



## Black Forest Grid

Vortrag zum 5. BFG-Workshop:

Philippe Bourdin, 23.04.2009

Überblick:

- \* GRID-enhanced simulation of a human skin model for inversion of livor mortis reflectance spectra
- \* Physikalische Datenformate
- \* Elektronisches Laborbuch
- \* 3D MHD-simulation of plasma heating mechanisms in the solar corona



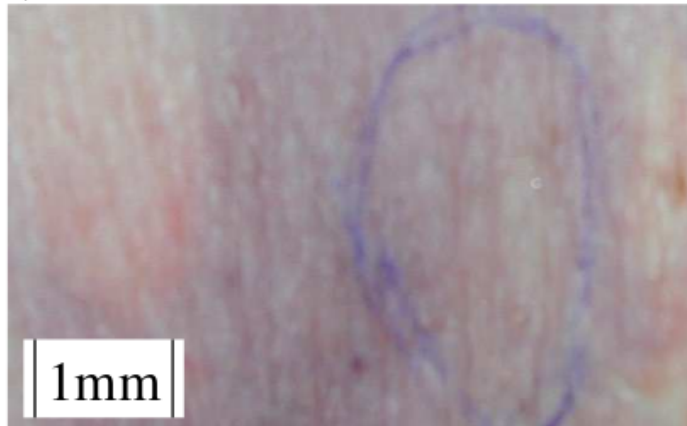
# GRID-enhanced simulation of a human skin model



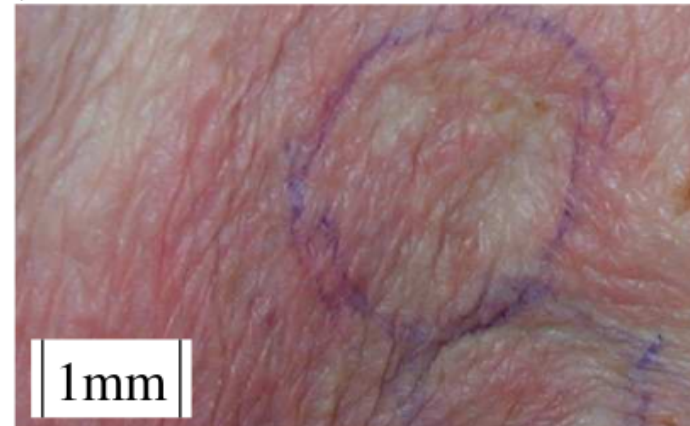
## Livor Mortis:

- Verfärbung von Totenflecken unter Kälteeinfluss

(a)



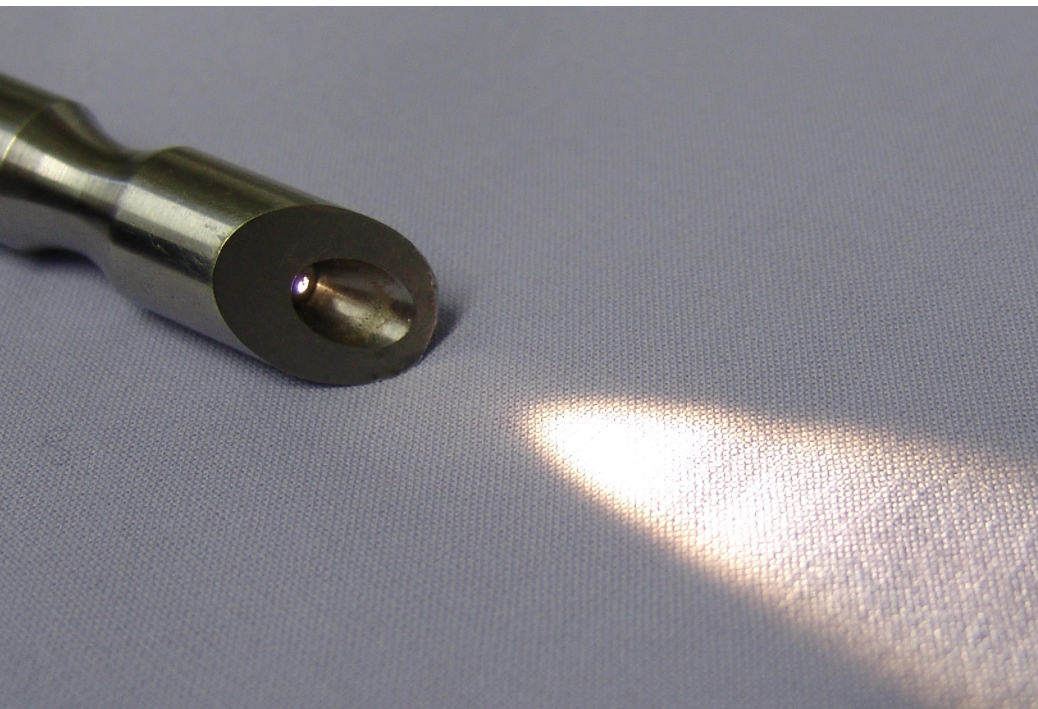
(b)



# GRID-enhanced simulation of a human skin model

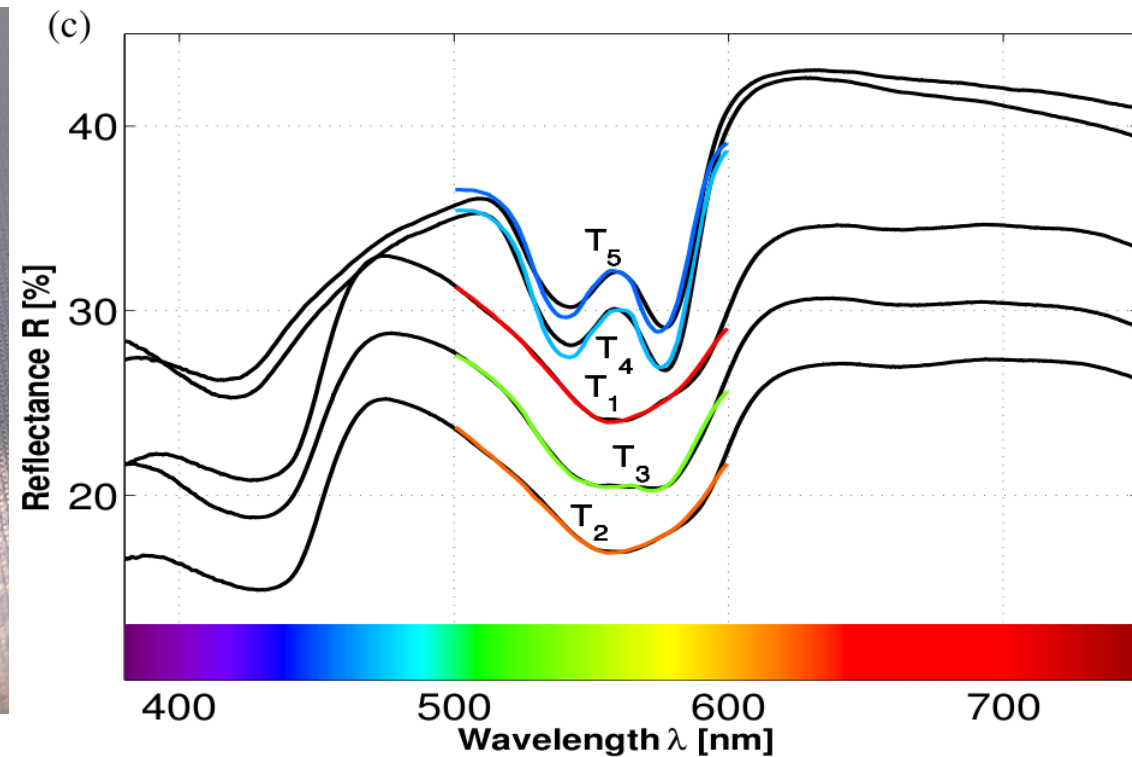
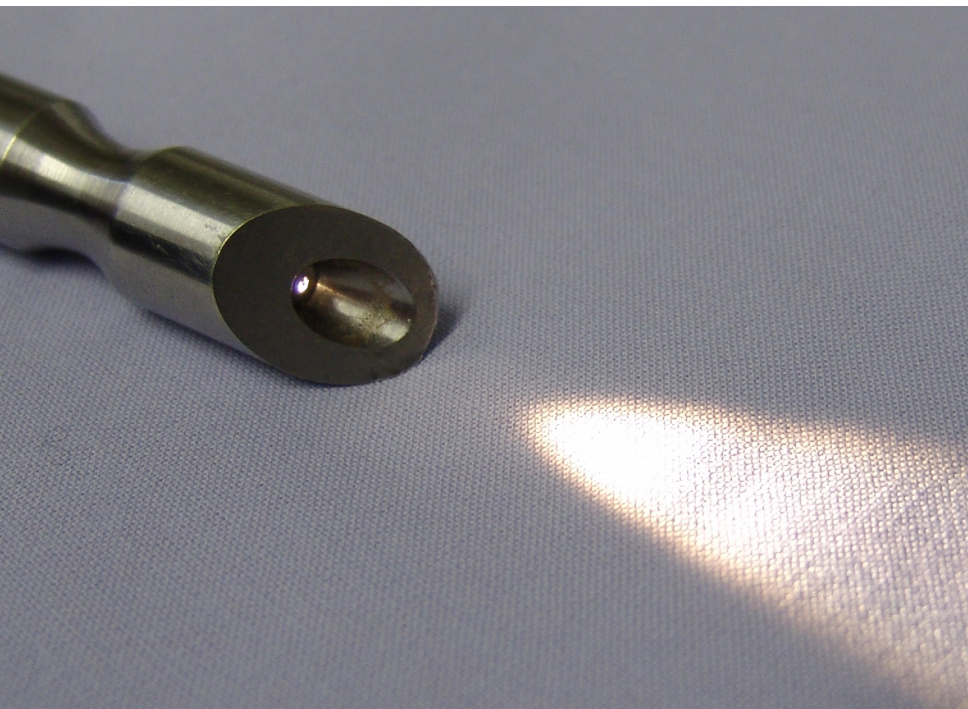
## **Livor Mortis:**

- Messung durch Reflekanzspektroskopie



## Livor Mortis:

- Messung durch Reflekanzspektroskopie



=> Temperaturabhängige Spektren von Hautflecken



GRID-enhanced simulation of a human skin model

## **Modellierung:**

mittels Monte-Carlo-Simulationen von  
Lichtstreuung in optisch trüben Medien:

## **Modellierung:**

mittels Monte-Carlo-Simulationen von  
Lichtstreuung in optisch trüben Medien:

- Mie-Theorie beschreibt Streuung an kugelförmigen Partikeln (hier: Zellkerne) in Abhängigkeit des Größenparameters  $x$

## **Modellierung:**

mittels Monte-Carlo-Simulationen von  
Lichtstreuung in optisch trüben Medien:

- Mie-Theorie beschreibt Streuung an kugelförmigen Partikeln (hier: Zellkerne) in Abhängigkeit des Größenparameters  $x$
- Wahl einer fiktiven festen Wellenlänge mit variabler Anisotropie  $g$ , variabler Absorption  $\mu_A$  und variablen Streuerdichten  $\mu_s$



## Modellierung:

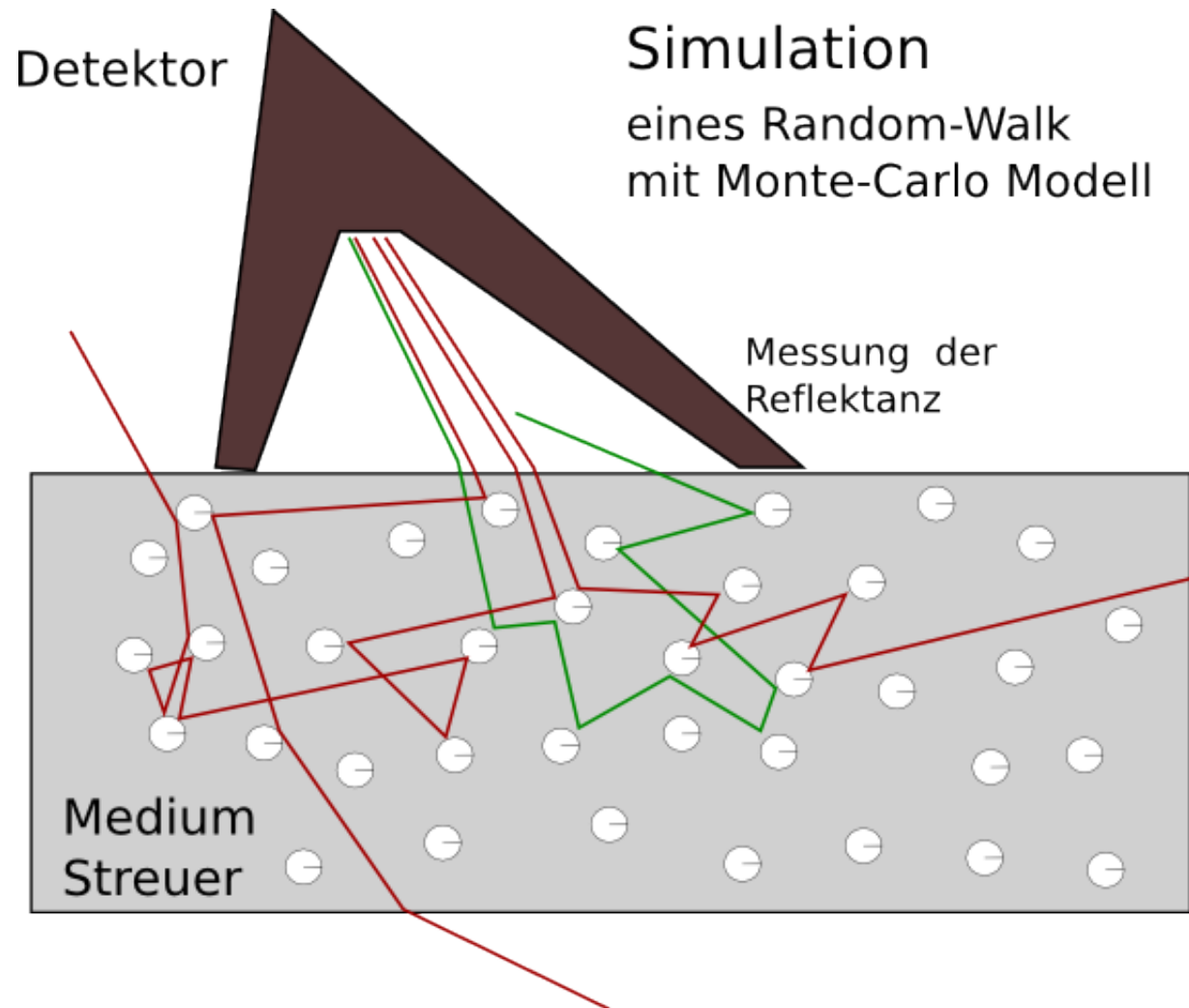
mittels Monte-Carlo-Simulationen von  
Lichtstreuung in optisch trüben Medien:

- Mie-Theorie beschreibt Streuung an kugelförmigen Partikeln (hier: Zellkerne) in Abhängigkeit des Größenparameters  $x$
- Wahl einer fiktiven festen Wellenlänge mit variabler Anisotropie  $g$ , variabler Absorption  $\mu_A$  und variablen Streuerdichten  $\mu_s$
- Monte-Carlo-Simulation der Streuung vieler einzelner Photonen in einem Material mit bekanntem Brechungsindex  $n$

