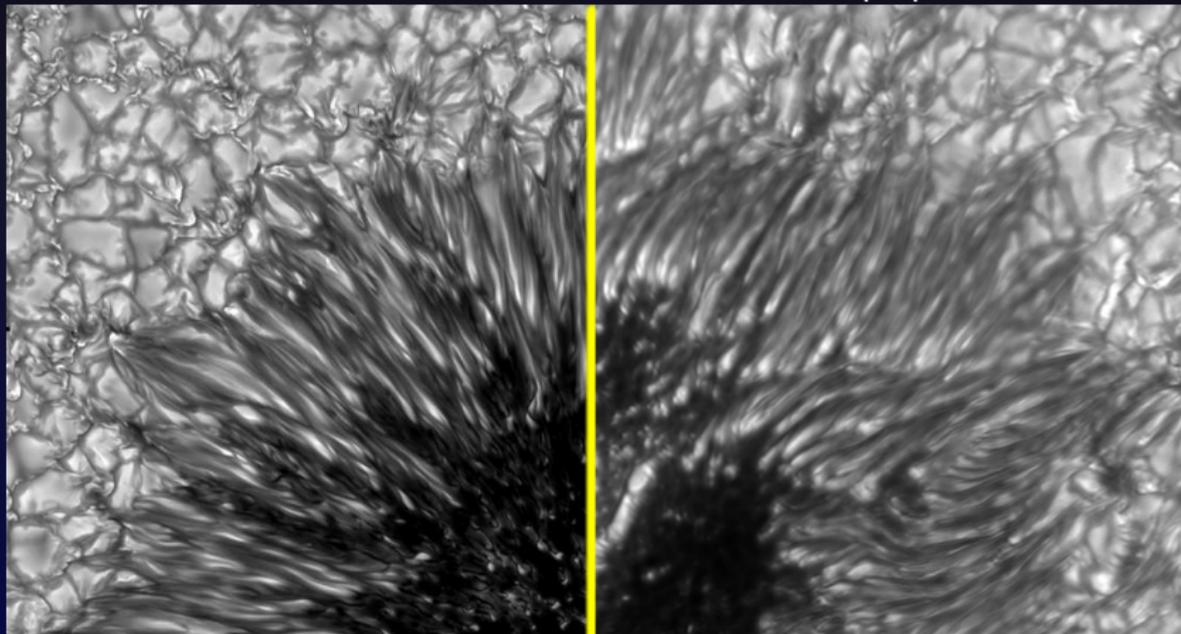
Rempel & Schlichenmaier, 2011

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА

Rempel & Schlichenmaier, 2011 (LRSP)  
численное моделирование  
сетка 16 км

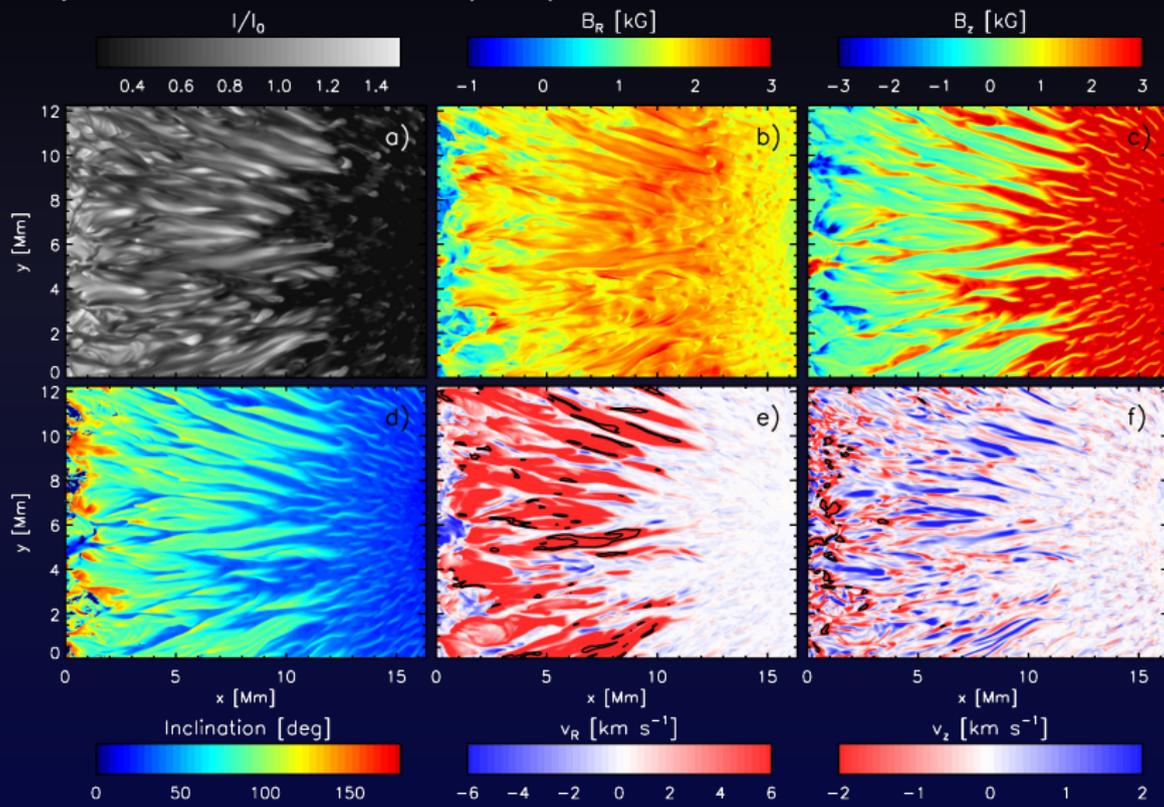
von der Lühe et al., 2014 (ESPM-14)  
Gregor, VBI, 486 нм  
разрешение ~70 км



# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА

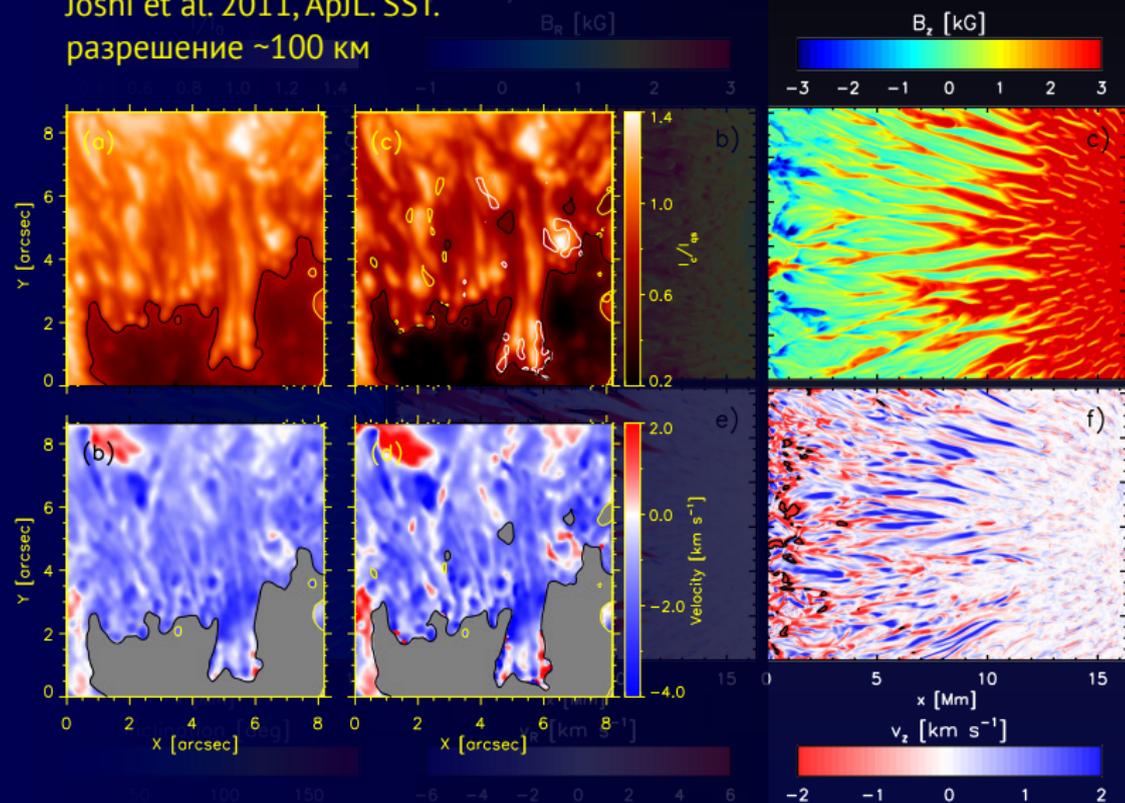
Rempel & Schlichenmaier, 2011 (LRSP)



# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

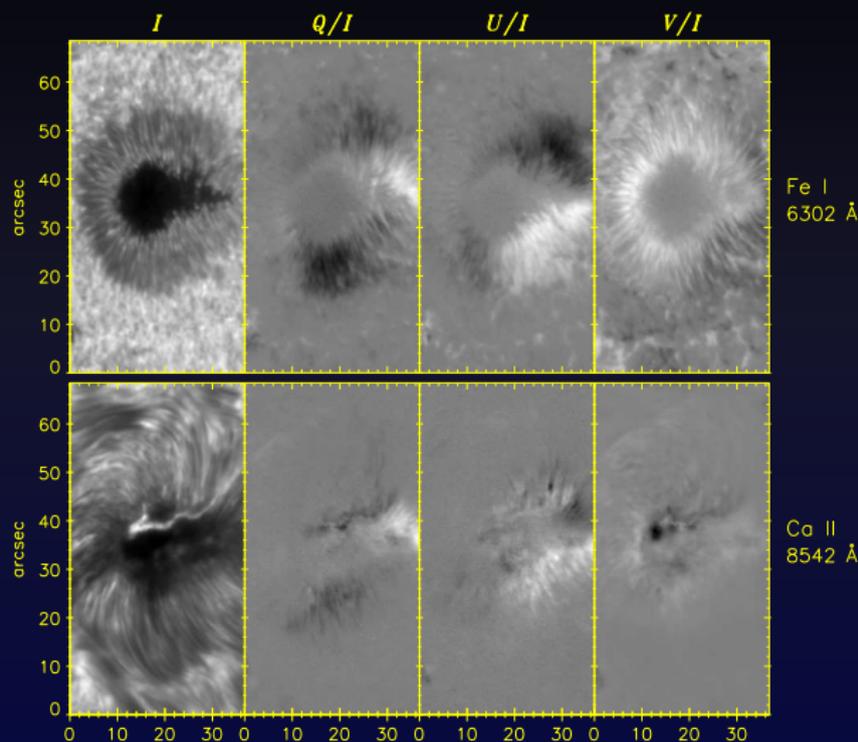
СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА

Schlichenmaier 2011 (LRSP)  
Joshi et al. 2011, ApJL. SST.  
разрешение  $\sim 100$  км



# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ХРОМОСФЕРА ПЯТНА



Kleint et al., 2009 (ASP Conf.)  
Dunn Solar Telescope  $\varnothing$  0.76 m  
IBIS

← фотосфера

$\Psi_{diff} = 0.2''$  ( $\lambda = 630$  nm)

0.6'' – реальное разрешение

← хромосфера

$\Psi_{diff} = 0.3''$  ( $\lambda = 850$  nm)

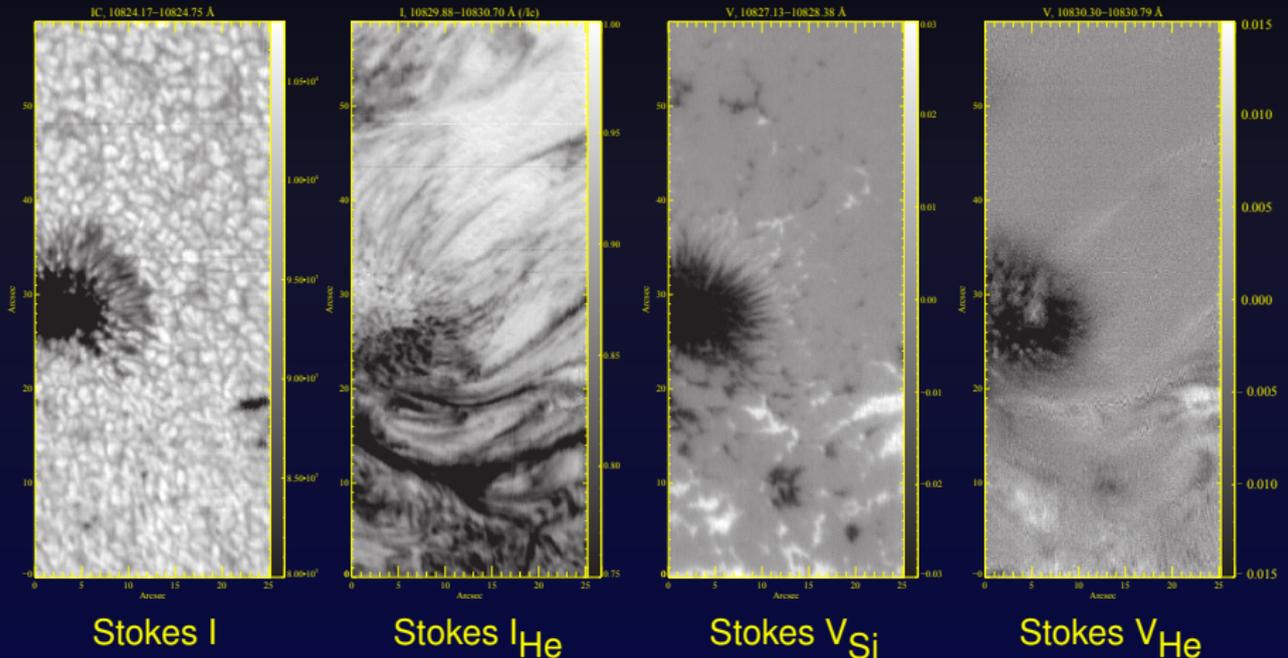
1'' – реальное разрешение

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ХРОМОСФЕРА ПЯТНА

Lagg, 2014 (CDSA, India). Телескоп Gregor,  $\varnothing$  1.5 m, GRIS

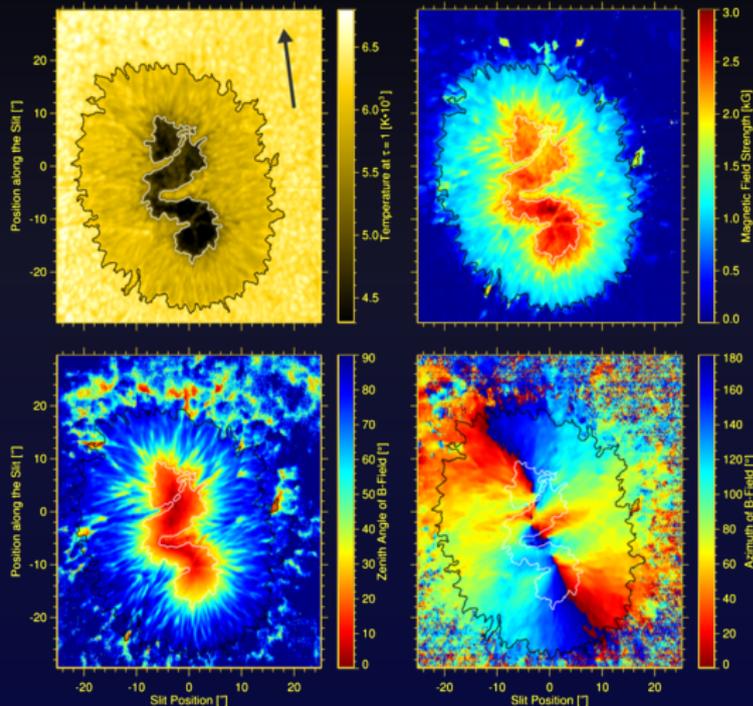
$\Psi_{diff} = 0.2''$  ( $\lambda = 1 \mu\text{m}$ ), реальное разрешение  $\sim 0.6''$ ,  $S/N \ll 10000$



# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ГЛУБОКАЯ ФОТОСФЕРА

ИК линия Fe I 1.568  $\mu\text{m}$ , растровый скан пятна



<http://www.kis.uni-freiburg.de>

Gregor,  $\varnothing$  1.5 m, GRIS

← фотосфера

$\Psi_{diff} = 0.25''$  ( $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ )

реальное разрешение  $\sim 0.4''$   
временное – минуты

тонкая структура пятна:  
 $0.1''$  и 5 с

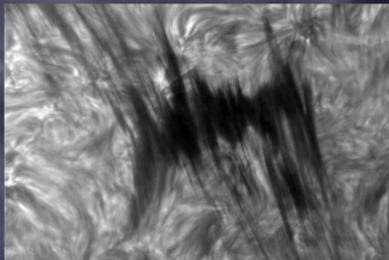
# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ВОЛОКНА И ПРОТУБЕРАНЦЫ

## Волокна и протуберанцы

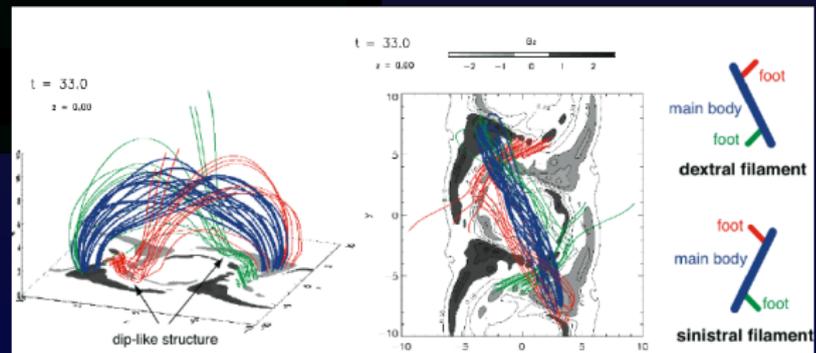
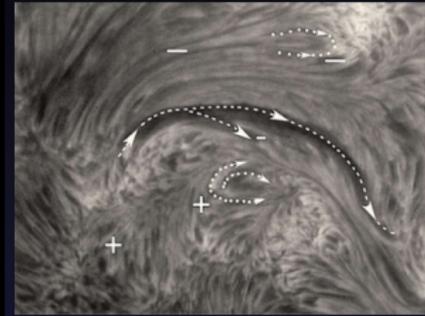
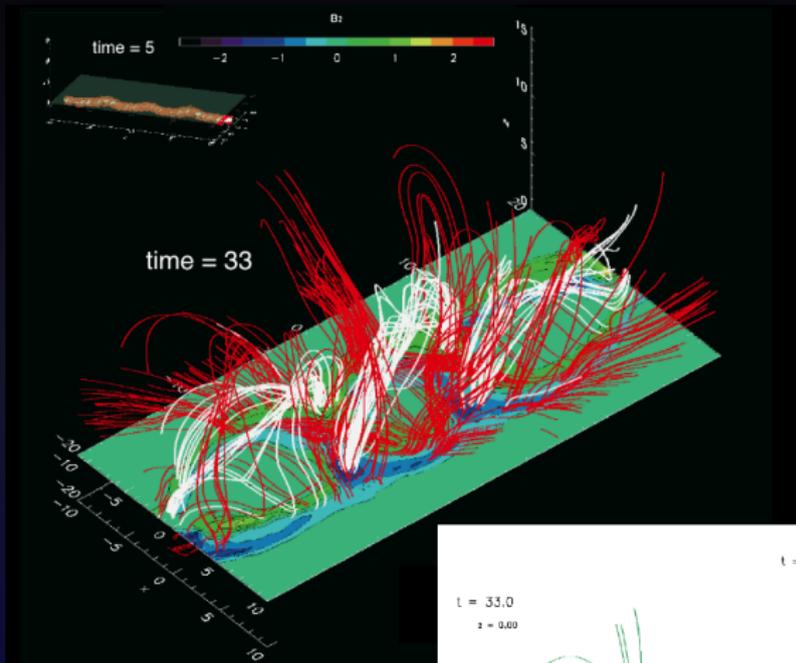
- относительно холодные ( $\sim 8000$  K) структуры в атмосфере Солнца, простирающиеся до короны ( $T \sim 10^6$  K)
- удерживаются магнитными полями
- имеют тонкую и высоко динамичную структуру
- могут становиться неустойчивыми и эруптировать