# GRID-enhanced simulation of a human skin model



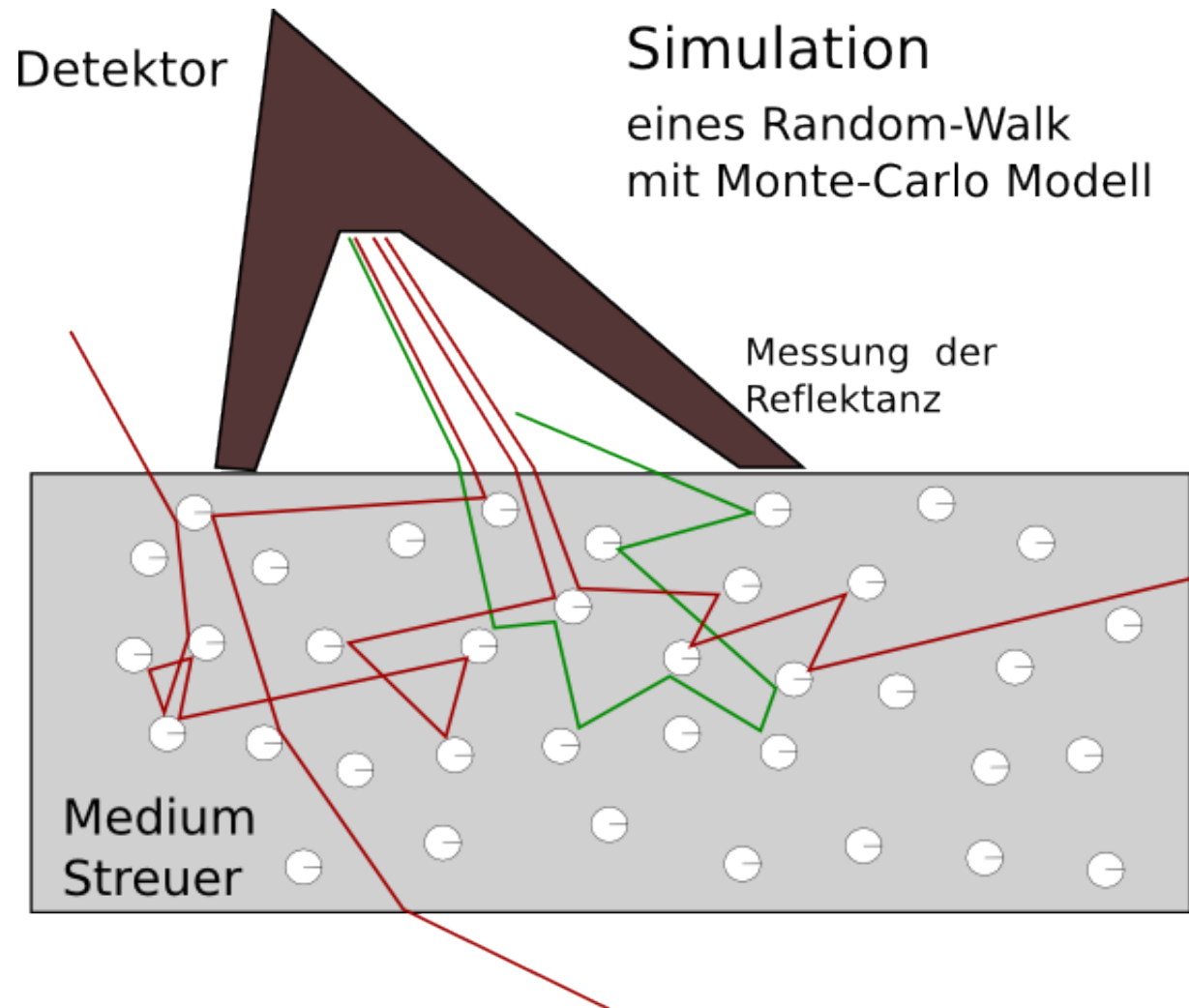
- Initialisierung
- direkte Reflektanz



# GRID-enhanced simulation of a human skin model



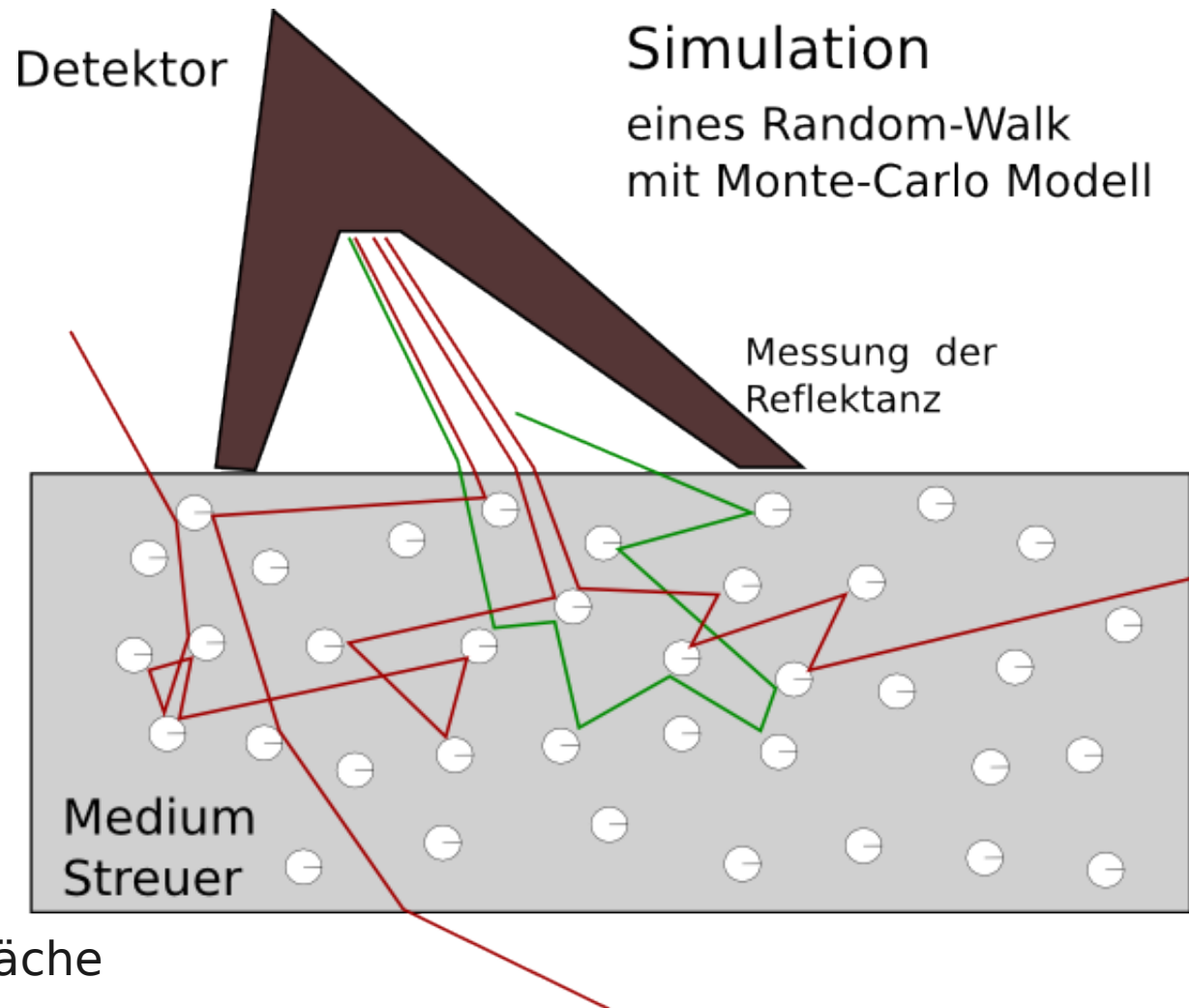
- Initialisierung
- direkte Reflektanz
- Streuung
- Transmission



# GRID-enhanced simulation of a human skin model



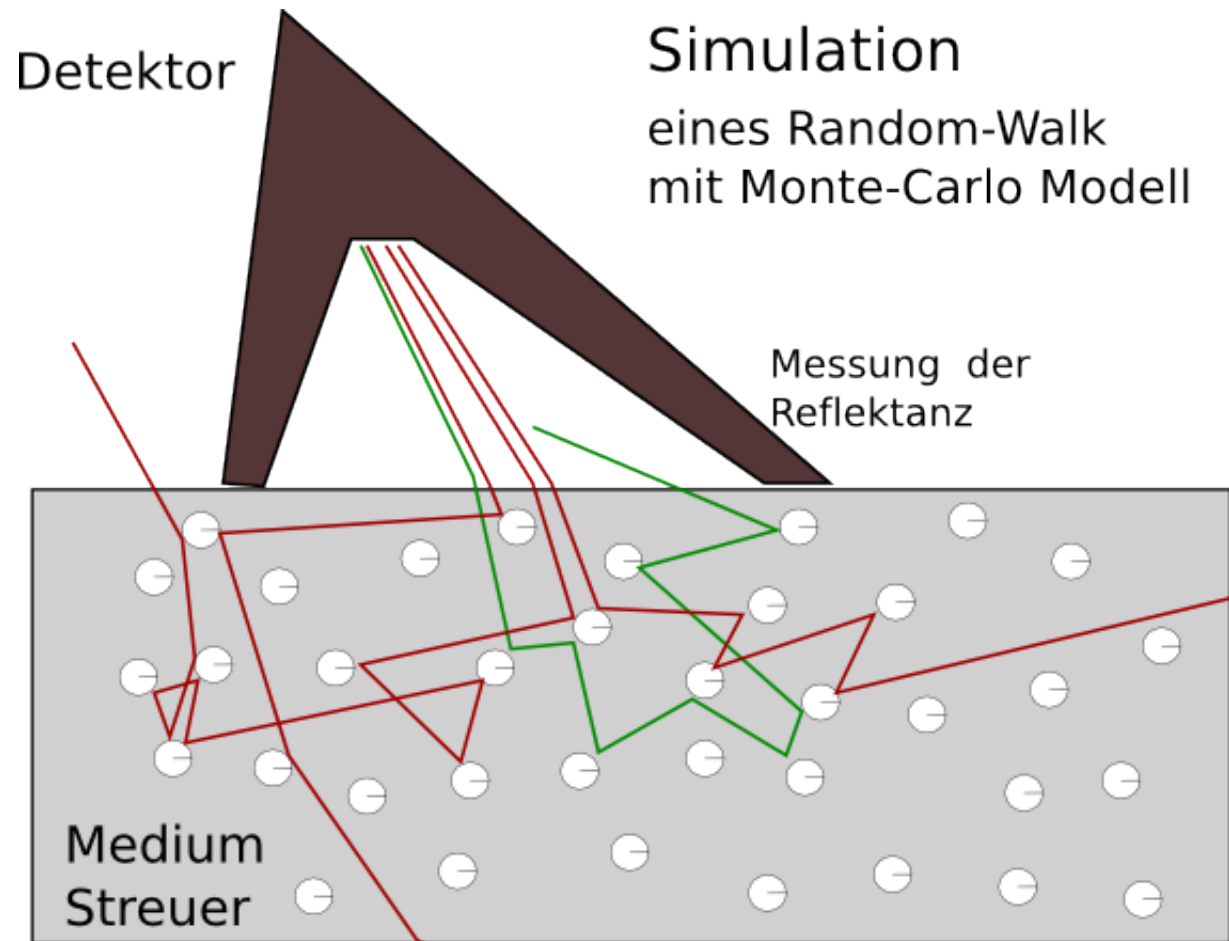
- Initialisierung
- direkte Reflektanz
- Streuung
- Transmission
- indirekte Reflektanz
- Integration über Detektorfläche



# GRID-enhanced simulation of a human skin model

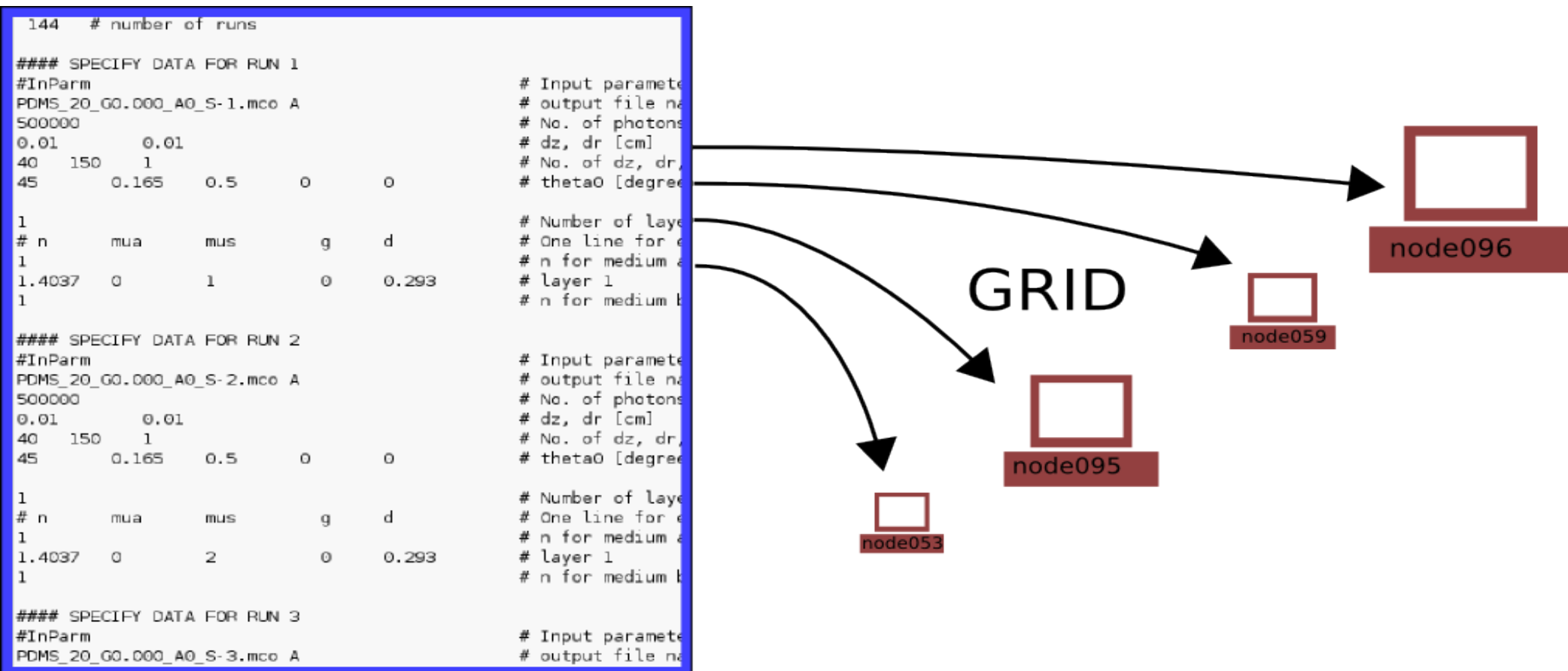


- Initialisierung
- direkte Reflektanz
- Streuung
- Transmission
- indirekte Reflektanz
- Integration über Detektorfläche
- Terminierung von Photonen



# GRID-enhanced simulation of a human skin model

## GRID-enhanced version of the MCML-Code\*:



\* Wang, L-H, S.L. Jacques: Hybrid model of Monte Carlo simulation and diffusion theory for light reflectance by turbid media. *J. Optical Soc. Am. A* 10:1746-1752, 1993.

# GRID-enhanced simulation of a human skin model

## GRID-enhanced version of the MCML-Code:

```

144 # number of runs

#### SPECIFY DATA FOR RUN 1
#InParm          # Input parameter
PDMS_20_G0.000_A0_S-1.mco A  # output file name
500000           # No. of photons
0.01            0.01         # dz, dr [cm]
40 150 1         # No. of dz, dr
45 0.165 0.5 0 0  # theta0 [degree]

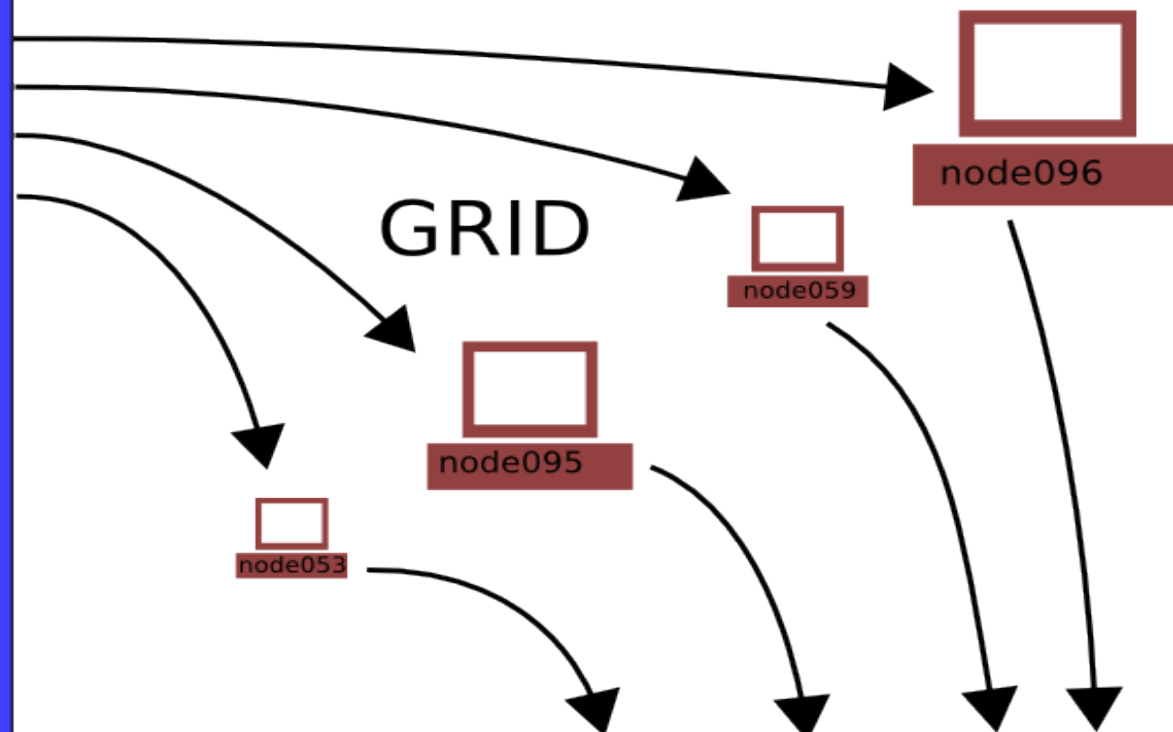
1                # Number of layers
# n      mua      mus      g      d      # One line for each layer
1                # n for medium 0
1.4037 0         1         0      0.293  # layer 1
1                # n for medium 1

#### SPECIFY DATA FOR RUN 2
#InParm          # Input parameter
PDMS_20_G0.000_A0_S-2.mco A  # output file name
500000           # No. of photons
0.01            0.01         # dz, dr [cm]
40 150 1         # No. of dz, dr
45 0.165 0.5 0 0  # theta0 [degree]

1                # Number of layers
# n      mua      mus      g      d      # One line for each layer
1                # n for medium 0
1.4037 0         2         0      0.293  # layer 1
1                # n for medium 1

#### SPECIFY DATA FOR RUN 3
#InParm          # Input parameter
PDMS_20_G0.000_A0_S-3.mco A  # output file name

```



| # RUN | CPUname-PID       | Status | Time           | End            | Start          | File                       |
|-------|-------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|
| ...   |                   |        |                |                |                |                            |
| 33    | node059.bfg-26083 | done   | 13.261 hrs     | 23:40 04/16/08 | 10:25 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S20.0.mco |
| 34    | node053.bfg-10990 | done   | 4.527 hrs      | 15:03 04/16/08 | 10:31 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S22.0.mco |
| 35    | node095.bfg-21625 | 80 %   | 21:42 04/19/08 | 07:45 04/20/08 | 10:33 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S26.0.mco |
| 36    | node096.bfg-29160 | 40 %   | 16:14 04/19/08 | 22:16 04/22/08 | 10:36 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S30.0.mco |
| 37    | node095.bfg-60780 | done   | 65.203 hrs     | 03:52 04/19/08 | 10:40 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S35.0.mco |
| 38    | node094.bfg-21240 | 20 %   | 19:52 04/19/08 | 21:33 05/03/08 | 11:24 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S40.0.mco |
| 39    | node053.bfg-10990 | done   | 0.000 hrs      | 15:03 04/16/08 | 15:03 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.1_S-0.0.mco |
| 40    | node053.bfg-10990 | done   | 0.000 hrs      | 15:03 04/16/08 | 15:03 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.1_S-0.1.mco |
| 41    | node053.bfg-10990 | done   | 0.000 hrs      | 15:03 04/16/08 | 15:03 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.1_S-0.2.mco |

# GRID-enhanced simulation of a human skin model

## GRID-enhanced version of the MCML-Code:

```

144 # number of runs

#### SPECIFY DATA FOR RUN 1
#InParm          # Input parameter
PDMS_20_G0.000_A0_S-1.mco A  # output file name
500000           # No. of photons
0.01            0.01         # dz, dr [cm]
40 150 1         # No. of dz, dr
45 0.165 0.5 0 0  # theta0 [degree]

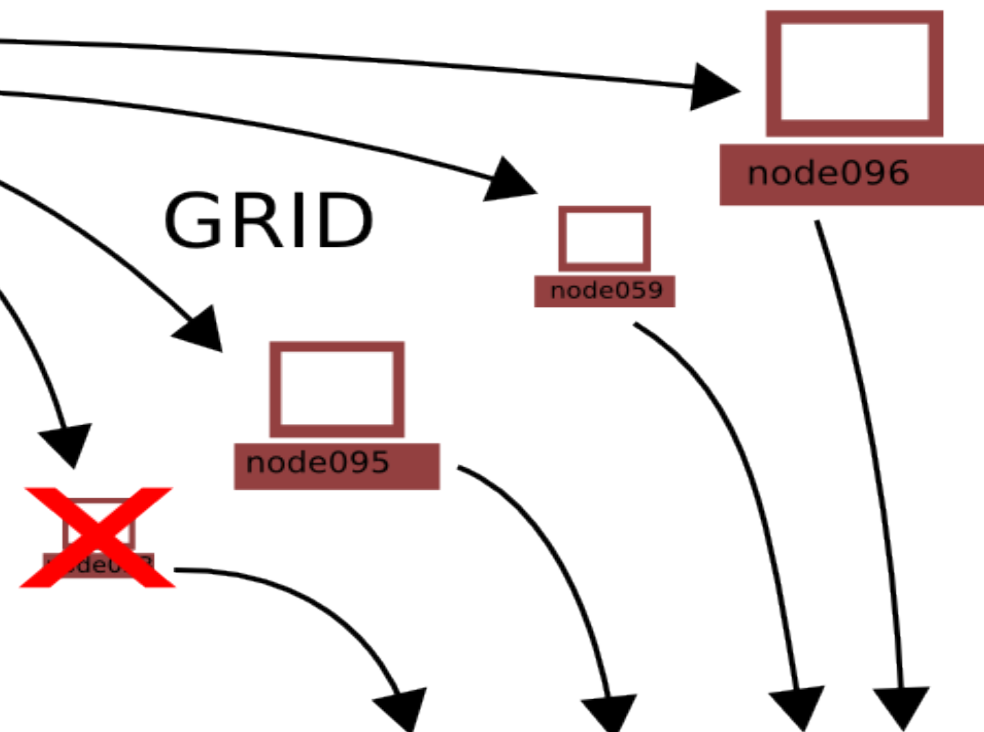
1               # Number of layers
# n      mua      mus      g      d      # One line for each layer
1               # n for medium 0
1.4037 0        1        0      0.293    # layer 1
1               # n for medium 1

#### SPECIFY DATA FOR RUN 2
#InParm          # Input parameter
PDMS_20_G0.000_A0_S-2.mco A  # output file name
500000           # No. of photons
0.01            0.01         # dz, dr [cm]
40 150 1         # No. of dz, dr
45 0.165 0.5 0 0  # theta0 [degree]

1               # Number of layers
# n      mua      mus      g      d      # One line for each layer
1               # n for medium 0
1.4037 0        2        0      0.293    # layer 1
1               # n for medium 1

#### SPECIFY DATA FOR RUN 3
#InParm          # Input parameter
PDMS_20_G0.000_A0_S-3.mco A  # output file name

```

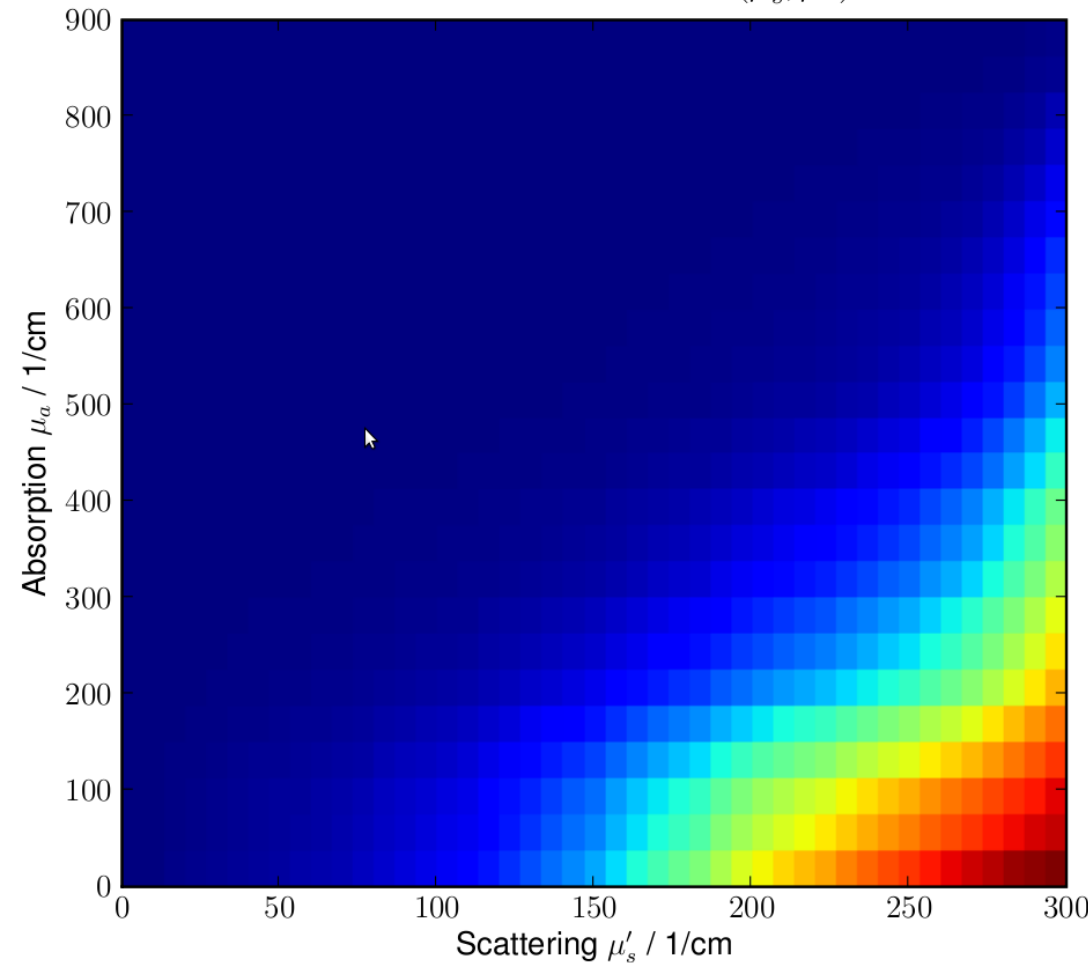


| # RUN | CPUname-PID       | Status | Time           | End            | Start          | File                       |
|-------|-------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|
| ...   |                   |        |                |                |                |                            |
| 33    | node059.bfg-26083 | done   | 13.261 hrs     | 23:40 04/16/08 | 10:25 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S20.0.mco |
| 34    | node053.bfg-10990 | done   | 4.527 hrs      | 15:03 04/16/08 | 10:31 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S22.0.mco |
| 35    | node095.bfg-21625 | 80 %   | 21:42 04/19/08 | 07:45 04/20/08 | 10:33 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S26.0.mco |
| 36    | node096.bfg-29160 | 40 %   | 16:14 04/19/08 | 22:16 04/22/08 | 10:36 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S30.0.mco |
| 37    | node095.bfg-60780 | done   | 65.203 hrs     | 03:52 04/19/08 | 10:40 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S35.0.mco |
| 38    | node094.bfg-21240 | 20 %   | 19:52 04/19/08 | 21:33 05/03/08 | 11:24 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.0_S40.0.mco |
| 39    | node053.bfg-10990 | done   | 0.000 hrs      | 15:03 04/16/08 | 15:03 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.1_S-0.0.mco |
| 40    | node053.bfg-10990 | done   | 0.000 hrs      | 15:03 04/16/08 | 15:03 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.1_S-0.1.mco |
| 41    | node053.bfg-10990 | break  |                | 15:03 04/16/08 | 15:03 04/16/08 | Haut_G0.90_A-0.1_S-0.2.mco |



## Erhaltene Daten:

Reflectance Inside Detector  $R(\mu'_s, \mu_a) / \text{a.u.}$



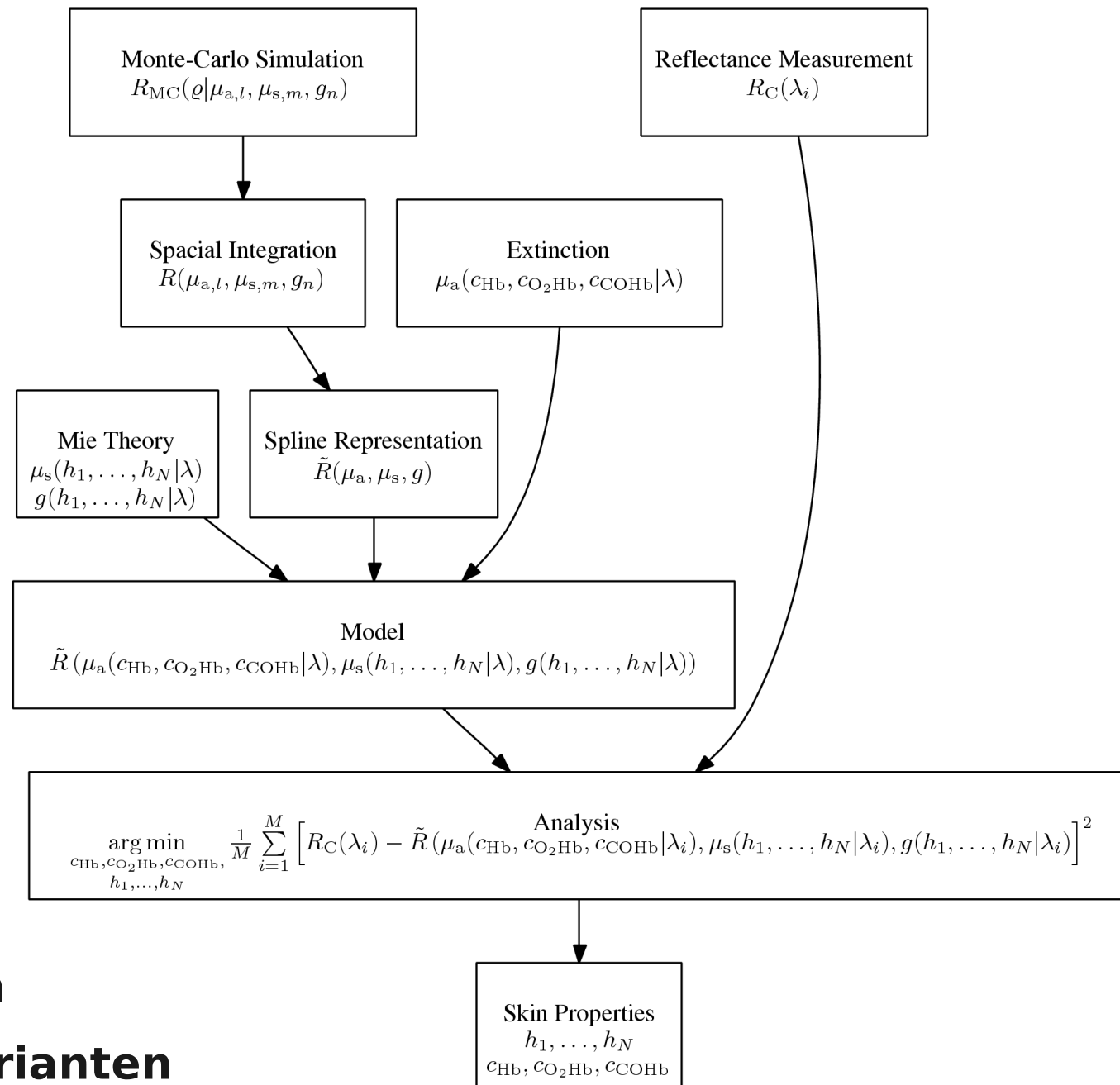
```

1|; -*- fmf-version: 1.0; coding: iso-8859-15 -*-
2[*reference]
3creator: "Philippe-André Bourdin and Andreas W. Liehr"
4created: 2009-03-13
5title: Steady state Monte-Carlo simulation of turbid media
6place: Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)
7[simulation]
8program: MCML 1.4
9model: semi-infinite skin model
10number of layers: n_L = 1
11layer thickness: d_L = 10 cm
12refraction index: n_M = 1.36
13reflectance integration: inside detector
14[summary]
15program: MCONSolidATE.pl (revision 4045)
16[parameters]
17detector radius (semiminor axis): r_D = 0.342 cm
18detector x shift: x_D = 0 cm
19detector y shift: y_D = 0 cm
20beam angle: theta_0 = 45 deg (0 = perpendicular)
21beam radius: r_S = 0.1 cm
22number of photon packets: n_{pp} = 100000
23[*data definitions]
24absorption: \mu_a [cm^-1]
25scattering: \mu_s^\prime [cm^-1]
26anisotropy: g
27reflectance inside detector: R(\mu_a, \mu_s^\prime, g)
28[*data]
29#      \mu_a  \mu_s^\prime      g      R
30      0      0      0      0.000000
31      0      0.1      0      0.011043
32      0      0.2      0      0.022027
33      0      0.3      0      0.031201
34      0      0.4      0      0.040374
35      0      0.5      0      0.049043
36      0      0.6      0      0.056948
37      0      0.7      0      0.064222
38      0      0.8      0      0.072824
39      0      0.9      0      0.079372
40      0      1      0      0.087548
41      0      1.2      0      0.100179
42      0      1.4      0      0.114777
43      0      1.6      0      0.126168
44      0      1.8      0      0.138896
45      0      2      0      0.152767

```

# GRID-enhanced simulation of a human skin model

## Nicht-lineare Regularisierung:



=> Konzentrationen  
der Hämoglobin-Varianten

# Physikalische Datenformate



## Grundlegende Vergleiche:

### - Text-Dateien:

Einfaches Format, Flexibilität hängt vom Programmierer ab,  
Speicherplatz wird sehr ineffizient belegt (8-fach)

### - Binäre Dateien:

Format abhängig von Programmiersprache und Prozessortyp,  
Struktur ist fixiert, sehr effizient, enthält i.d.R. keine Meta-Daten

## Grundlegende Vergleiche:

### - Text-Dateien:

Einfaches Format, Flexibilität hängt vom Programmierer ab,  
Speicherplatz wird sehr ineffizient belegt (8-fach)

### - Binäre Dateien:

Format abhängig von Programmiersprache und Prozessortyp,  
Struktur ist fixiert, sehr effizient, enthält i.d.R. keine Meta-Daten

### - Physikalische Datenformate:

Einfaches Format, volle Flexibilität, einheitenbehaftete Daten,  
Struktur ist selbsterklärend, höchste Effizienz, enthält Meta-Daten

Beispiele: **NetCDF**, **HDF5**, **Full-Metadata-Format** (FMF)

## **Anwendung von HDF5:**

- NASA Earth Observing System (EOS):

wird bis 2014 ca. 15 Petabyte Daten in HDF speichern

## Anwendung von HDF5:

- NASA Earth Observing System (EOS):

wird bis 2014 ca. 15 Petabyte Daten in HDF speichern

- Import-/Exportmöglichkeiten:

Zahlreiche Programmiersprachen, Visualisierungs- und Analyseprogramme bieten den HDF5-Im-/Export bereits an:  
Fortran, C/C++, Java, IDL, ROOT, Matlab, Mathematica, R, etc.

- Visualisierung:

direkte Datenansicht mit HDFexplorer und HDF5view bzw.  
visuell mit TechPlot, ParaView (VTK), Vapor (VDK), VisIt (Pixie)

# Elektronisches Laborbuch





## **Anforderung:**

- EU-finanzierte Projekte:

Dokumentation und Reproduzierbarkeit der Resultate für 10 Jahre

## **Anforderung:**

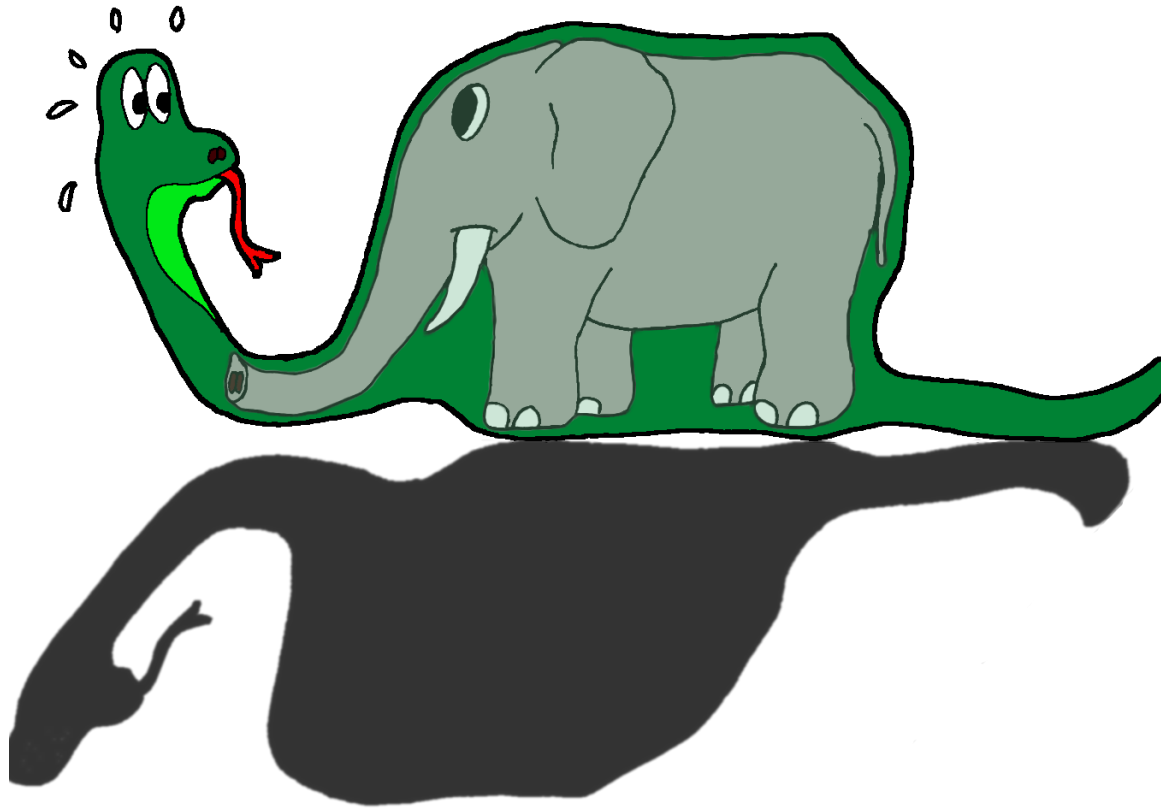
### **- EU-finanzierte Projekte:**

Dokumentation und Reproduzierbarkeit der Resultate für 10 Jahre

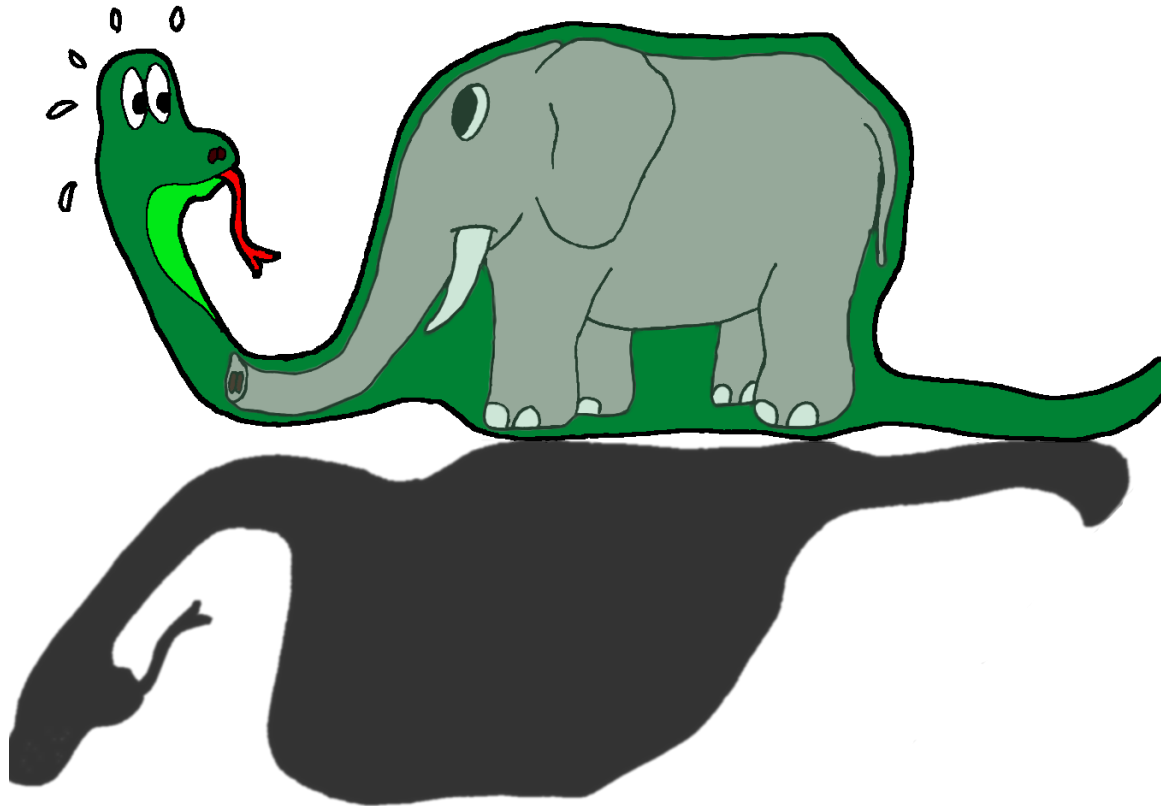
## **Lösungsweg:**

- \* Archivierung aller eigenen Programmcodes z.B. mit Subversion
- \* Speicherung des „Rezepts“ zur Generierung von Daten:
  - die genutzten Quell-Daten/-Parameter inkl. Zeitstempel
  - Revisionsnummern aller benutzten Verarbeitungsprogramme
  - Hierarchie des Verarbeitungsweges
- \* Archivierung des eigentlichen Resultats