SST,  $\varnothing$  1 м, H $\alpha$



# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ВОЛОКНА И ПРОТУБЕРАНЦЫ



Magara, 2007 (PASJ)

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ВОЛОКНА И ПРОТУБЕРАНЦЫ

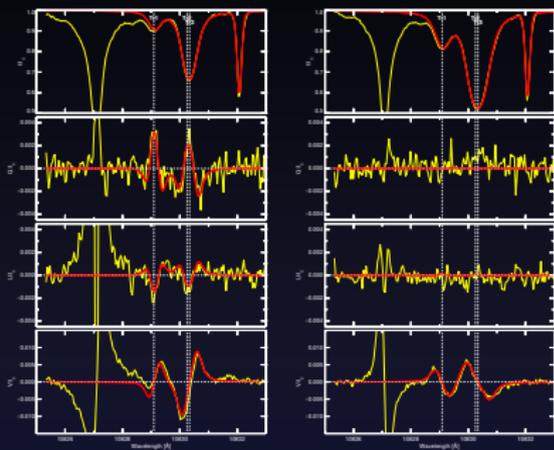


Fig. 4.— Typical Stokes profiles of the He I triplet in the filament. Left: Stokes profiles taken from one of the dark absorption patches in section S2 of the filament at  $X = 22$ ,  $Y = 10$  in the coordinates of the lower-left panel of Fig. 1. The Stokes  $Q$  and  $U$  profiles are shown in red and green, respectively. The  $V$  profile is shown in yellow. The  $W$  profile is shown in black. Right: Stokes profiles taken from the filament section S1 at  $X = 10$ ,  $Y = 17$ . The retrieved magnetic field is  $B = 751$  G,  $\gamma = 105^\circ$  and  $\chi = 77^\circ$ .

— разрешение  $\sim 3''$   
 — S/N  $\sim 2000-3000$   
 — VTT,  $\varnothing 0.7$  м  
 — Tenerife Infrared Polarimeter

$= 751$  G,  $\gamma = 105^\circ$  and  $\chi = 77^\circ$ . Right: Stokes profiles taken from the filament section S1 at  $X = 10$ ,  $Y = 17$ . The retrieved magnetic field is  $B =$

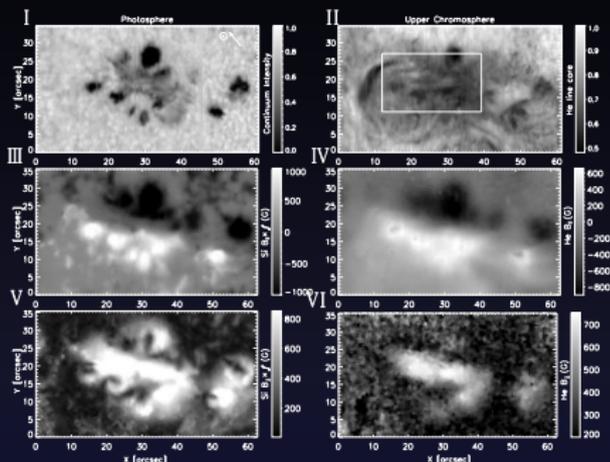


Fig. 5.— Retrieved magnetic field information in the LOS frame of the part of active region NOAA 10763 scanned by TIP II on May 17 in the photosphere (left column) and upper chromosphere (right column). Panel I shows the infrared continuum image at 1083.25 nm. Panel II displays the intensity around the He I line core integrated from 1083.0 nm to 1083.06 nm. Panels III and IV depict the LOS magnetic field in the photosphere and chromosphere, respectively. Panels V and VI show the absolute value of transverse magnetic field.

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ВОЛОКНА И ПРОТУБЕРАНЦЫ

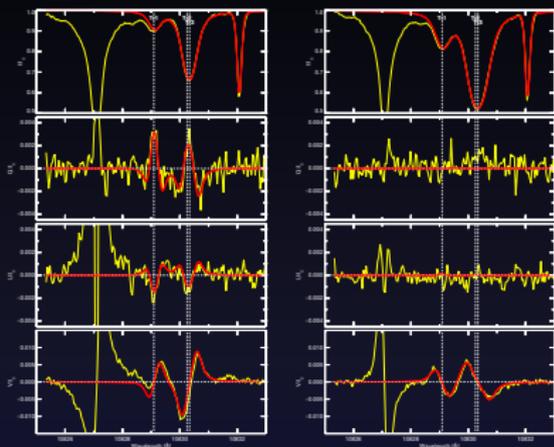
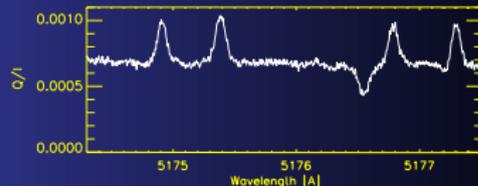
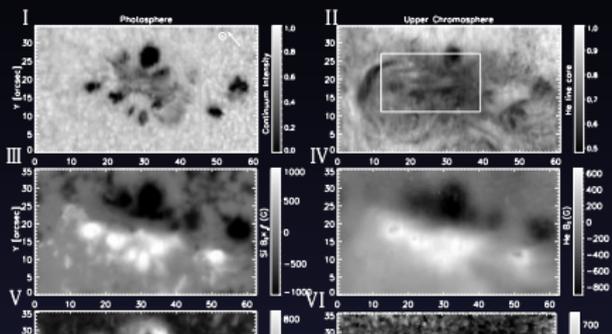


Fig. 4.— Typical Stokes profiles of the He I triplet in the filament. Left: Stokes profiles taken from one of the dark absorption patches in section S2 of the filament at  $X = 22$ ,  $Y = 10$  in the coordinates of the lower-left panel of Fig. 1. The Stokes  $Q$  and  $U$  profiles are shown by the transfer function (red and blue) and show the signature of the magnetic field. The  $V$  profile is shown in green. The retrieved magnetic field is shown in red (left column) and blue (right column). Three vertical dashed lines indicate the He I triplet lines.

— разрешение  $\sim 3''$   
 — S/N  $\sim 2000-3000$   
 — VTT,  $\varnothing 0.7$  м  
 — Tenerife Infrared Polarimeter

$= 751$  G,  $\gamma = 105^\circ$  and  $\chi = 77^\circ$ . Right: Stokes profiles taken from the filament section S1 at  $X = 10$ ,  $Y = 17$ . The retrieved magnetic field is  $B =$



Ramelli, 2010 (SPIE)  
 — разрешение  $\sim 3-5''$   
 — S/N  $\sim 100000$   
 — ZIMPOL, GCT 0.45 м

Xu, 2012 (ArXiv)

# Крупный солнечный телескоп, научные задачи

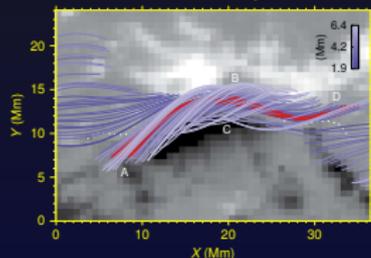
СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР: ВСПЫШКИ

## Солнечные вспышки

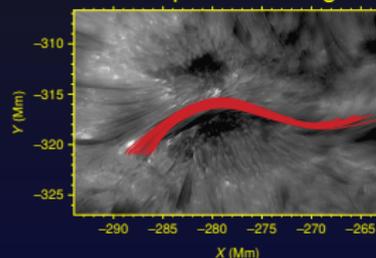
- мощный и быстрый процесс выделения энергии
- мультимасштабный характер
- определяется структурой и динамикой магнитного поля
- каковы условия для возникновения больших солнечных вспышек?

NST, Ø 1.6 м, самый большой солнечный телескоп в мире (2015 г)

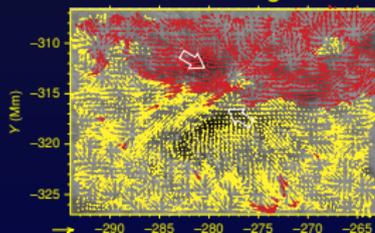
SDO/HMI, B



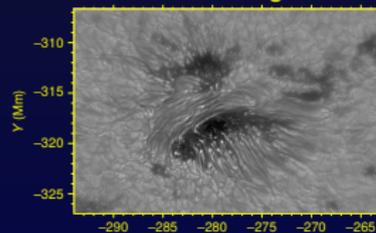
H-alpha blue-wing



TiO image



TiO image



IRIM

$\delta\lambda/\lambda \sim 150000$

☑ Stokes I, Q, U, V

0.1'' ( $\sim 70$  км)

(=диф. предел)

# Исследования Солнца

- знания получены с помощью телескопов с апертурой до  $\sim 1$  м
- наземного базирования:
  - возможность изменения хода эксперимента
  - возможность совершенствовать инструмент
  - высокое пространственное, спектральное и временное разрешения
  - возможность получать большой объем данных
- орбитальные обсерватории:
  - ультрафиолетовая и рентгеновская область спектра
  - отсутствие турбулентной атмосферы
  - регулярные ряды данных среднего разрешения
  - сравнительная простота доступа к данным и их использования
- стратосферные эксперименты:
  - малое влияние атмосферной турбуленции
  - возможность использования сравнительно больших апертур
  - возможность совершенствовать и повторять эксперимент

# Новый солнечный телескоп

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ

- пространственное разрешение  $0.05-0.1''$ ,  $\lambda=500$  нм
- поле зрения не менее  $2'$
- временное разрешение  $\sim 1-5$  с
- спектральный диапазон  $0.3$  мкм– $2.3$  мкм ( $12$  мкм)
- одновременные наблюдения  
фотосферы–хромосферы в  $5-10$  линиях,  $0.3-1.5$  мкм
- спектральное разрешение  $\sim 10$  мÅ
- анализ поляризации (Stokes I,Q,U,V)

# Солнечная спектроскопия

В условиях нехватки фотонов вблизи дифракционного предела

- Солнце – самый яркий объект на небе
- наблюдения с размером пикселя для дифракционного разрешения ограничены фотонным шумом

???

# Солнечная спектроскопия

В условиях нехватки фотонов вблизи дифракционного предела

- Солнце – самый яркий объект на небе
- наблюдения с размером пикселя для дифракционного разрешения ограничены фотонным шумом

???

- количество собранных фотонов на  $\text{arcsec}^2 \sim T \times D^2$
- размер разрешаемого элемента в  $\text{arcsec}^2 \sim 1/D^2$
- количество фотонов на разрешаемый элемент [ $\text{arcsec}^2$ ] есть функция пропускания телескопа, а не диаметра апертуры

# Солнечная спектроскопия

В условиях нехватки фотонов вблизи дифракционного предела

- Солнце – самый яркий объект на небе
- наблюдения с размером пикселя для дифракционного разрешения ограничены фотонным шумом

???

- количество собранных фотонов на  $\text{arcsec}^2 \sim T \times D^2$
- размер разрешаемого элемента в  $\text{arcsec}^2 \sim 1/D^2$
- количество фотонов на разрешаемый элемент [ $\text{arcsec}^2$ ] есть функция пропускания телескопа, а не диаметра апертуры

# Солнечная спектроскопия

## СВЕТОПРОПУСКАНИЕ ТЕЛЕСКОПА

- одно зеркало ослабляет поток на 10%
- телескоп, 12 зеркал  
 $100\% \rightarrow \times 0.9 \times 0.9$   
общая эффективность = 28%
- спектрограф, 3 зеркала:  
 $\rightarrow 28\% \rightarrow \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9$   
общая эффективность = 20%
- фотокамера:  
 $\rightarrow 20\% \rightarrow \times 0.5$   
общая эффективность = 10%

# Солнечная спектроскопия

## СВЕТОПРОПУСКАНИЕ ТЕЛЕСКОПА

- одно зеркало ослабляет поток на 10%
- телескоп, 12 зеркал  
 $100\% \rightarrow \times 0.9 \times 0.9$   
общая эффективность = 28%
- спектрограф, 3 зеркала:  
 $\rightarrow 28\% \rightarrow \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9$   
общая эффективность = 20%
- фотокамера:  
 $\rightarrow 20\% \rightarrow \times 0.5$   
общая эффективность = 10%
- анализатор поляризации:  
 $\rightarrow 10\% \rightarrow \times 0.5$   
общая эффективность = 5% (!!!)

# Солнечная спектроскопия

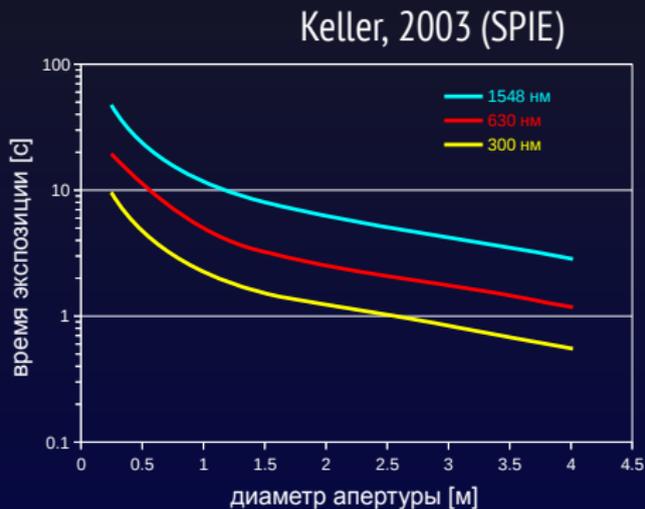
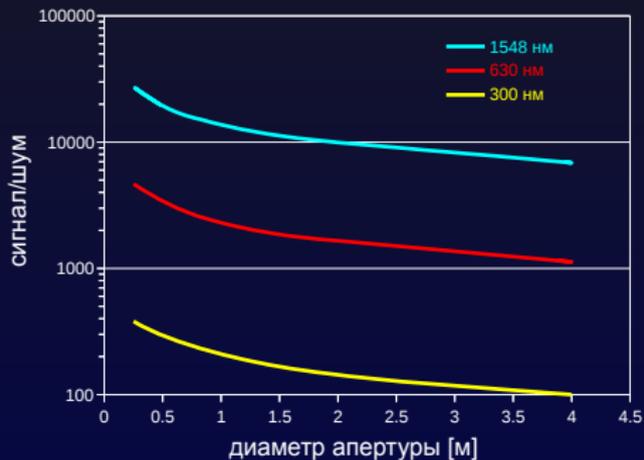
ВБЛИЗИ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА: ОЦЕНКИ ДЛЯ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ

- максимальное горизонтальное смещение объекта  $\sim 5$  км/с (фотосфера)  
(хромосфера  $\sim 20$  км/с и более)  $\rightarrow$  необходимо временное разрешение
- спектральное разрешение  $\delta\lambda/\lambda=150000$  (в реальности  $\sim 400000 \div 600000$ )
- пропускание телескопа 10 %

# Солнечная спектроскопия

ВБЛИЗИ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА: ОЦЕНКИ ДЛЯ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ

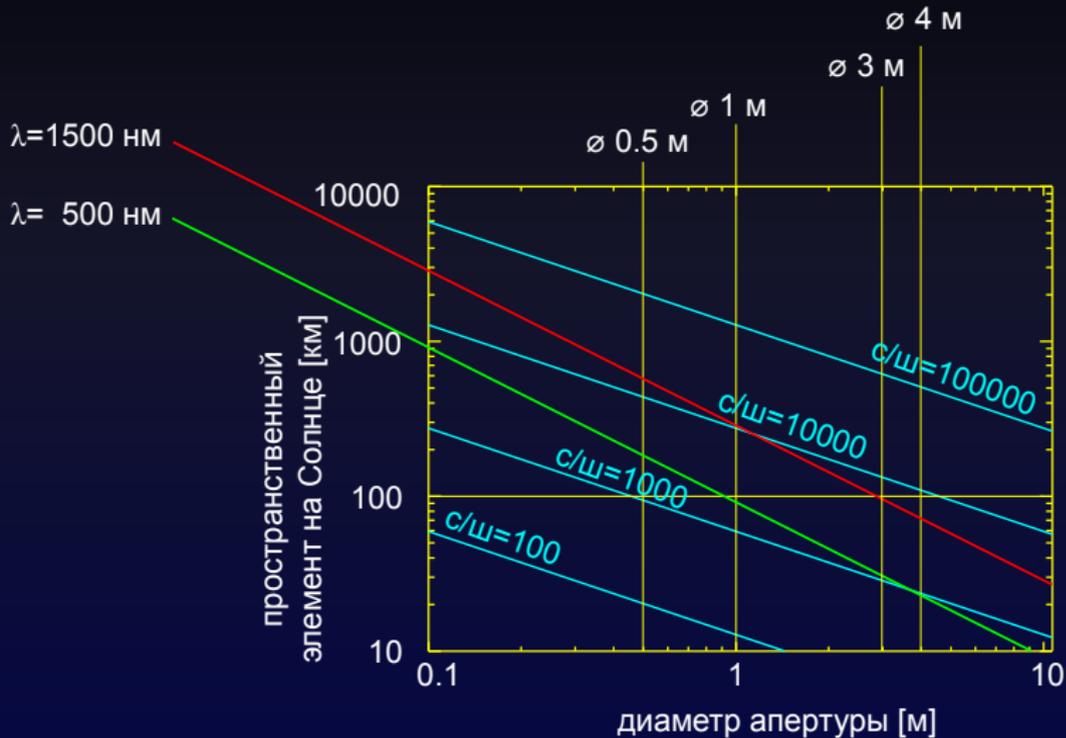
- максимальное горизонтальное смещение объекта  $\sim 5$  км/с (фотосфера) (хромосфера  $\sim 20$  км/с и более)  $\rightarrow$  необходимо временное разрешение
- спектральное разрешение  $\delta\lambda/\lambda = 150000$  (в реальности  $\sim 400000 \div 600000$ )
- пропускание телескопа 10 %
- с увеличением апертуры ОСШ<sub>дифф.пр.</sub> падает ( $\tau_{exp} \downarrow$ )



# Солнечная спектроскопия

ВБЛИЗИ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА: КОМПРОМИСС ПО РАЗМЕРУ АПЕРТУРЫ