## Pyphant & Full-Metadata-Format:

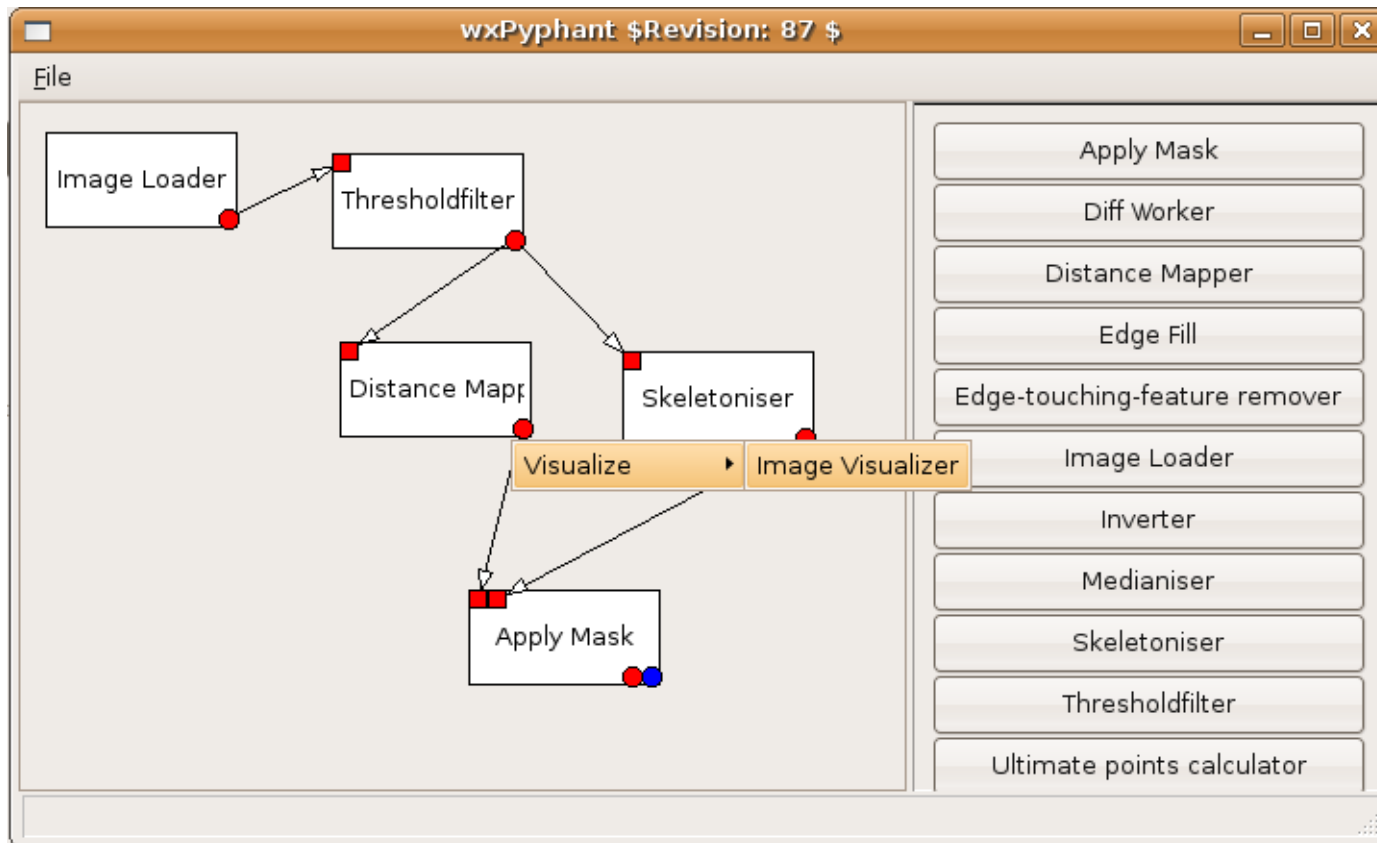


## Pyphant & Full-Metadata-Format:

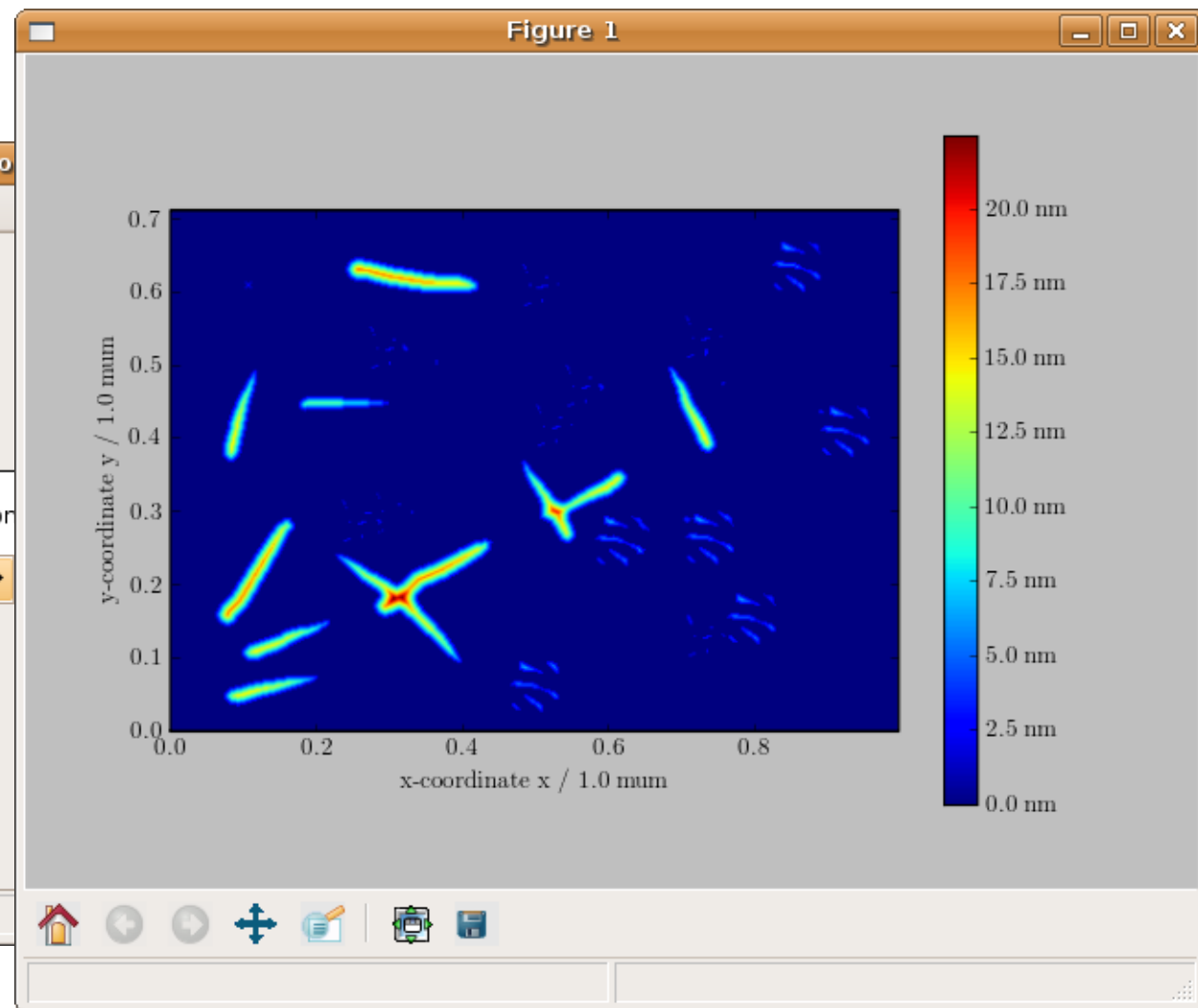
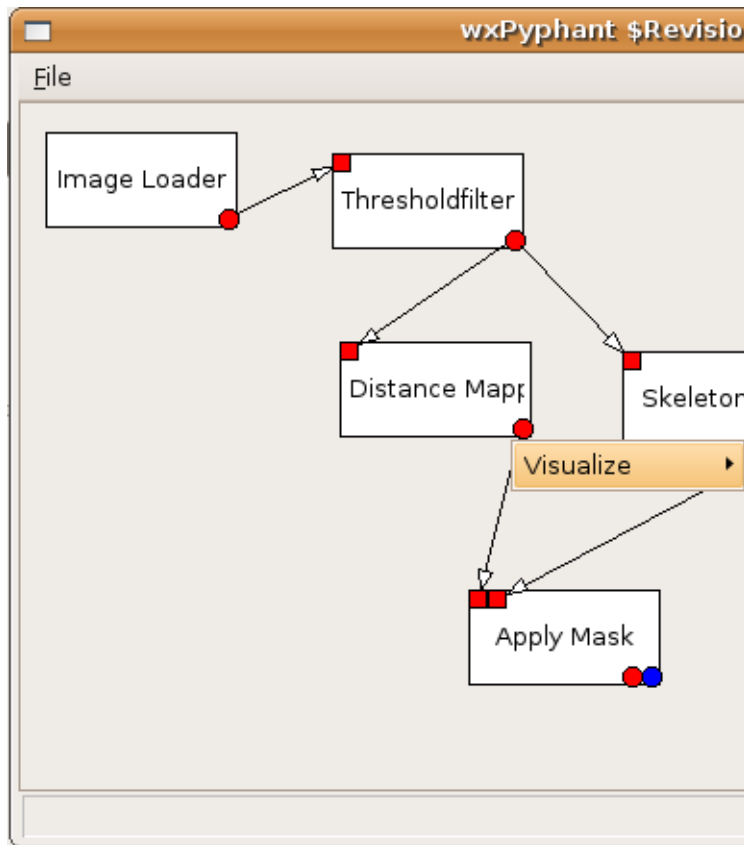


- \* e-Laborbuch im Sinne eines „Rezept-Archivs“ zur Dokumentation
- \* benutzt Physikalisches Datenformat mit Unterstützung von HDF5

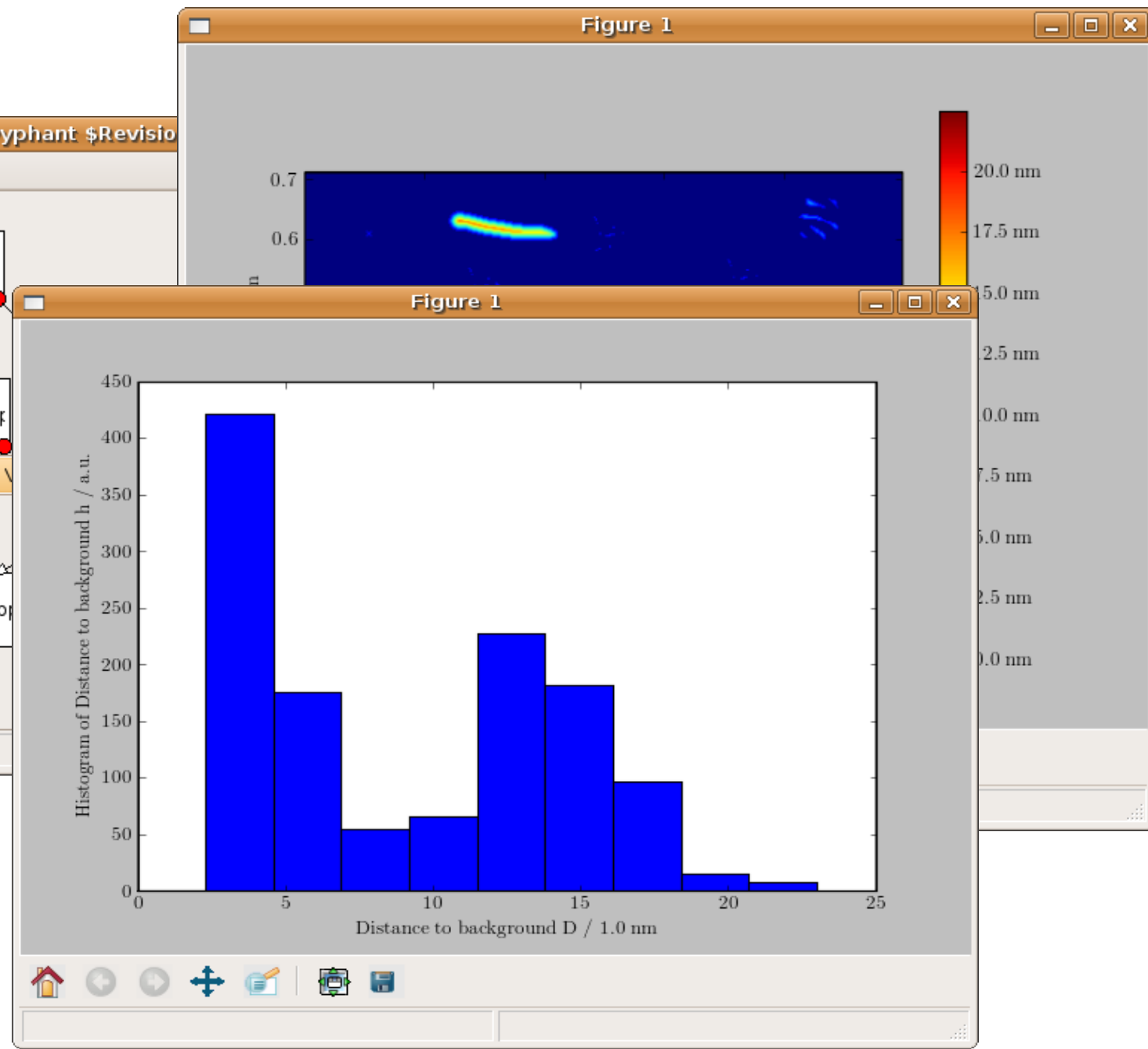
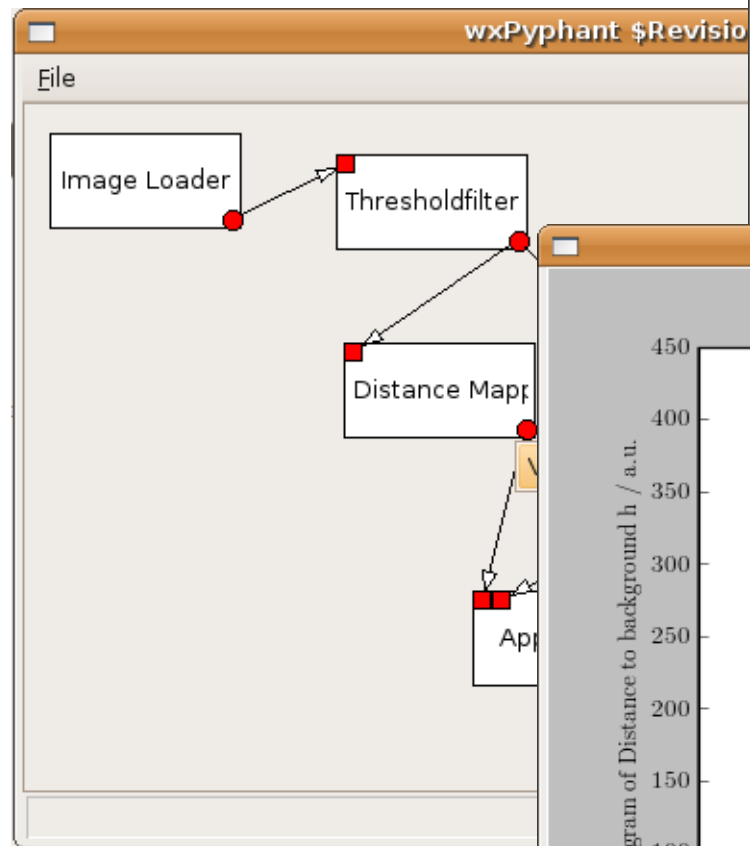
## Pyphant:



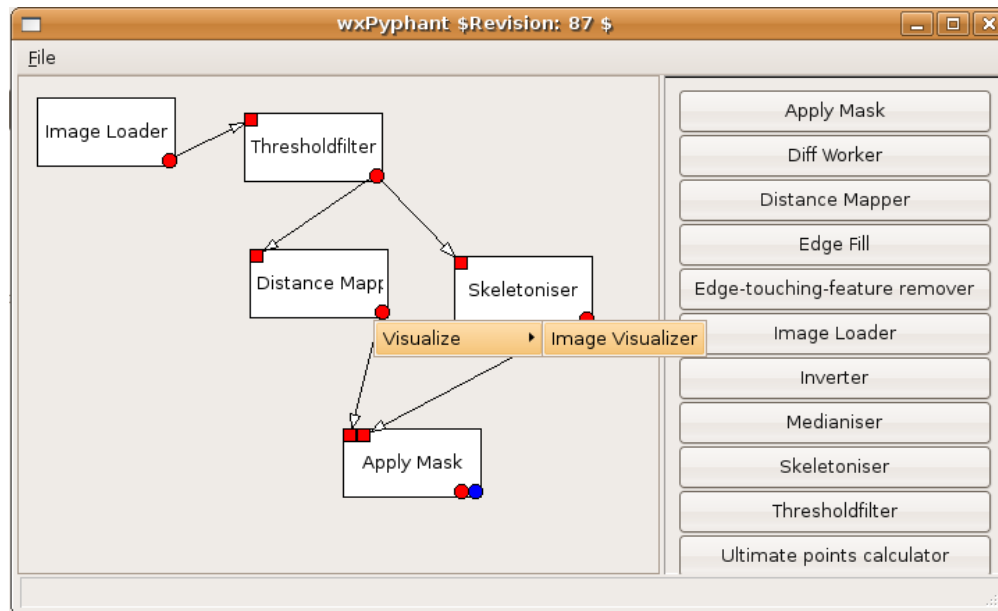
## Pyphant:



## Pyphant:



## Pyphant & Full-Metadata-Format:



```

1|; -*- fmf-version: 1.0; coding: iso-8859-15 -*-
2[*reference]
3creator: "Philippe-André Bourdin and Andreas W. Liehr"
4created: 2009-03-13
5title: Steady state Monte-Carlo simulation of turbid media
6place: Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)
7[simulation]
8program: MCML 1.4
9model: semi-infinite skin model
10number of layers: n_L = 1
11layer thickness: d_L = 10 cm
12refraction index: n_M = 1.36
13reflectance integration: inside detector
14[summary]
15program: MCONSolidate.pl (revision 4045)
16[parameters]
17detector radius (semiminor axis): r_D = 0.342 cm
18detector x shift: x_D = 0 cm
19detector y shift: y_D = 0 cm
20beam angle: theta_0 = 45 deg (0 = perpendicular)
21beam radius: r_S = 0.1 cm
22number of photon packets: n_{pp} = 100000
23[*data definitions]
24absorption: \mu_a [cm^-1]
25scattering: \mu_s^\prime [cm^-1]
26anisotropy: g
27reflectance inside detector: R (\mu_a, \mu_s^\prime, g)
28[*data]
29#    \mu_a  \mu_s^\prime    g    R
30    0      0          0    0  0.000000
31    0      0.1        0    0  0.011043
32    0      0.2        0    0  0.022027
33    0      0.3        0    0  0.031201
34    0      0.4        0    0  0.040374
35    0      0.5        0    0  0.049043
36    0      0.6        0    0  0.056948
37    0      0.7        0    0  0.064222
38    0      0.8        0    0  0.072824
39    0      0.9        0    0  0.079372

```

Links:

[http://www.FMF.Uni-Freiburg.de/service/servicegruppen/sg\\_wissinfo/Software/Pyphant](http://www.FMF.Uni-Freiburg.de/service/servicegruppen/sg_wissinfo/Software/Pyphant)

Full-Metadata-Format: <http://arxiv.org/abs/0904.1299>



Fragen...?