Stenflo, 2013 (AAR)

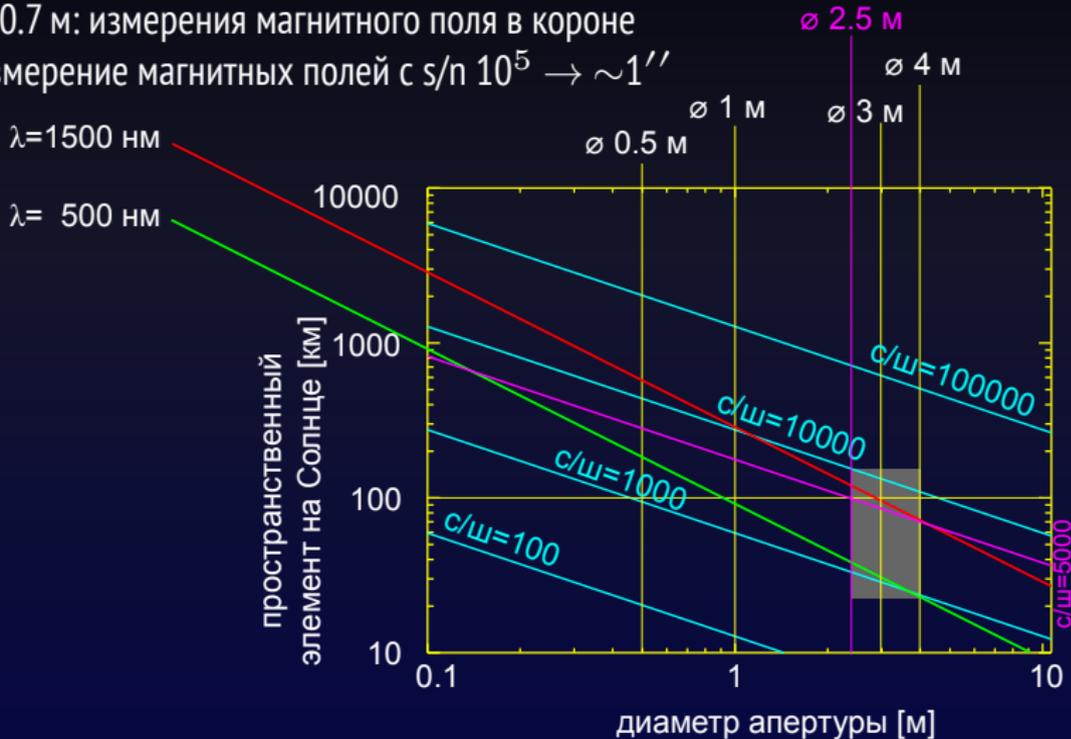


# Солнечная спектроскопия

ВБЛИЗИ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА: КОМПРОМИСС ПО РАЗМЕРУ АПЕРТУРЫ

- $\varnothing$  1.5 м: формальное разрешение  $\sim 100$  км
- $\varnothing$  3 м: векторные измерения магнитного поля, элемент  $\sim 100$  км
- $\varnothing$  0.7 м: измерения магнитного поля в короне
- измерение магнитных полей с  $s/n$   $10^5 \rightarrow \sim 1''$

Stenflo, 2013 (AAR)



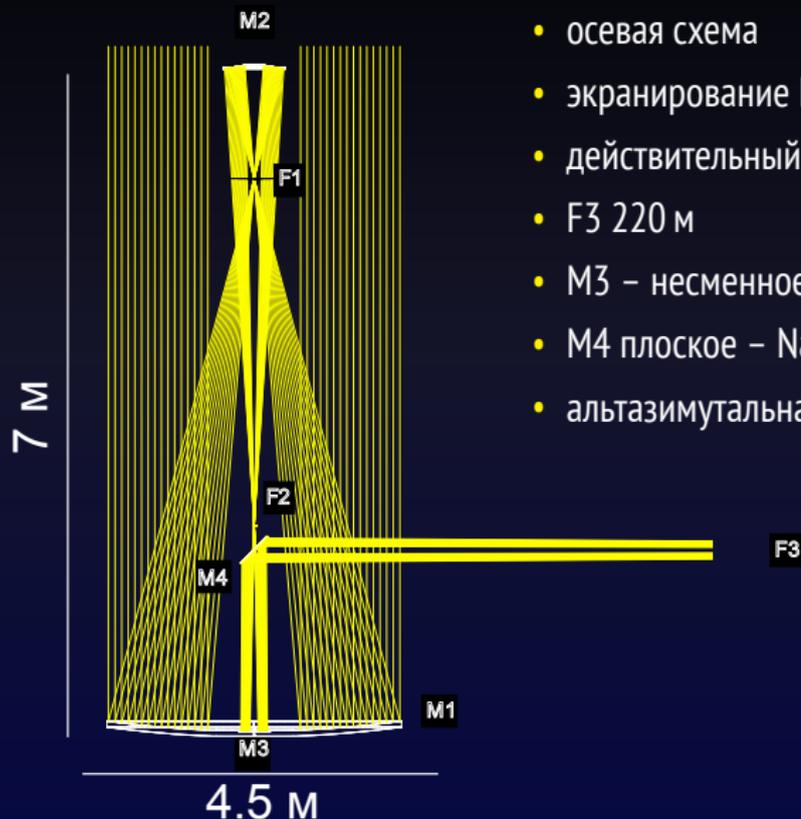
# Крупный солнечный телескоп

Национальный проект: основные особенности

- рабочая апертура 3 м (зеркало  $\varnothing$  3.1 м)
- угловое разрешение  $0.1''$  (диф. предел  $0.04''$ ,  $\lambda=500$  нм)
- фокусное расстояние  $\sim 5.6$  м ( $f/1.85$ )
- рабочее поле зрения  $\geq 2'$
- спектральный диапазон 380 нм–2300 нм
- осевая конфигурация (типа “грегори”)
- фокус куде (40 и 80 м)
- фокус Несмита (20 м)
- коронографическая мода
- активная и адаптивная оптическая система
- место расположения: Саянская солнечная обсерватория

# Крупный солнечный телескоп: $\varnothing$ 3 м

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА



- осевая схема
- экранирование M2 640 мм  $\sim$ 4.5%
- действительный фокус F1
- F3 220 м
- M3 – несменное зеркало внутри M1
- M4 плоское – Nasmyth vs coudé
- альтазимутальная монтировка

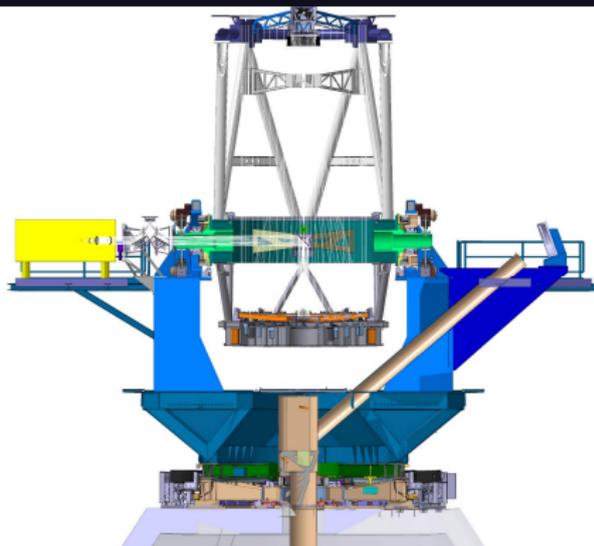
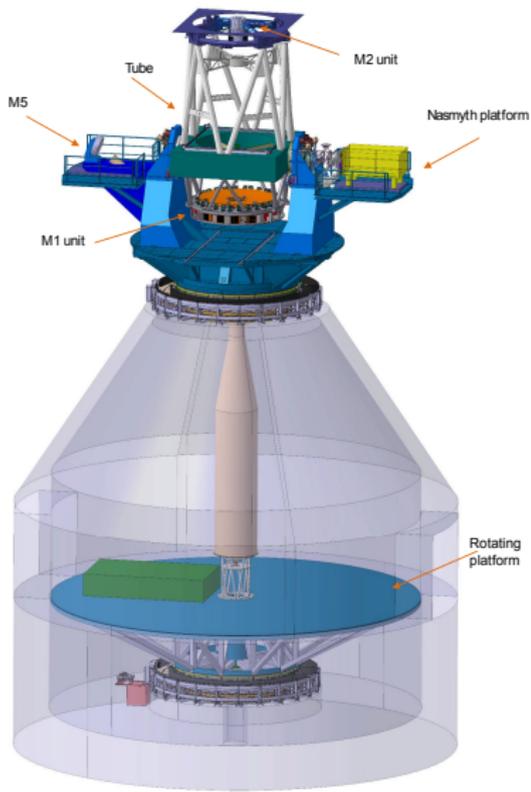
# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

Общий вид



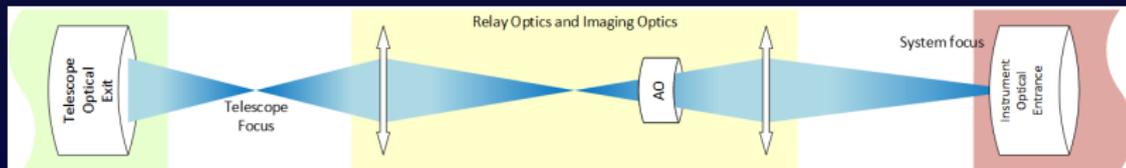
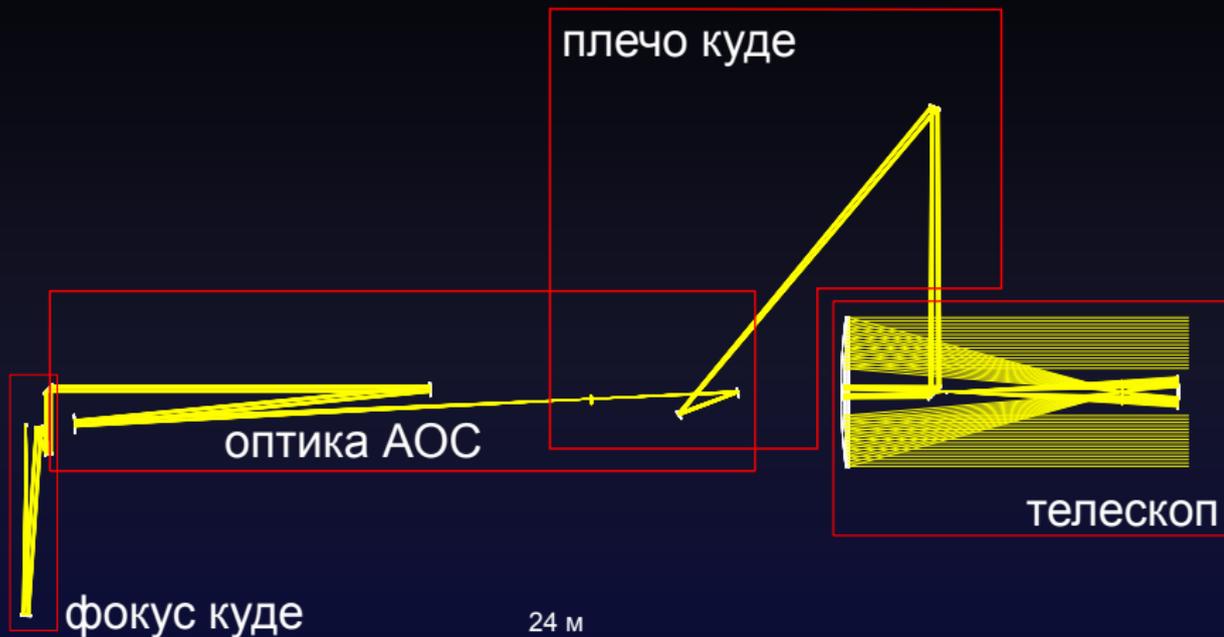
LST-3 Solar Telescope-Coronagraph  
Conceptual Design Review

Doc.: LST-3-TRE-AMOS.0002  
Issue: 1  
Date: 30/09/2015  
Page: 15



# Крупный солнечный телескоп: $\varnothing$ 3 м

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА: ФОКУС КУДЕ

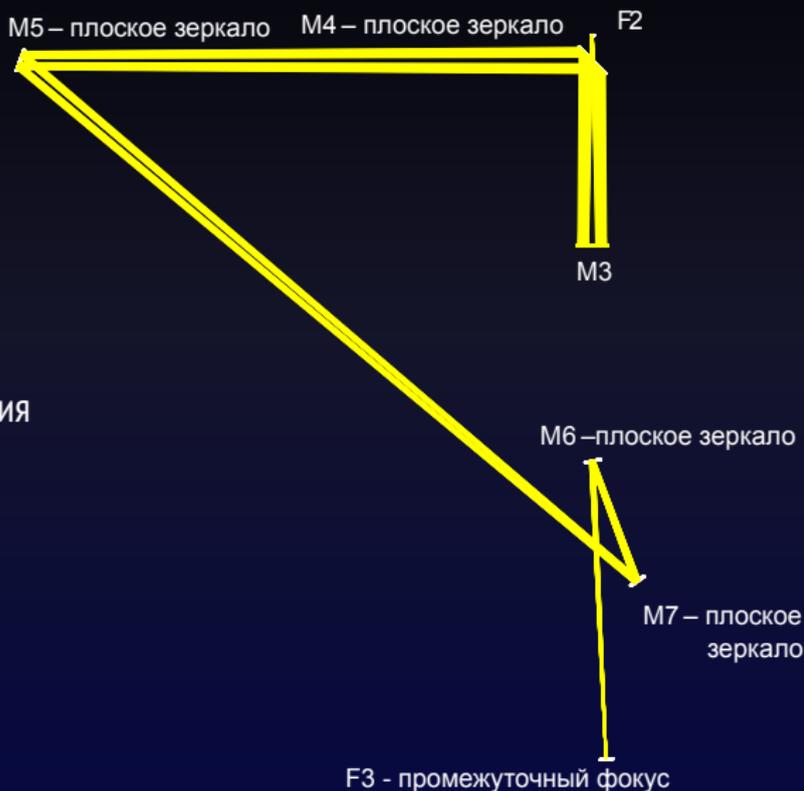


# Крупный солнечный телескоп: $\varnothing$ 3 м

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА: ФОКУС КУДЕ

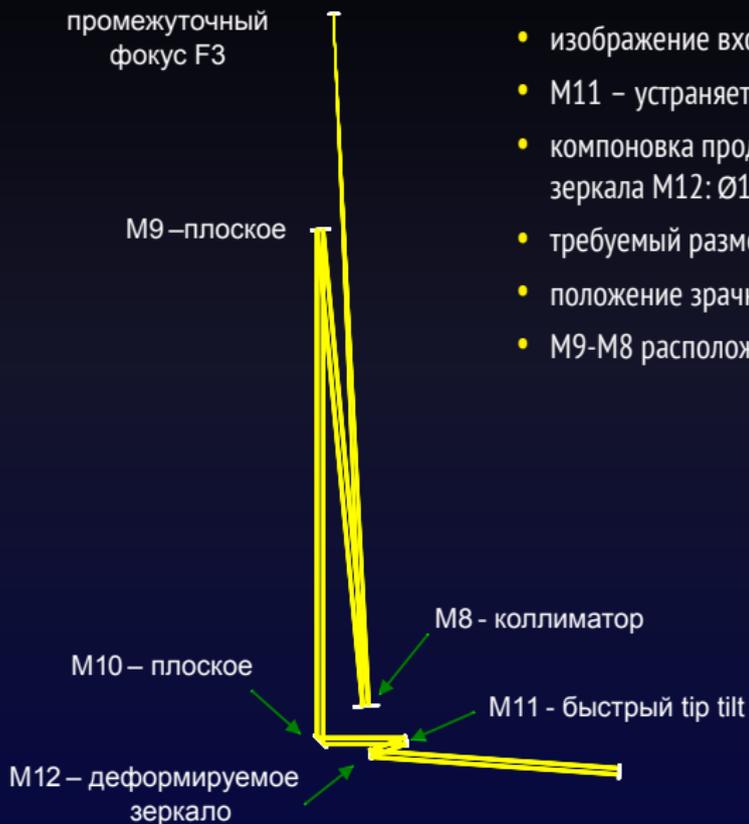
- M5, M4, M7  
coudé =  
1) колено  
2) изгиб  
3) угольник

- M6+M7 уменьшают угол падения



# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА: АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ФОКУСА КУДЕ

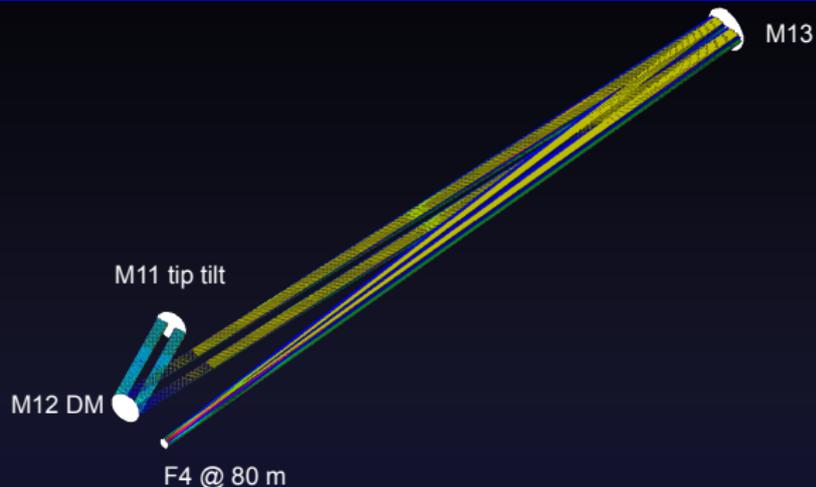


- изображение входного зрачка на M12
- M11 – устраняет дрожание изображения как целого
- компоновка продиктована размером зеркала M12: Ø150 мм
- требуемый размер изображения 150 мм:  $F \text{ M8} = 10.5 \text{ м}$
- положение зрачка: 16 м
- M9-M8 расположены в куде-трубе

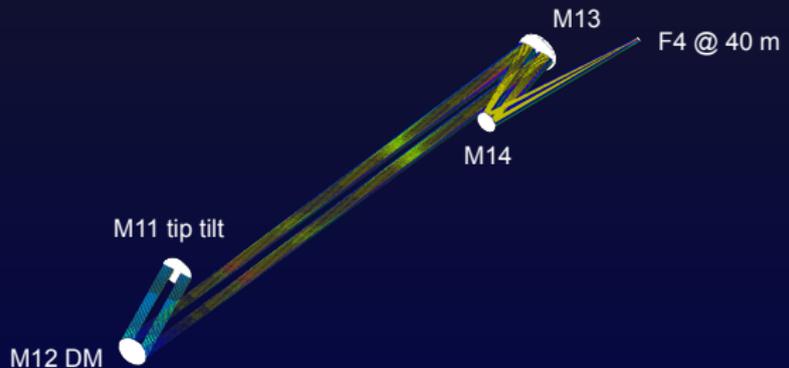
# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА: ФОКУС 40 И 80 М