# Das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik:



<http://www.KIS.Uni-Freiburg.de/>

# Aktuelle Observatorien und Teleskope



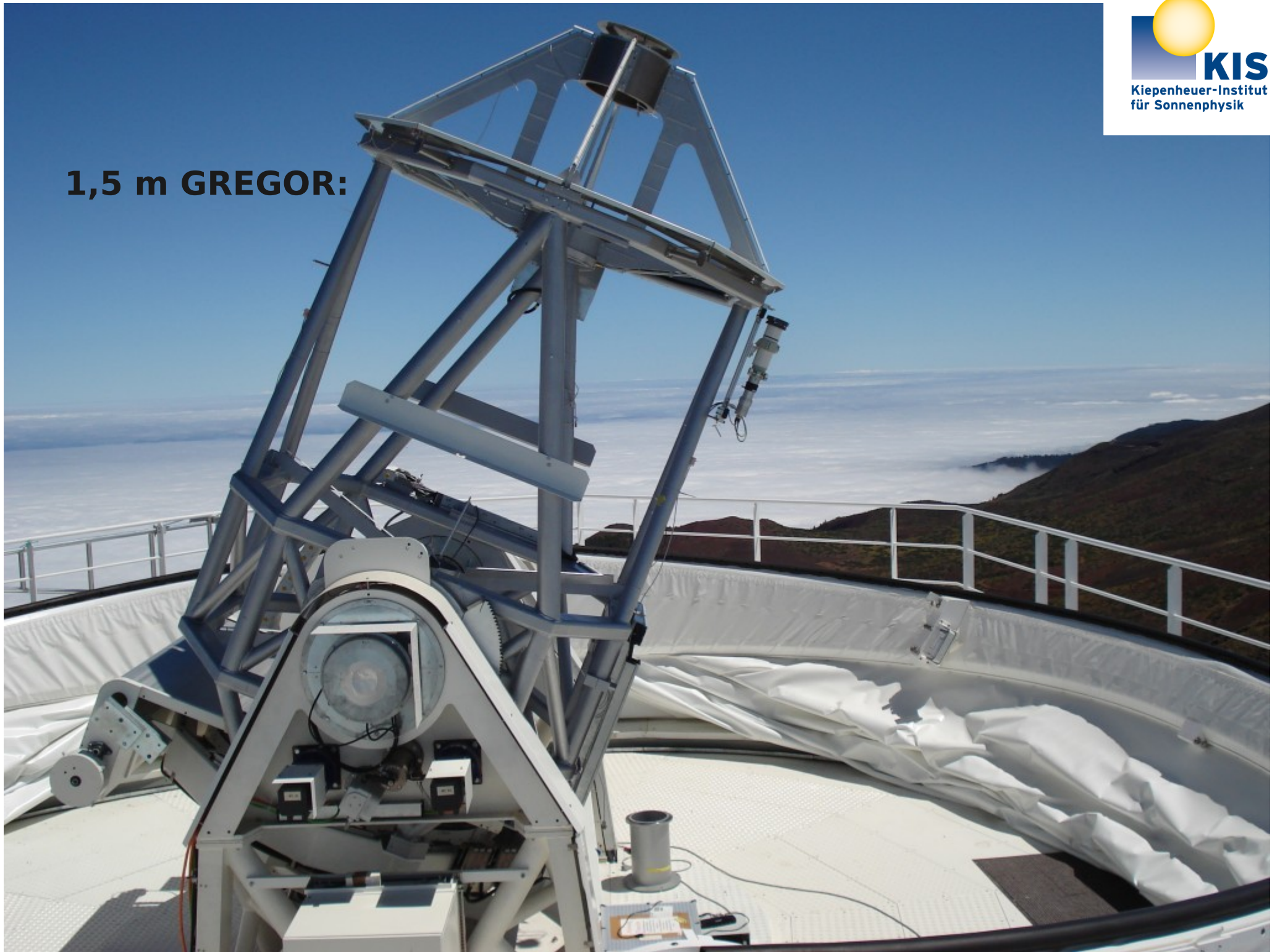
# Aktuelle Observatorien und Teleskope

ChroTel with the  
buildings of the Newton Telescope  
and GREGOR in the background



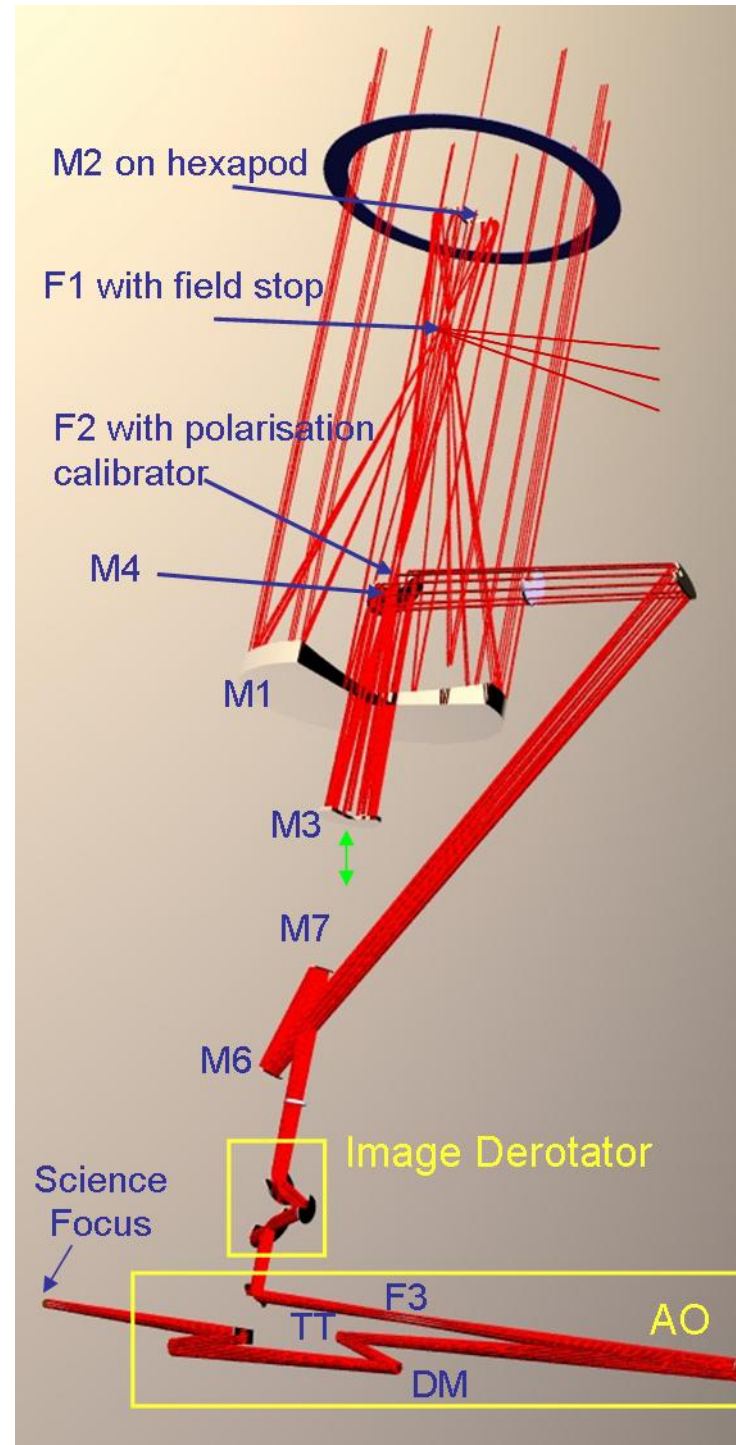


## 1,5 m GREGOR:



## 1,5 m GREGOR:

- Strahlengang
- Adaptive Optik
- 70 km Auflösung auf der Sonne
- Spektro-Polarimetrie
- Messung von Magnetfeldern

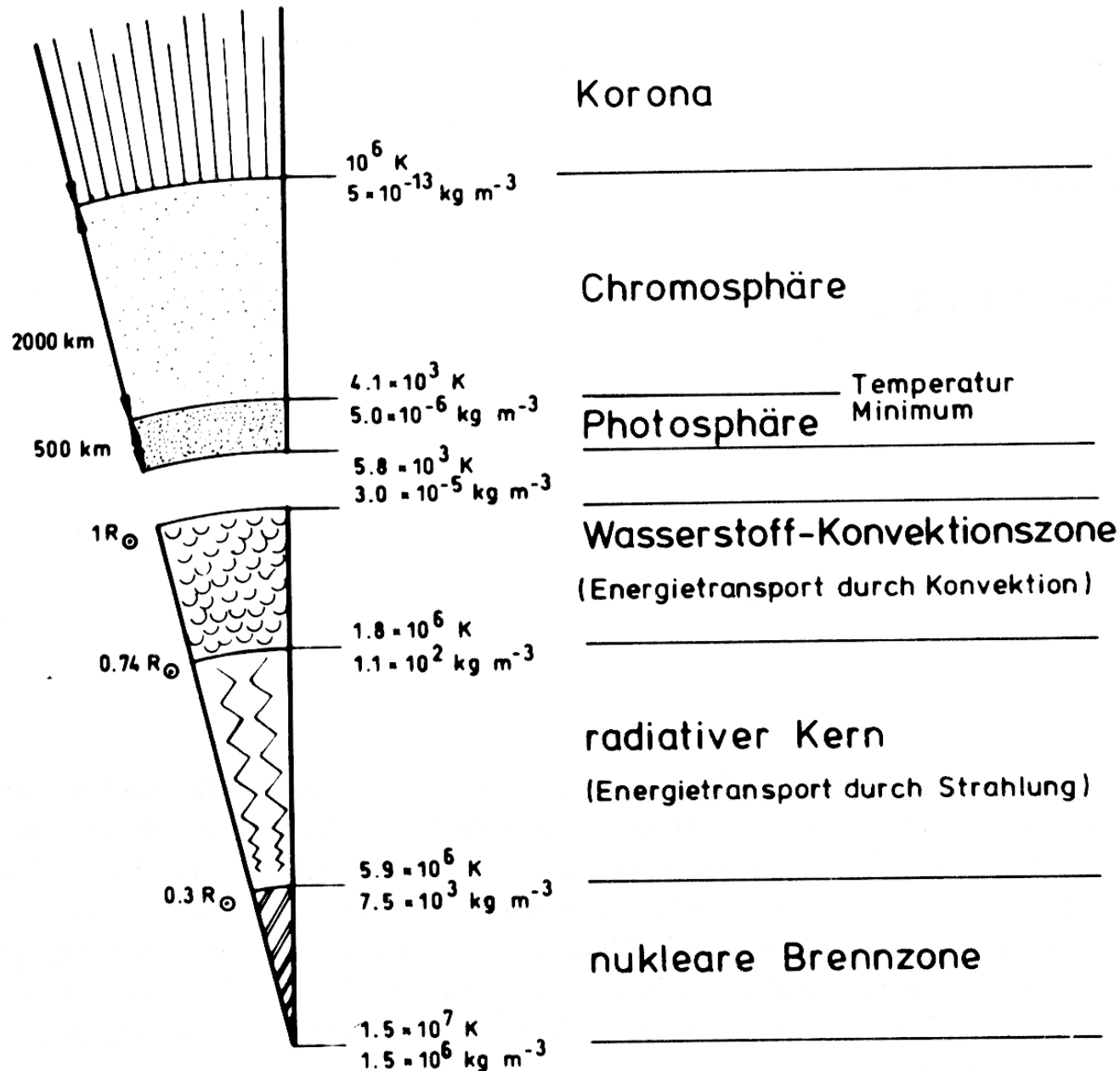


# Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment



# Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## Aufbau:

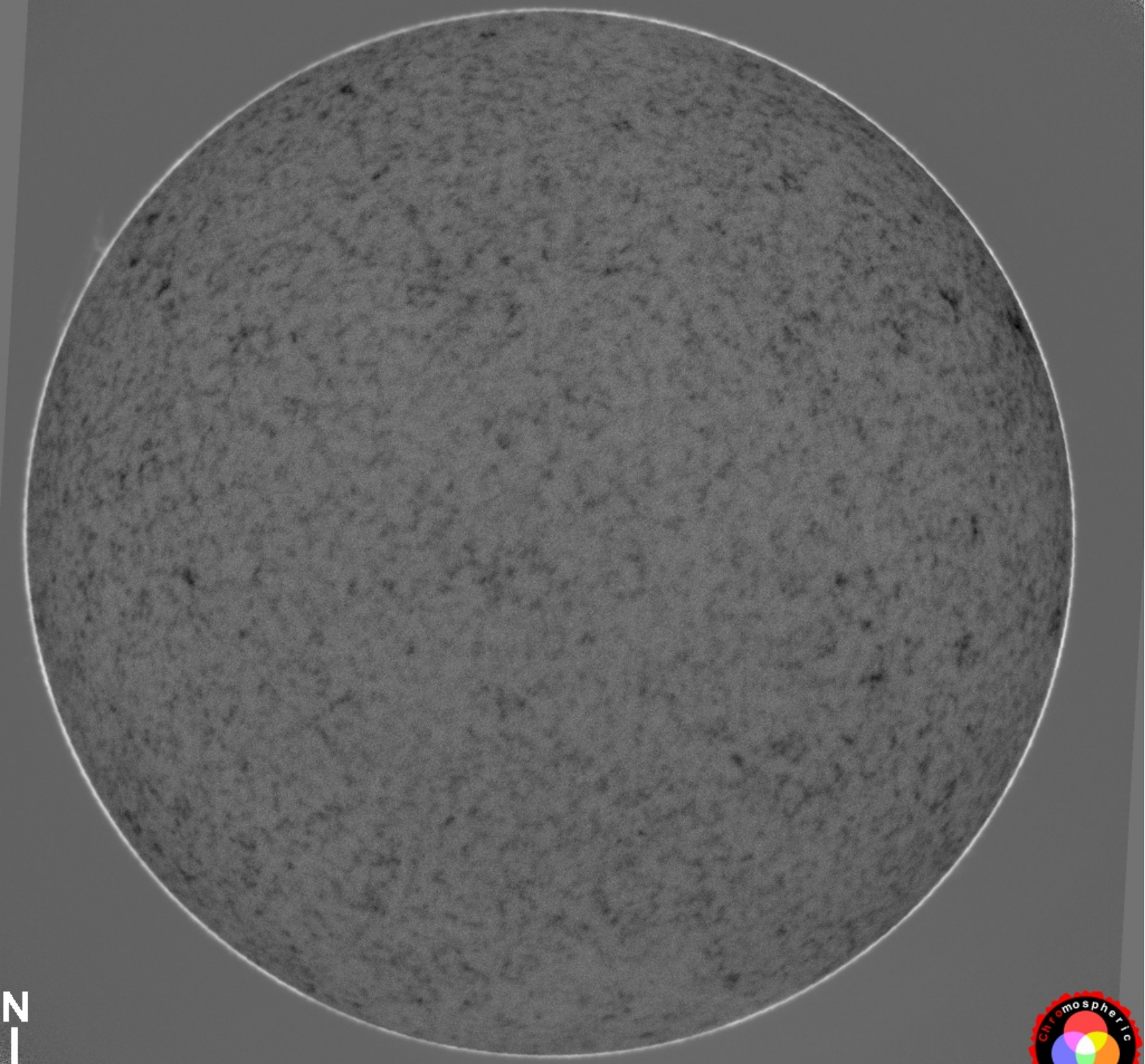






N  
W





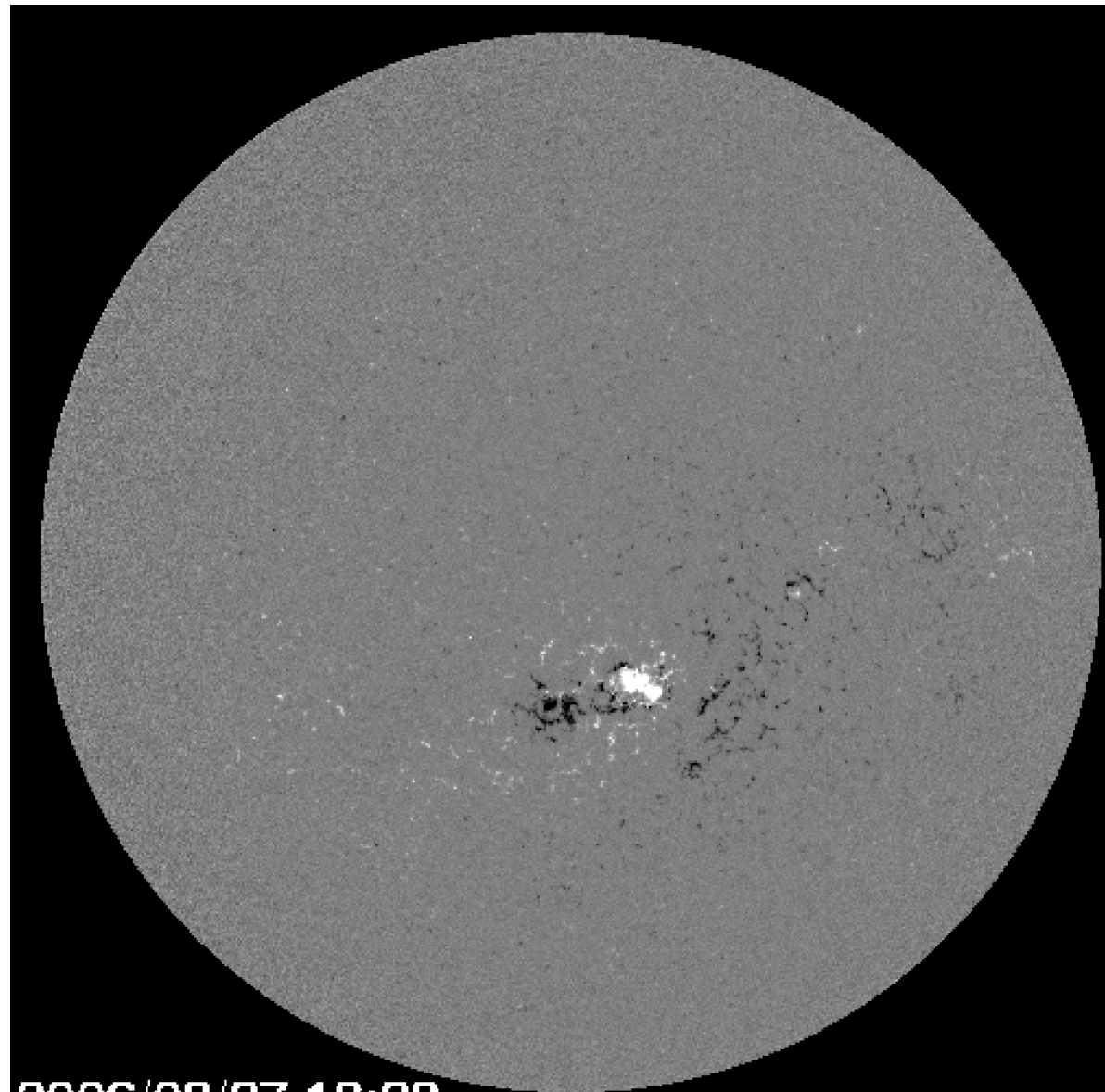
N  
W



# Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## Magnetfelder:

- Beobachtung mit  
MDI an Bord von SOHO



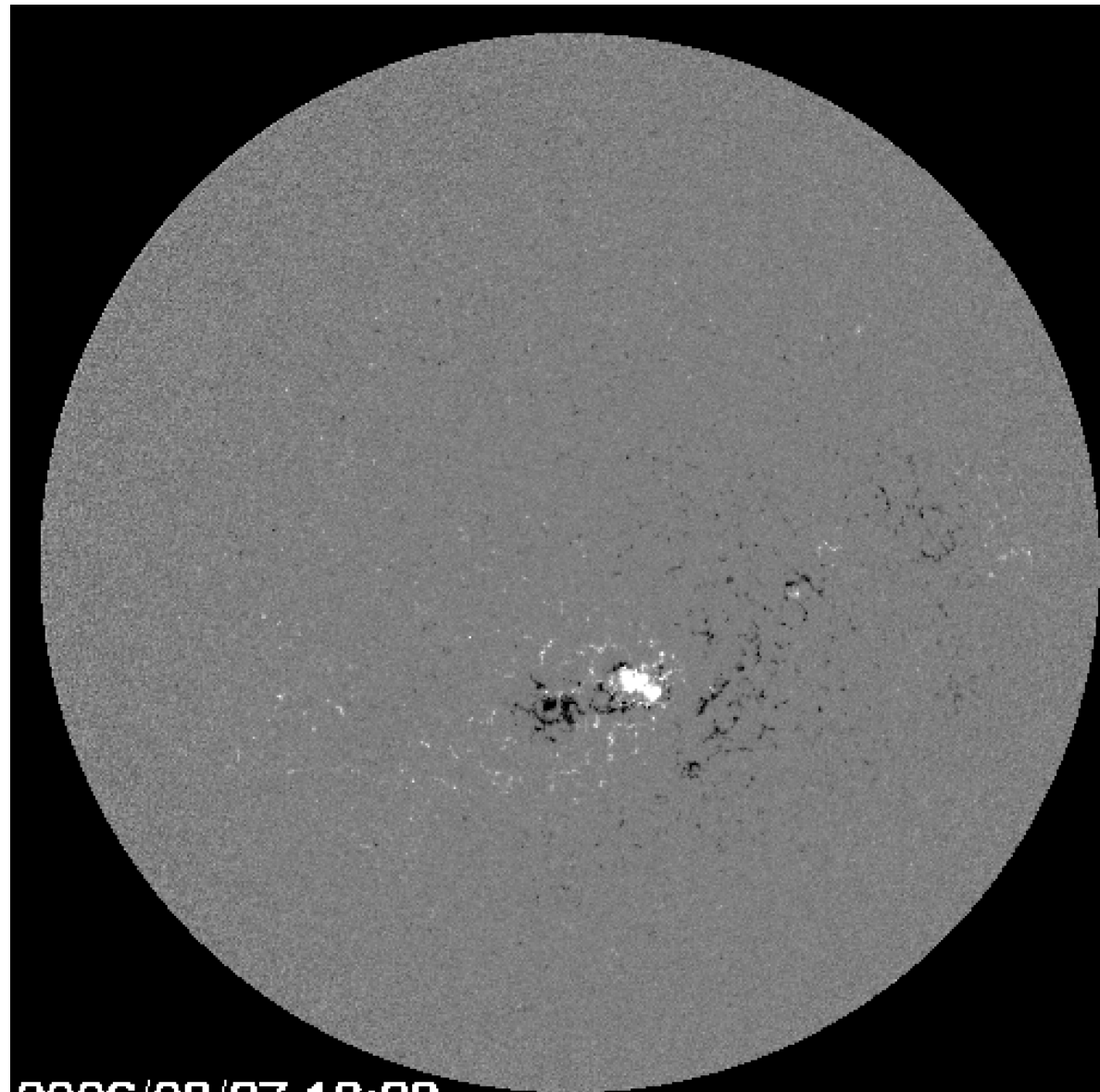
2006/08/27 13:28



# Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## Magnetfelder:

- Beobachtung mit  
MDI an Bord von SOHO
- Aktive Region  
mit gemischter Polarität

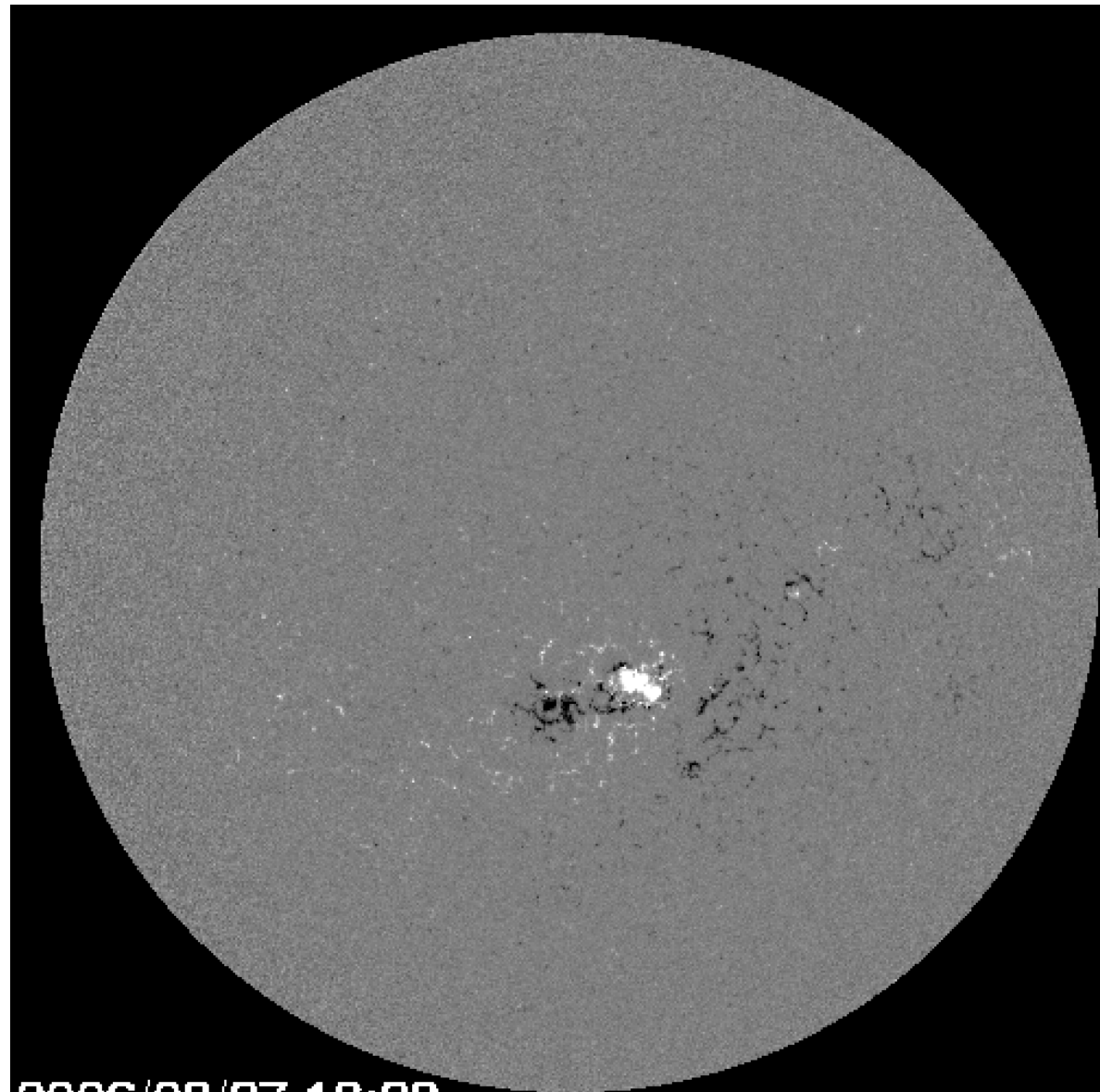


2006/08/27 13:28

# Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## Magnetfelder:

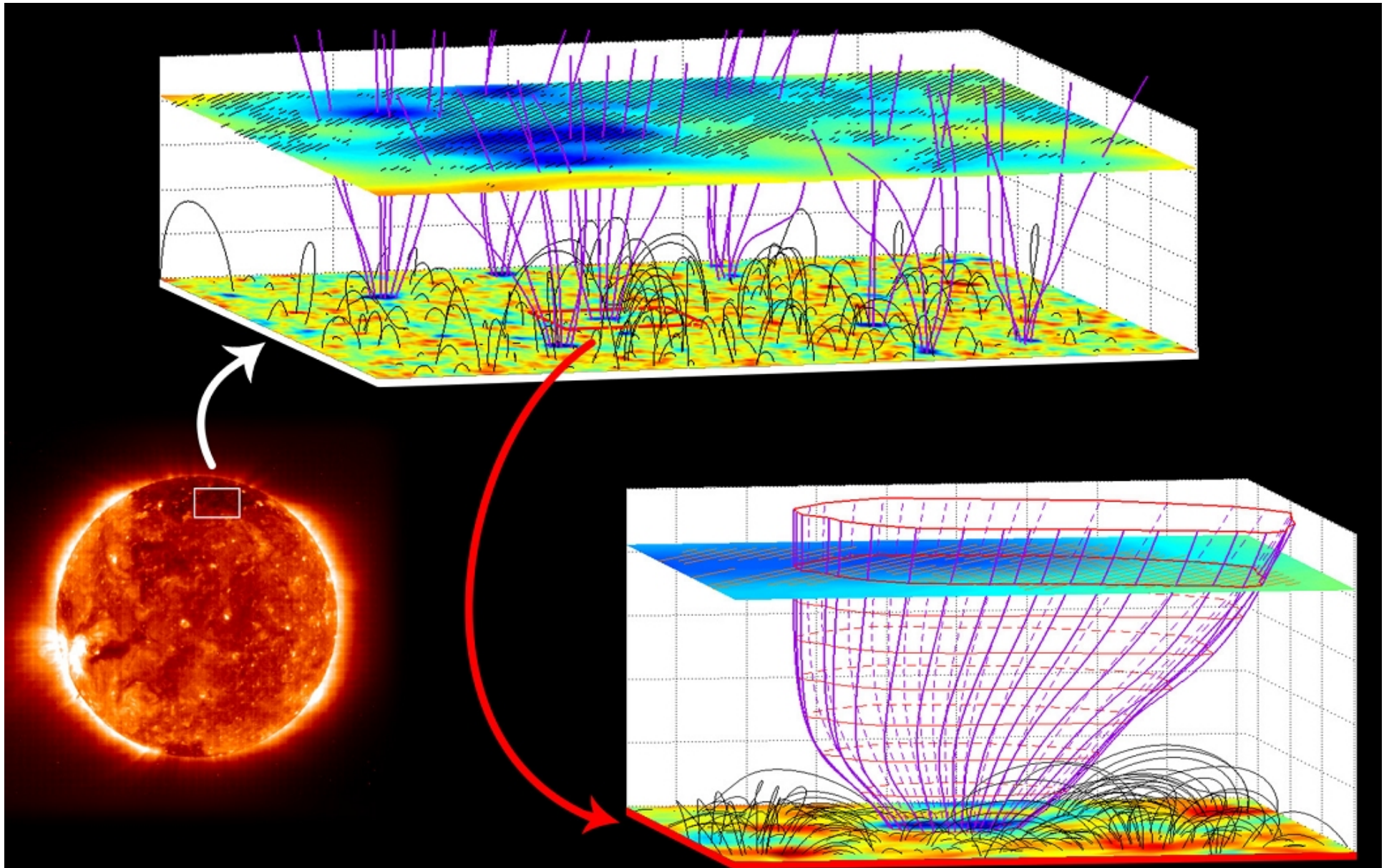
- Beobachtung mit  
MDI an Bord von SOHO
- Aktive Region  
mit gemischter Polarität
- Magnetischer Teppich



2006/08/27 13:28

# Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## Magnetfelder:



Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

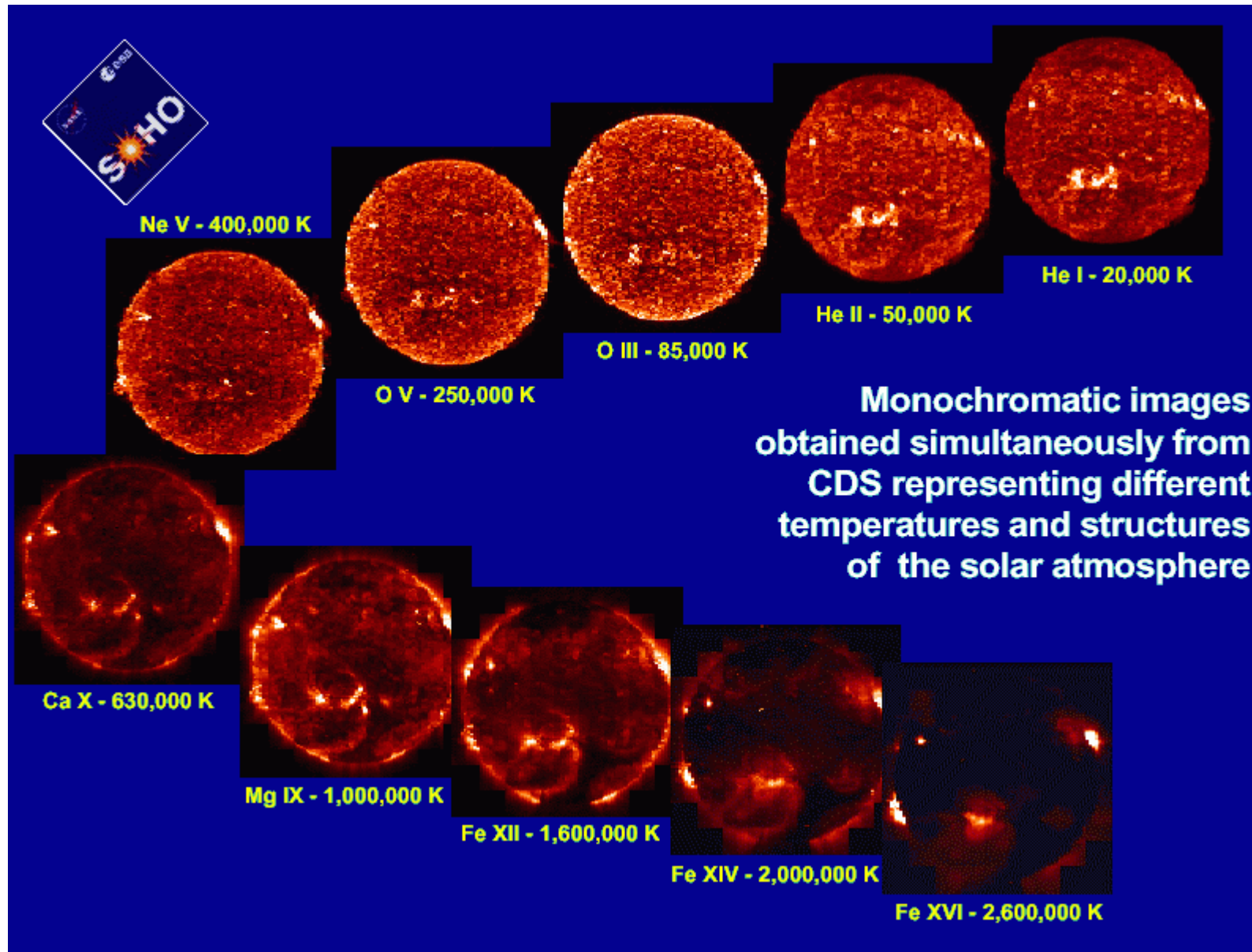
## **Konvektion in der Photosphäre – Reaktion der Chromosphäre:**





# Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

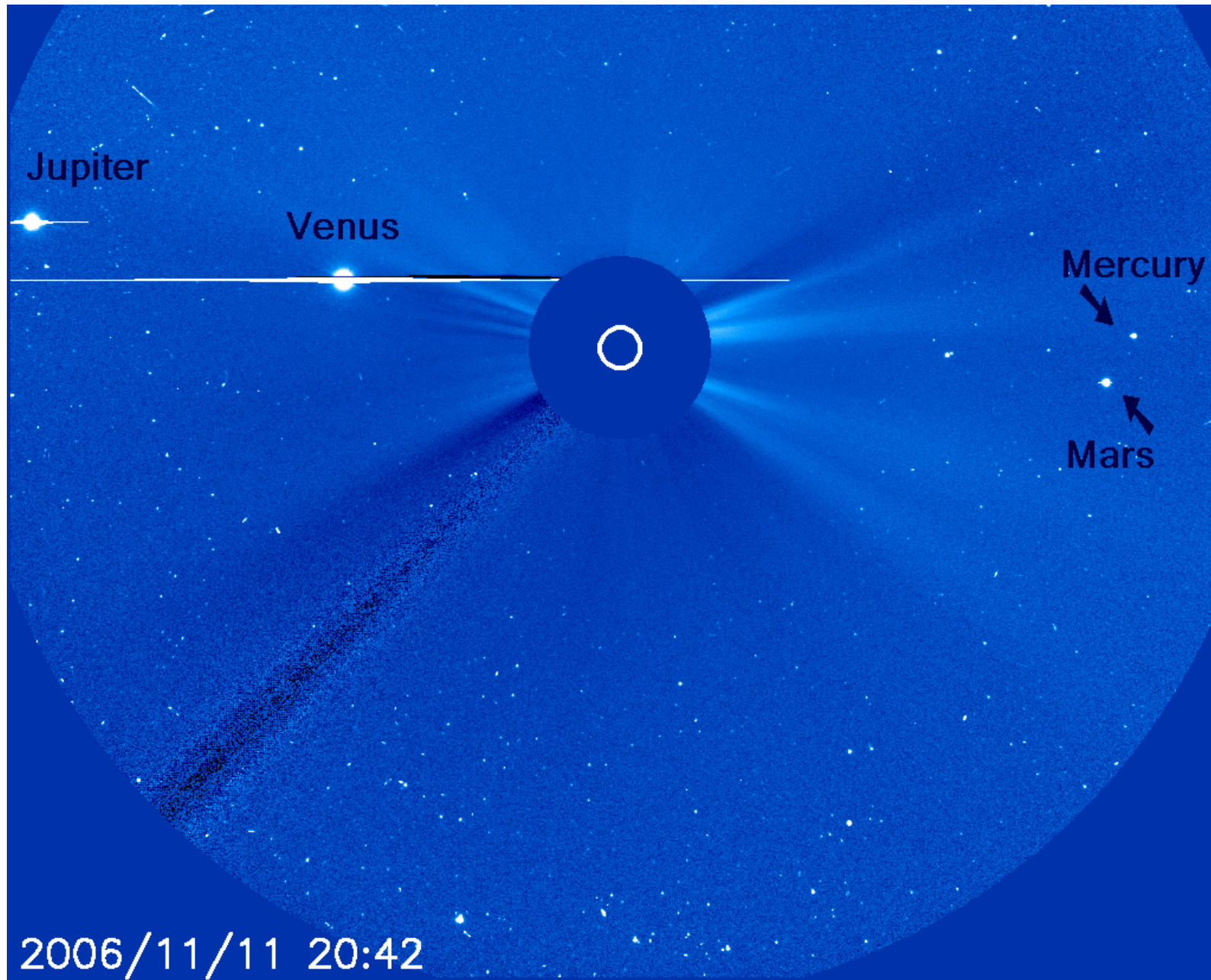
## Emissionen bei verschiedenen Temperaturen:





Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## Die Korona der Sonne in der Übersicht (LASCO 16° Öffnung):



Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

**Die Korona während eines Aktivitäts-Maximums mit CME:**



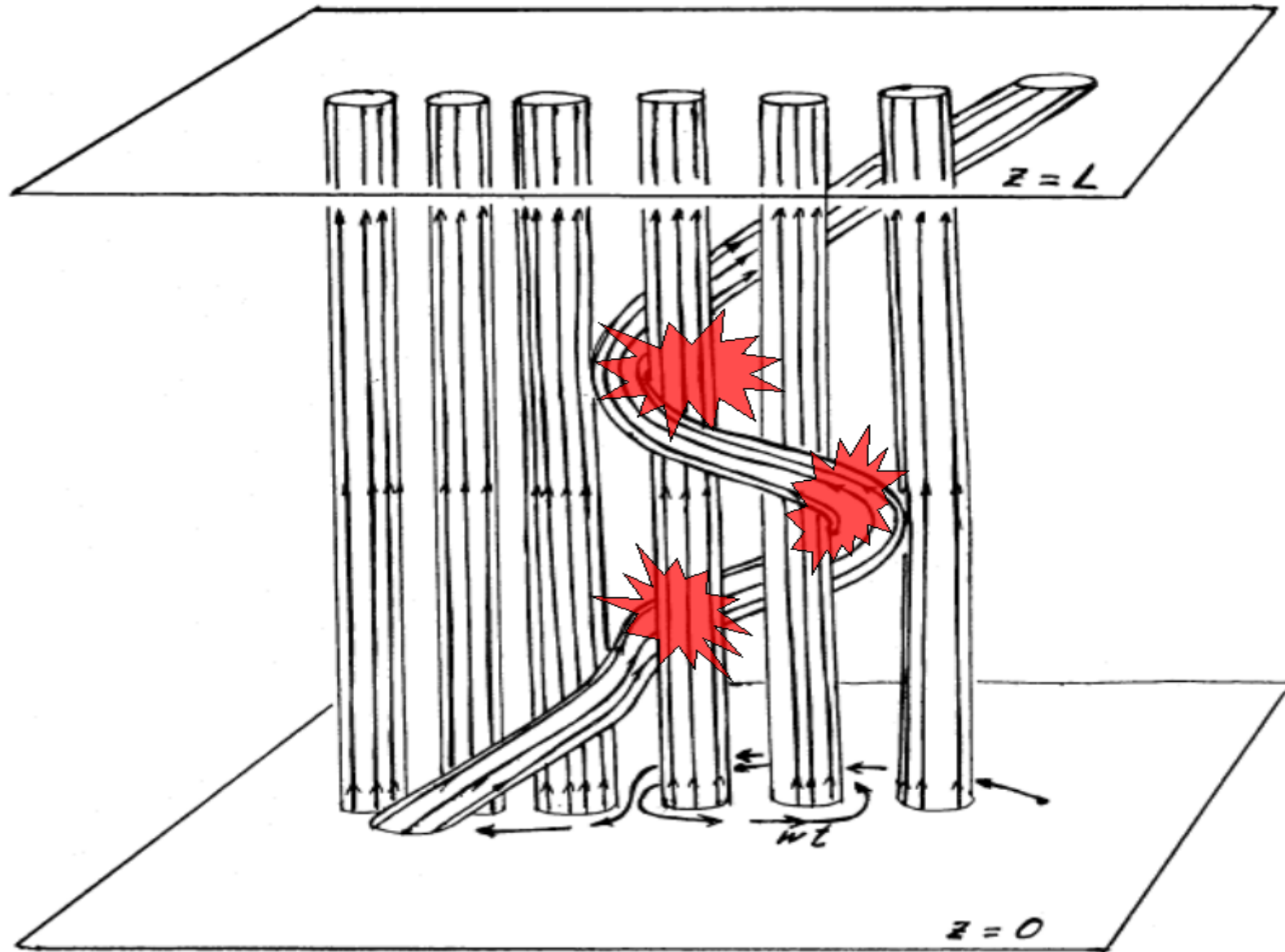
Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## **Chromosphäre, Photosphäre und Korona mit Flare:**



Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## Plasmaheizung durch Rekonnektion von Magnetfeldern:



Die Sonne – ein riesiges Plasmaexperiment

## **Sonnenfleck und Rekonnektion von Magnetfeldern:**



# 3D MHD-simulation of plasma heating in the corona

# 3D MHD-simulation of plasma heating in the corona

## Modellierung:

- Kontinuitätsgleichung:  $\frac{D \ln \rho}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{u}$  mit  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$

## Modellierung:

- Kontinuitätsgleichung: 
$$\frac{D \ln \rho}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{u} \quad \text{mit} \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$$
- Bewegungsgleichung:  
(für ein ideales Gas)  
$$c_s = \sqrt{\gamma p / \rho}$$
$$\frac{D \mathbf{u}}{Dt} = -c_s^2 \nabla \left( \frac{s}{c_p} + \ln \rho \right) - \nabla \Phi_{\text{Grav}} + \frac{1}{\rho} \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$
$$+ \nu \left( \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + 2 \mathbf{S} + \nabla \ln \rho \right) + \zeta (\nabla \nabla \cdot \mathbf{u})$$



## Modellierung:

- Kontinuitätsgleichung: 
$$\frac{D \ln \rho}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{u} \quad \text{mit} \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$$
- Bewegungsgleichung:  
(für ein ideales Gas)  
$$c_s = \sqrt{\gamma p / \rho}$$
$$\frac{D \mathbf{u}}{Dt} = -c_s^2 \nabla \left( \frac{s}{c_p} + \ln \rho \right) - \nabla \Phi_{\text{Grav}} + \frac{1}{\rho} \mathbf{j} \times \mathbf{B} \\ + \nu \left( \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + 2 \mathbf{S} + \nabla \ln \rho \right) + \zeta (\nabla \nabla \cdot \mathbf{u})$$
- Induktionsgleichung: 
$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} - \frac{1}{\sigma_{el}} \mathbf{j} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} - \mu_0 \eta \mathbf{j}$$

## Modellierung:

- Kontinuitätsgleichung: 
$$\frac{D \ln \rho}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{u} \quad \text{mit} \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$$
- Bewegungsgleichung:  
(für ein ideales Gas)  
$$c_s = \sqrt{\gamma p / \rho}$$
$$\frac{D \mathbf{u}}{Dt} = -c_s^2 \nabla \left( \frac{s}{c_p} + \ln \rho \right) - \nabla \Phi_{\text{Grav}} + \frac{1}{\rho} \mathbf{j} \times \mathbf{B} \\ + \nu \left( \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + 2 \mathbf{S} + \nabla \ln \rho \right) + \zeta (\nabla \nabla \cdot \mathbf{u})$$
- Induktionsgleichung: 
$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} - \frac{1}{\sigma_{el}} \mathbf{j} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} - \mu_0 \eta \mathbf{j}$$
- Energieerhaltung: 
$$\rho T \frac{Ds}{Dt} = \mu_0 \eta \mathbf{j}^2 + \nabla \cdot (K \nabla T) - C + 2 \rho \nu \mathbf{S}^2 + \zeta \rho (\nabla \cdot \mathbf{u})^2$$

## Modellierung:

- Kontinuitätsgleichung:  $\frac{D \ln \rho}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{u}$  mit  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$
- Bewegungsgleichung:  
(für ein ideales Gas)  
 $c_s = \sqrt{\gamma p / \rho}$   
$$\frac{D \mathbf{u}}{Dt} = -c_s^2 \nabla \left( \frac{s}{c_p} + \ln \rho \right) - \nabla \Phi_{\text{Grav}} + \frac{1}{\rho} \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$
  
$$+ \nu \left( \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + 2 \mathbf{S} + \nabla \ln \rho \right) + \zeta (\nabla \nabla \cdot \mathbf{u})$$
- Induktionsgleichung:  $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} - \frac{1}{\sigma_{el}} \mathbf{j} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} - \mu_0 \eta \mathbf{j}$
- Energieerhaltung:  $\rho T \frac{Ds}{Dt} = \mu_0 \eta \mathbf{j}^2 + \nabla \cdot (K \nabla T) - C + 2 \rho \nu \mathbf{S}^2 + \zeta \rho (\nabla \cdot \mathbf{u})^2$

=> Heizrate:  $H \sim \eta \mathbf{j}^2$       Wärmeleitung:  $K \nabla T$       Strahlungsverlust:  $C$   
 => automatisch ist  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$       große Gradienten in  $T, \rho$  werden aufgelöst

# 3D MHD-simulation of plasma heating in the corona

## **Modellierung:**

### - Magnetfelder:

- \* MDI-Magnetogramm als untere Randbedingung
- \* oben Potentialfeld-Extrapolation für „offene“ Feldlinien

## **Modellierung:**

### - Magnetfelder:

- \* MDI-Magnetogramm als untere Randbedingung
- \* oben Potentialfeld-Extrapolation für „offene“ Feldlinien

### - Photosphäre:

- \* Externer Treiber zur Simulation der Konvektionsbewegung  
B. Gudiksen & Å. Nordlund, Comp. Phys. Comm. 147, 471, 2002

## **Modellierung:**

### - Magnetfelder:

- \* MDI-Magnetogramm als untere Randbedingung
- \* oben Potentialfeld-Extrapolation für „offene“ Feldlinien

### - Photosphäre:

- \* Externer Treiber zur Simulation der Konvektionsbewegung  
B. Gudiksen & Å. Nordlund, Comp. Phys. Comm. 147, 471, 2002

### - Periodische Fortsetzung der Box in den horizontalen Richtungen

## **Modellierung:**

### - Magnetfelder:

- \* MDI-Magnetogramm als untere Randbedingung
- \* oben Potentialfeld-Extrapolation für „offene“ Feldlinien

### - Photosphäre:

- \* Externer Treiber zur Simulation der Konvektionsbewegung  
B. Gudiksen & Å. Nordlund, Comp. Phys. Comm. 147, 471, 2002

### - Periodische Fortsetzung der Box in den horizontalen Richtungen

### - Temperatur-/Dichteprofil in Abhängigkeit der Höhe, als Anfangsbedingung

# 3D MHD-simulation: Pencil Code



<http://www.nordita.org/software/pencil-code/>



## Durchgeführte Arbeiten / Tests:

- Optimierung des Codes:  
10-12 % in der Laufzeit



<http://www.nordita.org/software/pencil-code/>

## Durchgeführte Arbeiten / Tests:

- Optimierung des Codes:  
10-12 % in der Laufzeit



<http://www.nordita.org/software/pencil-code/>

- Verschiedene Compiler (gfortran, ifort):  
ifort auf Intel-Maschinen besser (25 % in der Laufzeit)

## Durchgeführte Arbeiten / Tests:

- Optimierung des Codes:  
10-12 % in der Laufzeit



<http://www.nordita.org/software/pencil-code/>

- Verschiedene Compiler (gfortran, ifort):  
ifort auf Intel-Maschinen besser (25 % in der Laufzeit)
- Geschwindigkeits-Vergleich (mit/ohne Infiniband):  
Leerlauf von ca. 50 % ohne Infiniband

## Durchgeführte Arbeiten / Tests:



- Optimierung des Codes:



10-12 % in der Laufzeit



<http://www.nordita.org/software/pencil-code/>

- Verschiedene Compiler (gfortran, ifort):

ifort auf Intel-Maschinen besser (25 % in der Laufzeit)

- Geschwindigkeits-Vergleich (mit/ohne Infiniband):

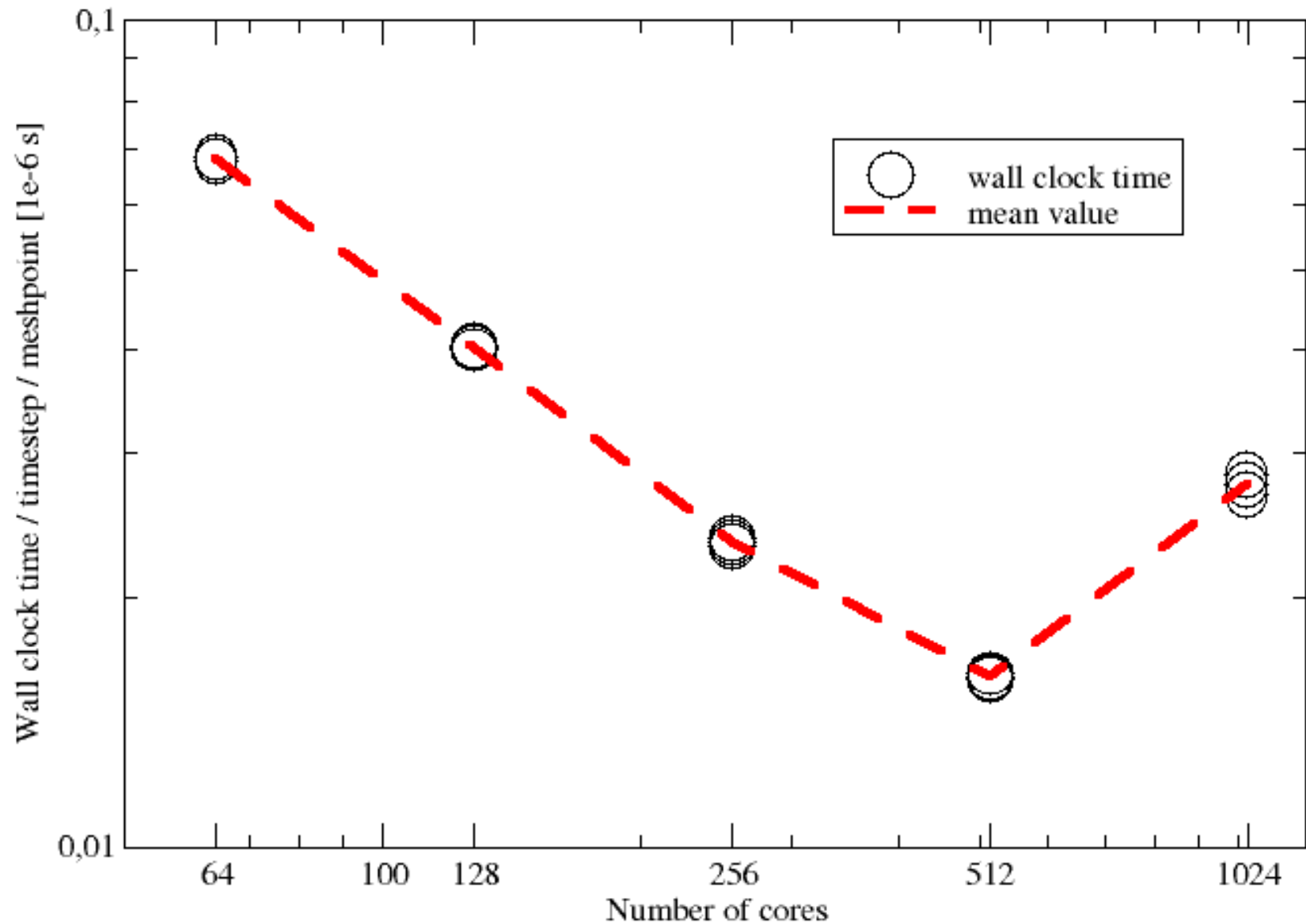
Leerlauf von ca. 50 % ohne Infiniband

- Umstellung des Datenformates auf HDF5 (in Vorbereitung)

## Skalierbarkeit:

Benchmark: Xeon 3 GHz, 4 MB L2-Cache

Scalability of the Pencil Code regarding number of cores for a fixed setup



# 3D MHD-simulation: Auflösungeffekte

## 3D MHD-simulation: Auflösungeffekte

### **Räumliche Auflösung:**

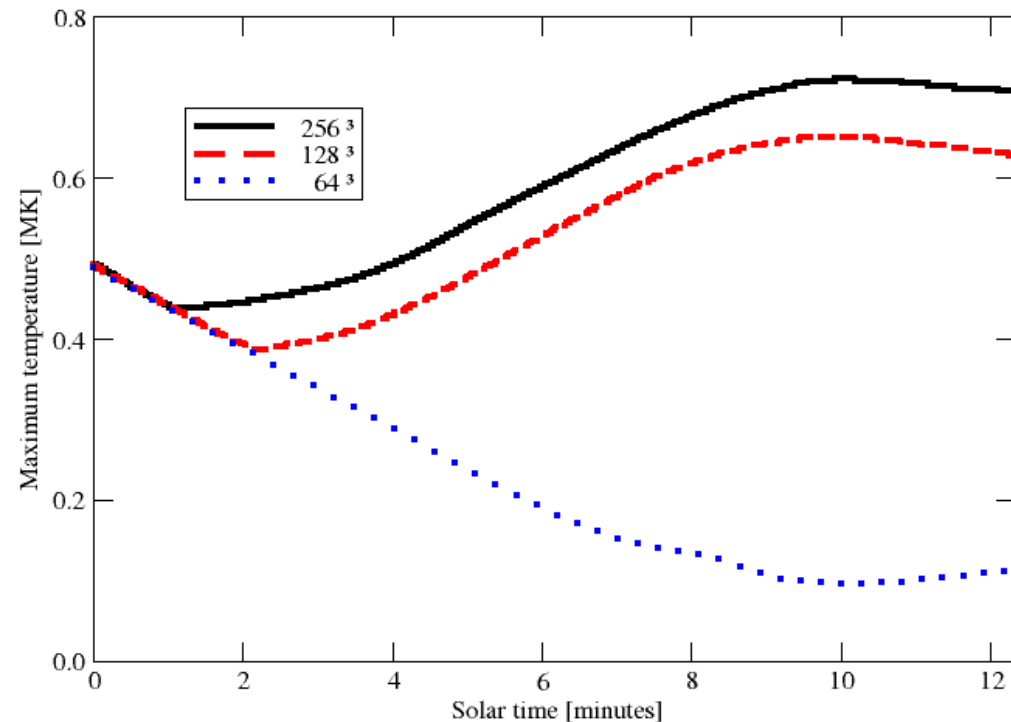
- Feste Boxgröße von  $50 \times 50 \times 30 \text{ Mm}^3$
- Variable Gitterabstände:
  - $\sim 800 \text{ km}$  ( $64^3$ ),  $\sim 400 \text{ km}$  ( $128^3$ ),  $\sim 200 \text{ km}$  ( $256^3$ )

## Räumliche Auflösung:

- Feste Boxgröße von  $50 \times 50 \times 30 \text{ Mm}^3$
- Variable Gitterabstände:  
~800 km ( $64^3$ ), ~400 km ( $128^3$ ), ~200 km ( $256^3$ )

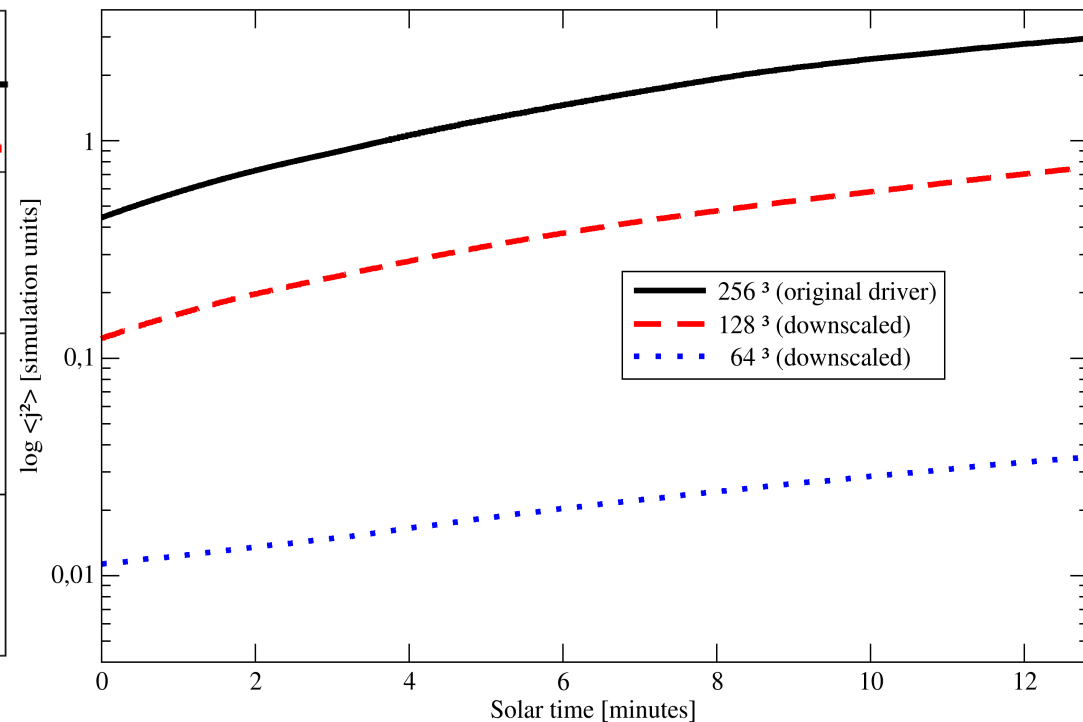
### Scaling effects

Simulation of three grid resolutions for a fixed box size of  $50 \times 50 \times 30 \text{ Mm}^3$