- Фокус F4@80
- фокусное расстояние: 80 м
- M13 – 1 зеркало Ø210 мм



- Фокус F4@40
- фокусное расстояние: 40 м
- M13 Ø740 мм
- M14 Ø370 мм



# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

	Nasmyth	Coudé 40m	Coudé 80m	Coronagraph	
Апертура	3000	3000	3000	700	мм
Фокусное расстояние	20000	40000	80000	20000	мм
f#	6.7	13.3	26.7	28.6	f/
Поле зрения	2	2	2	2	угл. мин.
Изображение Ø	11.648	23.374	46.594	11.648	мм
Телецентричность	0.009	0.004	0.002	0.000	градусы
Масштаб	0.1	0.05	0.03	0.1	"/10 мкм
EE50	0.112	0.096	0.110	0.112	угл. сек
EE80	0.190	0.282	0.298	0.190	угл. сек
EE90	0.321	0.520	0.570	0.321	угл. сек
длина волны	656	656	656	656	нм

# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

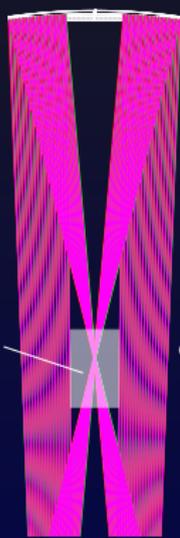
ДИАФРАГМА ПОЛЯ ЗРЕНИЯ: ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

## Data

Solar irradiance	1010 W/m <sup>2</sup>
Sun diameter	1.391.684 km
Sun-Earth distance	149.600.000 km
Total field	31,98 arcmin
Focal distance M1	5,65 m
Diameter of Sun image at F1	52,560 mm
2.5 * diameter of Sun image at F1	131,401 mm
Corresponding drift time	320 sec
Absorption M1	6%

Диафрагма  
поля зрения

фокус F1



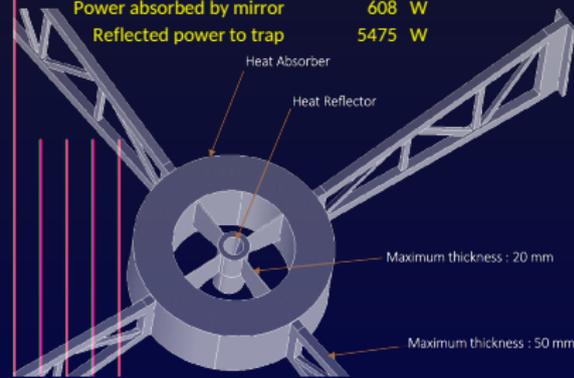
## Normal mode

### M1

Outer diameter	3 m
Inner diameter	0,9 m
Surface	6,432 m <sup>2</sup>
Total power	6497 W
Power to dissipate	390 W

### Heat stop

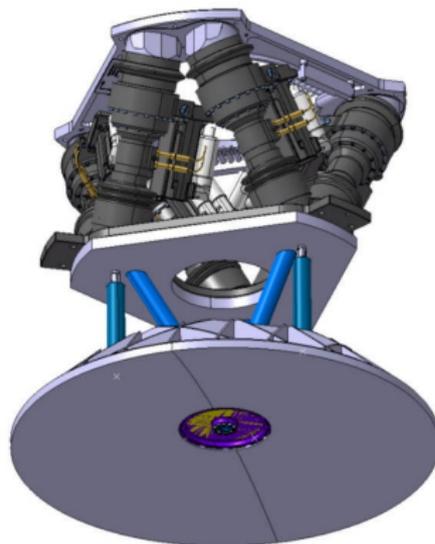
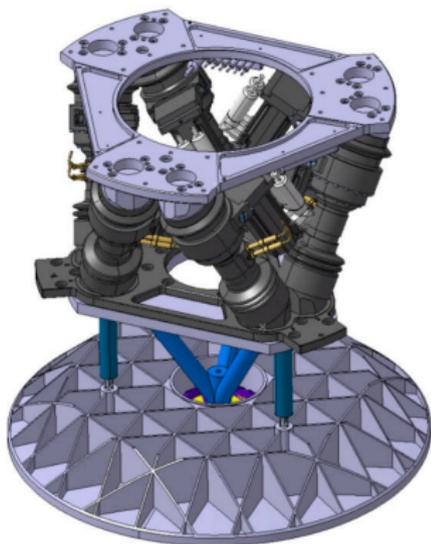
Total incoming power	6107 W
Surface power	2,8 MW/m <sup>2</sup>
Passing field	2 arcmin
	0,000582 rad
Passing image diameter	3,287 mm
Passing power	24 W
Power to dissipate	6083 W
Mirror absorption	10%
Power absorbed by mirror	608 W
Reflected power to trap	5475 W



# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

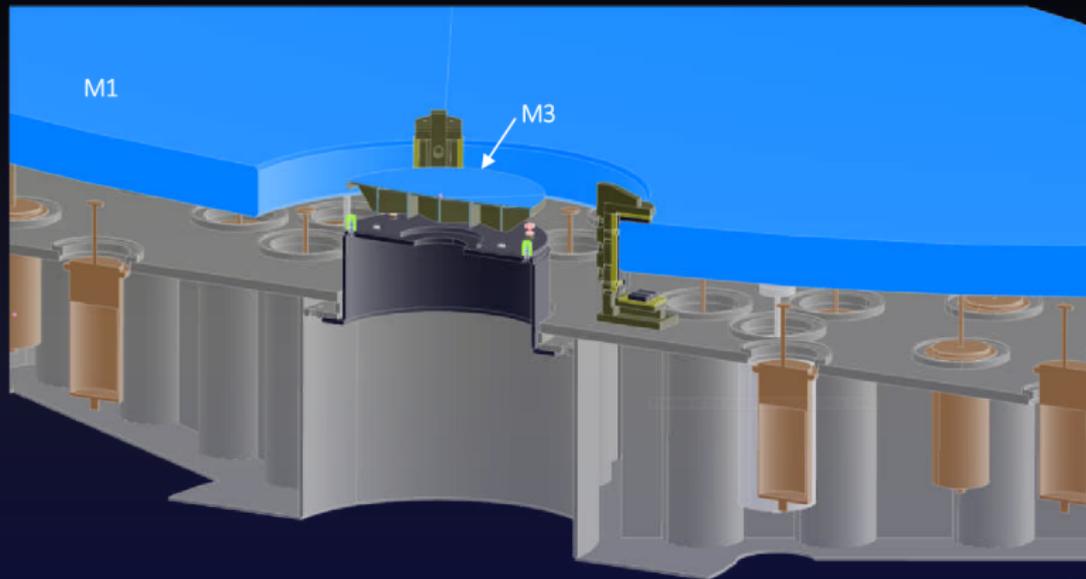
Зеркало M2 на гексаподе и тип-тилте

	TXTY	TZ	RX/RV
Смещение	$\pm 4\text{mm}$	$\pm 6\text{mm}$	$\pm 10\text{ arcmin}$
Разрешение	$1\ \mu\text{m}$	$0.5\ \mu\text{m}$	$0.5\text{ arcsec}$
Точность	$2\ \mu\text{m}$	$1\ \mu\text{m}$	$1\text{ arcsec}$
Абс. точность	$10\ \mu\text{m}$	$5\ \mu\text{m}$	$5\text{ arcsec}$



# Крупный солнечный телескоп: $\varnothing$ 3 м

ЗЕРКАЛО М3 ВНУТРИ М1



# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

## АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

- Атмосфера Земли всегда турбулентная
- Для описания используется теория Колмогорова

$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3}$  – сила турбулентности

$r_0$  – радиус Фрида, общепринятый способ характеризовать качество изображения в месте расположения телескопа

$$r_0 = [0.423k^2 \sec(\beta) \int_0^L C_n^2 dh]^{-3/5}$$

### Простая интерпретация:

в месте расположения с некоторым характерным  $r_0$  большой телескоп сможет достичь угловое разрешение, соответствующее телескопу с размером апертуры  $r_0$ :

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{r_0}$$

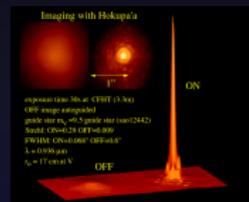
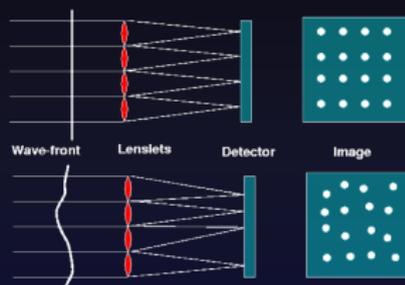
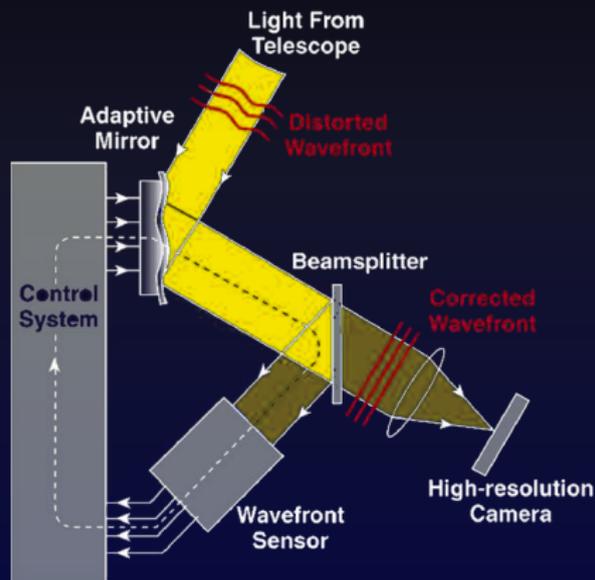
$r_0 = 13$  см, разрешение =  $1''$  – “атмосферная апертура”

# Крупный солнечный телескоп: $\varnothing$ 3 м

АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Общая схема, главные компоненты:

- датчик волнового фронта  $\rightarrow$  количество субапертур
- деформируемое зеркало  $\rightarrow$  количество управляемых элементов

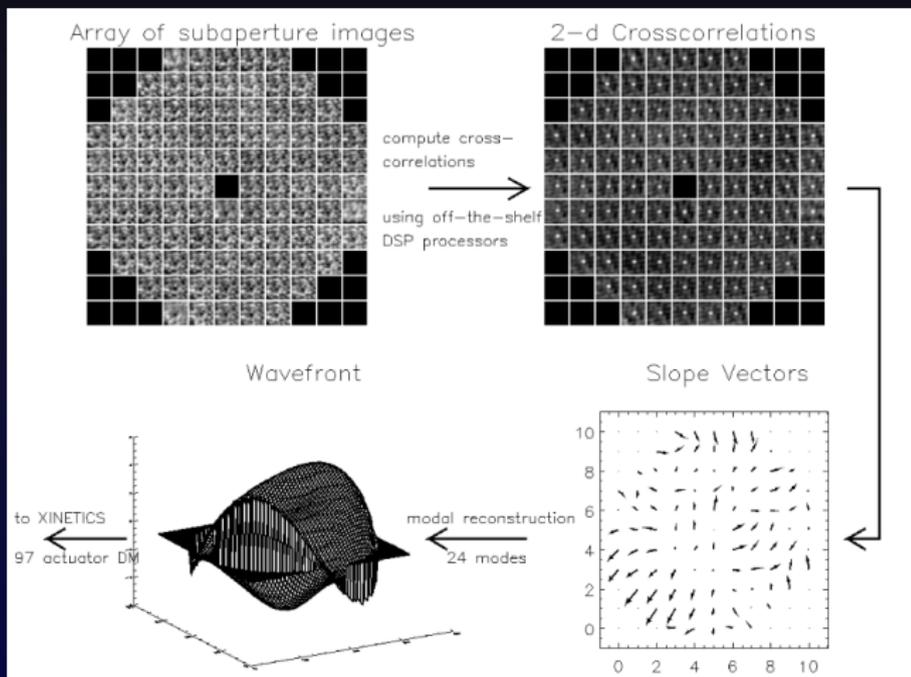


На датчике – изображения звезды, смещения изображений пропорциональны смещениям волнового фронта

# Крупный солнечный телескоп: $\varnothing$ 3 м

## АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

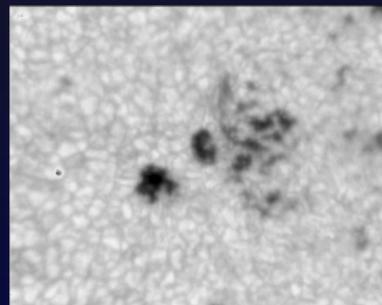
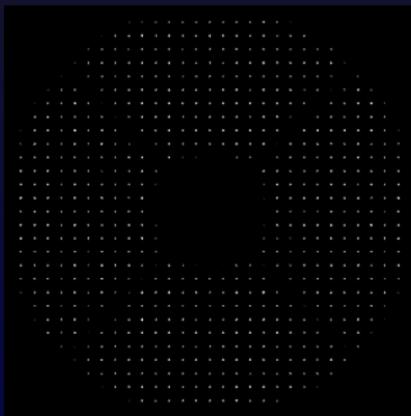
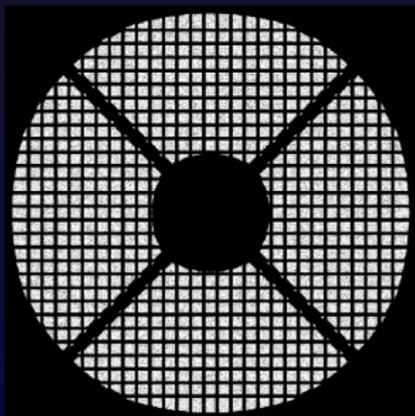
- Солнце – протяженный объект, а не точечный
- изображения на датчике – не точки, а элементы изображения солнечной поверхности (грануляция, поры, пятна)



# Крупный солнечный телескоп: $\varnothing$ 3 м

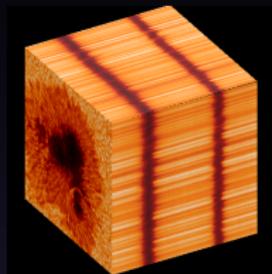
АОС: ТРЕБОВАНИЯ К ДАТЧИКУ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

- адаптивная система должна работать по изображению грануляции
- характерный масштаб грануляции (фотосфера)  $\sim 2''$
- $\Rightarrow$  размер субапертуры не может быть  $< 7$  см ( $\Psi_{\text{diff}} = 1.8''$ )
- $\Rightarrow$  система работает только тогда, когда “видит” грануляцию
- $\varnothing$  субапертуры = 10 см,  $31^2 = 961$  субапертура (DM  $\varnothing$  100–200 мм)
- $\varnothing$  субапертуры = 7 см,  $43^2 = 1849$  субапертур (DM  $\varnothing$  150–300 мм)



# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

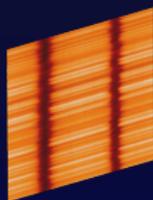
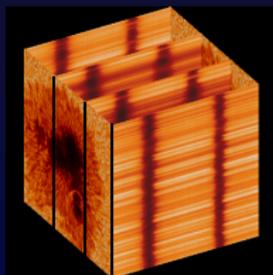
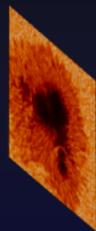
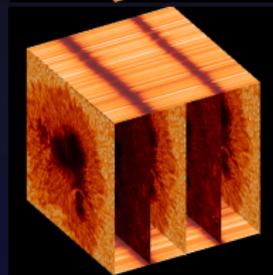
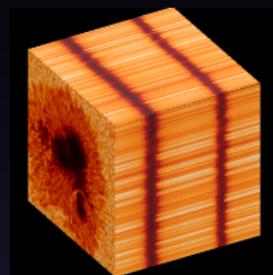
## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ



- куб данных:  $\mathcal{I}(x, y, \lambda)$
- фотодатчик – двумерный

# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ



- куб данных:  $\mathcal{I}(x, y, \lambda)$
- фотодатчик – двумерный

- $\rightarrow \mathcal{I}(x, y, \lambda(t))$
- сканирование  $\Delta\lambda$  за  $\Delta t$
- **фильтрограф**

- $\rightarrow \mathcal{I}(x(t), y, \lambda)$
- сканирование  $\Delta x$  за  $\Delta t$
- **спектрограф**

# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

- Фильтрограф
  - спектральный диапазон 390÷1600 нм (2 канала)
  - эталоны Фабри-Перо (2-3 шт.)
  - $R \sim 180000 \div 300000$
  - $\Delta t \sim 5 \div 30$  с на скан 1 спектральной линии
- Спектрограф №1
  - модуль интегрального поля ( $6 \times 12''$  при разрешении  $0.1''$ )
  - спектральный диапазон 390÷1600 нм (3 канала)
  - оптимизирован на комбинации спектральных линий
  - $R > 300000$
- Спектрограф №2
  - спектральный диапазон 390÷2300 нм (3 канала)
  - $R > 350000 \div 600000$
  - поле зрения по длине волны:  $15 \div 20 \text{ \AA}$
- одновременная работа приборов с разделением по спектральному диапазону

# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

Купол телескопа: “ЗАКРЫТЫЙ” (ВЕНТЕЛИРУЕМЫЙ)



NST, Big Bear

Плюсы:

- нет ветровых нагрузок на телескоп
- позволяет вести инженерные работы
- защищает от снега и льда



DKIST (3D-модель)

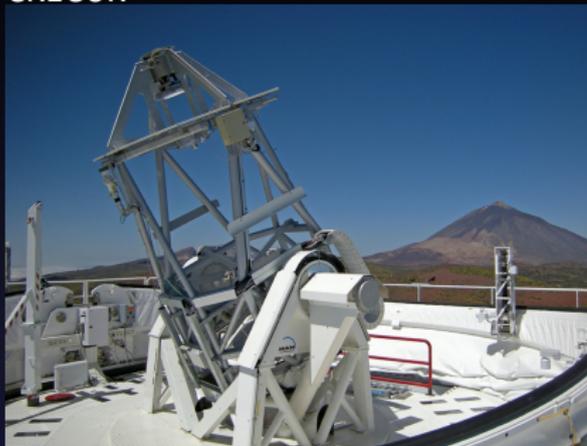
Минусы:

- ухудшает качество изображения
- высокая стоимость
- требует специальных мер по устранению градиента температуры

# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

Купол телескопа: “открытый” (убираемый)

## GREGOR



Плюсы:

- не портит качества изображения
- сравнительно невысокая стоимость

Минусы:

- ветровые нагрузки на телескоп
- не позволяет вести инженерные работы в плохую погоду
- снег и лед



DOT – Dutch Open Telescope

# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

## АСТРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

	Hanle	SSO	Merak	Big Bear	Haleakala
Annual Hours $r_0 > 7\text{cm}$	514	728	731	1053	997
Annual Hours $r_0 > 12\text{cm}$	74	109	108	136	399
Annual No. 2-hr blocks $r_0 > 7\text{cm}$	38	>40	76	83	82
Annual No. 2-hr blocks $r_0 > 12\text{cm}$	1	>1	6	1	10

# Крупный солнечный телескоп: Ø 3 м

Ночные наблюдения

---

Благодарю за внимание!