### Scaling effects in $\langle j^2 \rangle$

Simulation of three grid resolutions for a fixed box size of  $50 \times 50 \times 30 \text{ Mm}^3$



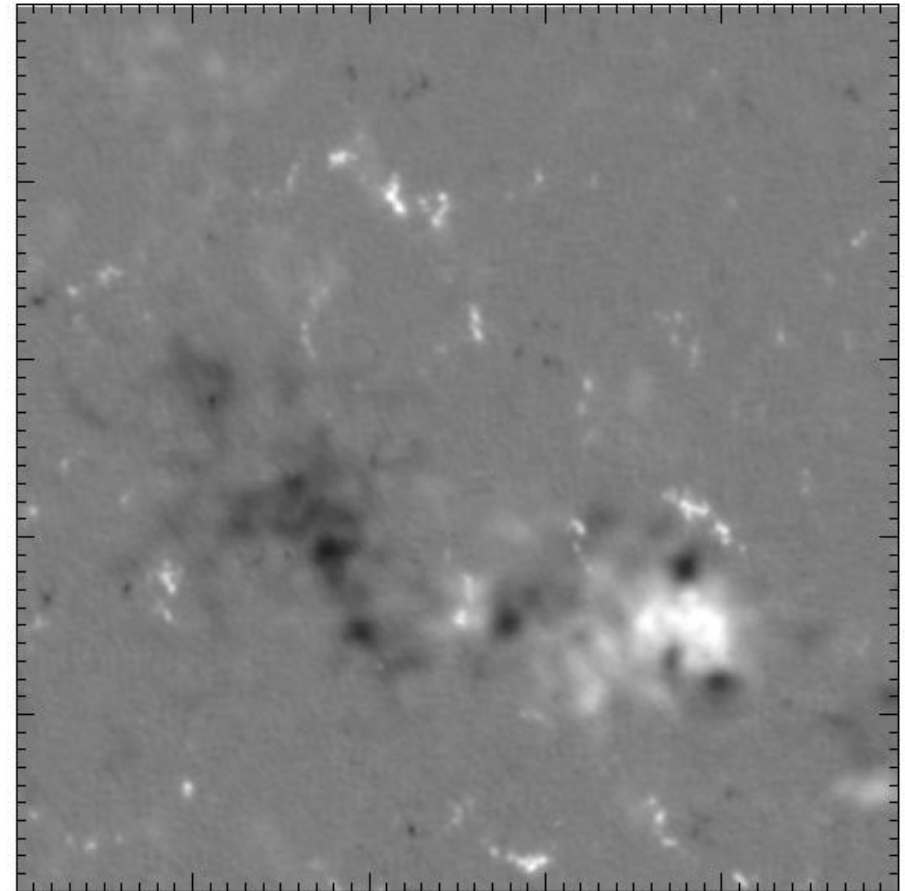
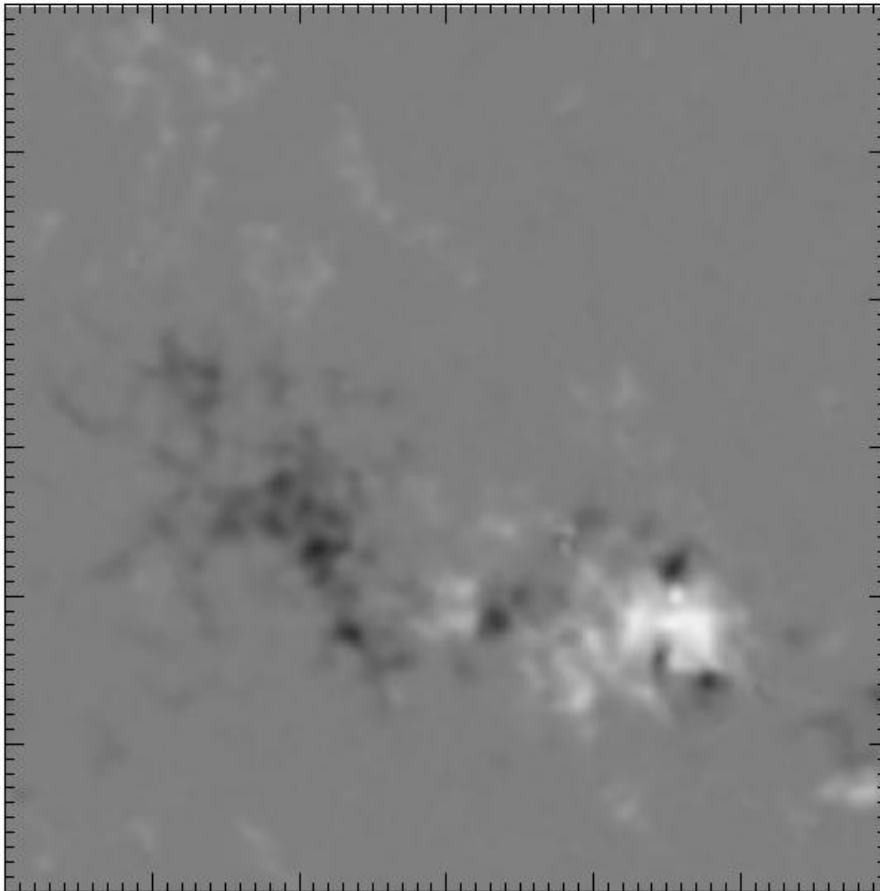
=> Zur Auflösung der photosphärischen Bewegungen sind ~200 km notwendig



# Ausblick auf Simulationen

## Bisher:

- 3D MHD-Modelle in einer Box von  $50 \times 50 \times 30 \text{ Mm}^3$  / Gitter:  $128^3$ :
  - \* um Faktor 5 verkleinerte aktive Region (eigentlich „zwei Poren“)
  - \* Pore mit magnetischem Netzwerk

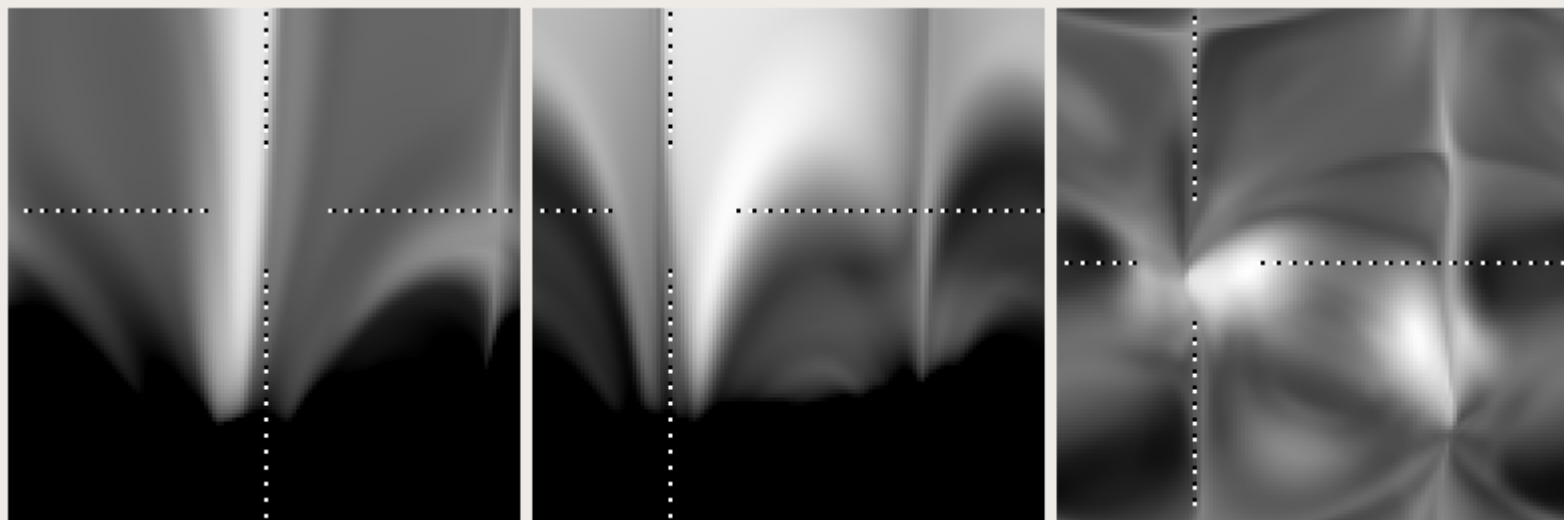


## Bisher:

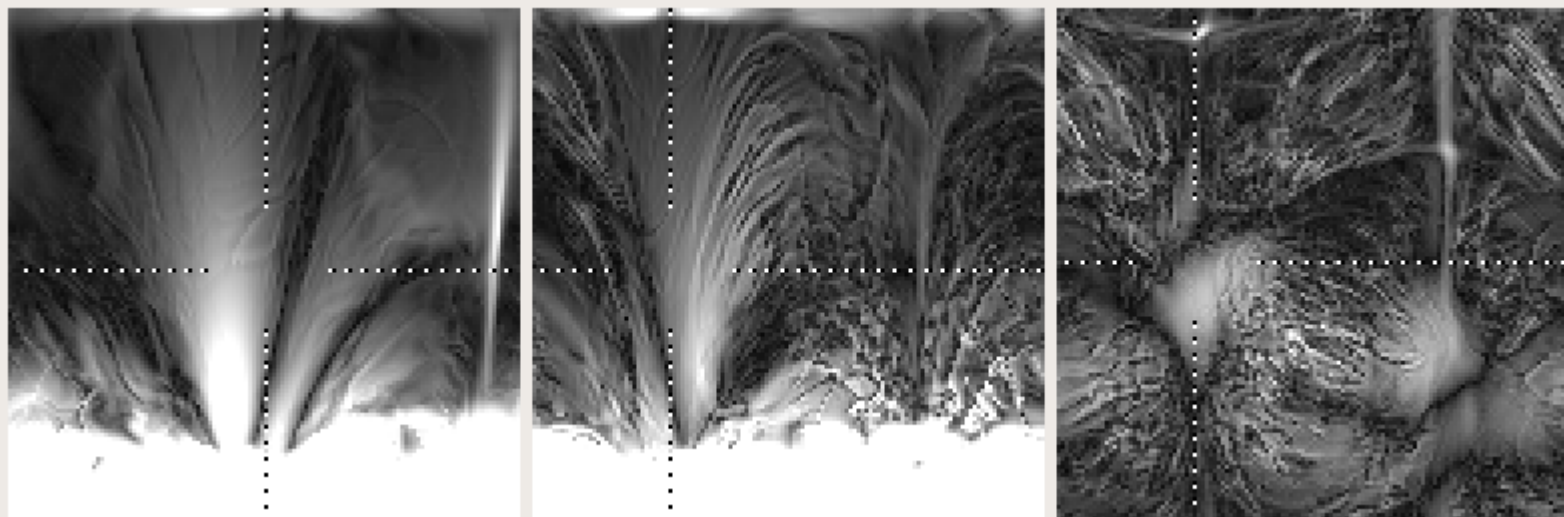
- 3D MHD-Modelle in einer Box von  $50 \times 50 \times 30 \text{ Mm}^3$  / Gitter:  $128^3$ :

\* Vergleich zwischen Temperatur und Stromdichte:

T:



j:

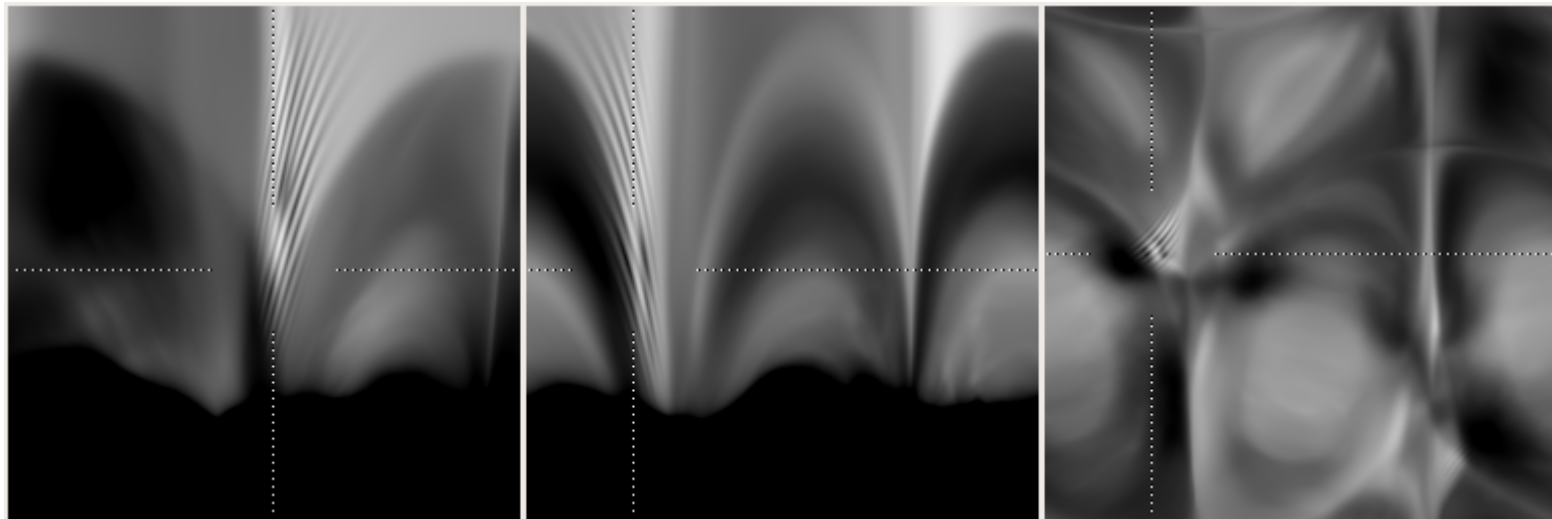


## Aktuell:

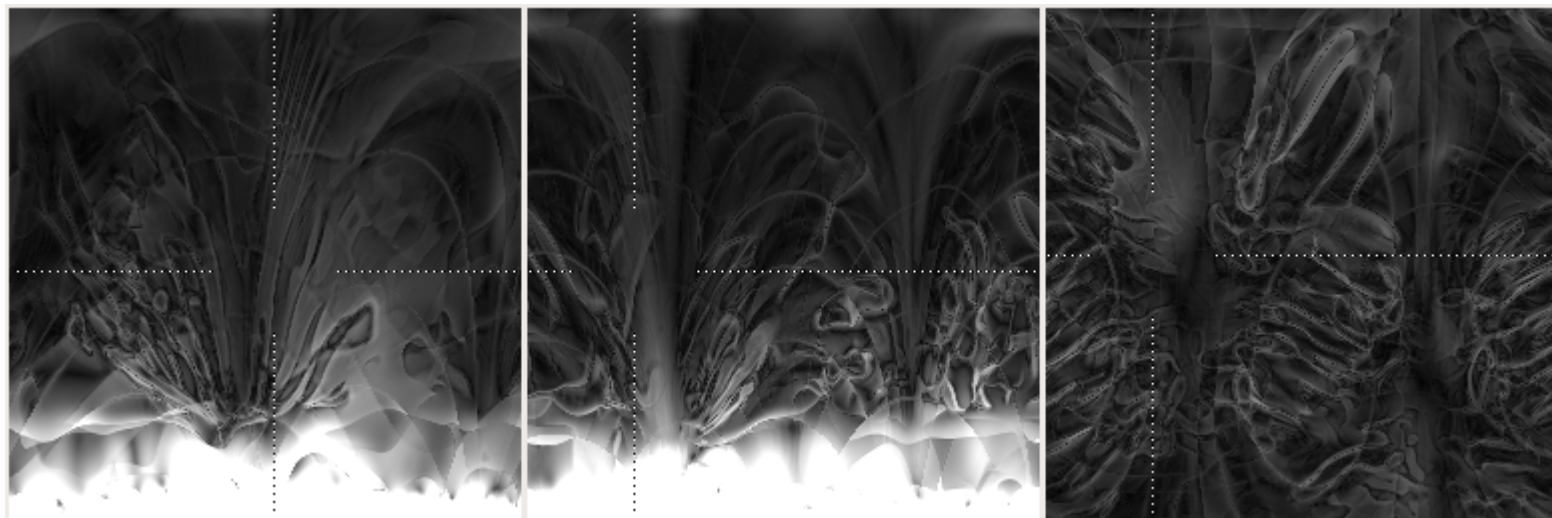
- 3D MHD-Modelle in einer Box von  $50 \times 50 \times 30 \text{ Mm}^3$  / Gitter:  $256^3$ :

\* bessere Auflösung mit  $\sim 200 \text{ km}$  Gitterabstand

T:

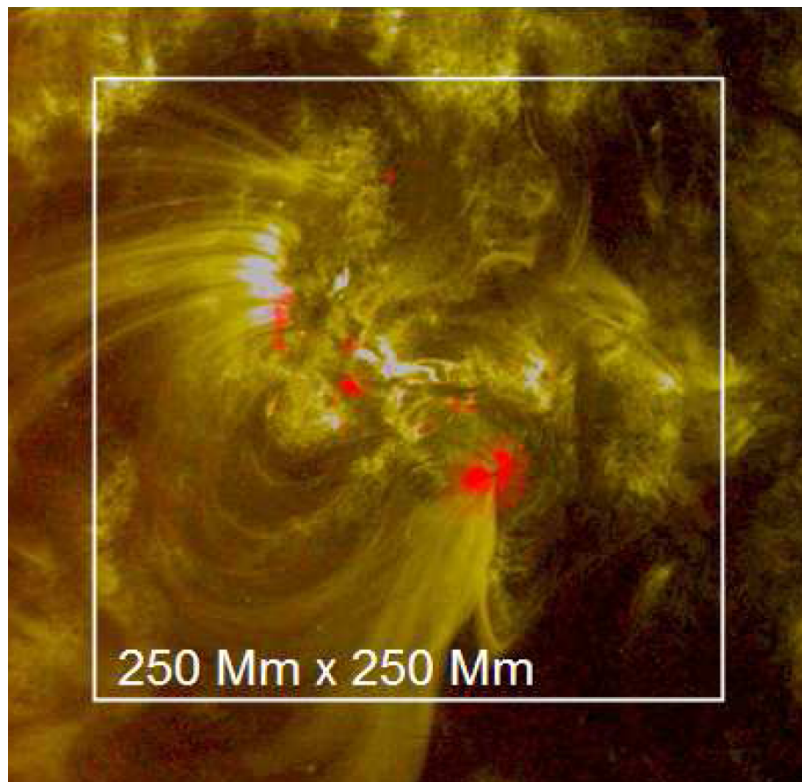


j:



## Ziel:

- Box von  $250 \times 250 \times 100 \text{ Mm}^3$  / Gitter:  $512^3$  (besser  $1024^3$ ):
  - \* Aktive Region bei „echter“ Skalierung
  - \* Wechselwirkung mit Netzwerk
  - \* größere koronale Bögen (wie mit TRACE beobachtbar)
  - \* mehr magnetischer Fluss: höhere Temperaturen (XRT/Hinode)

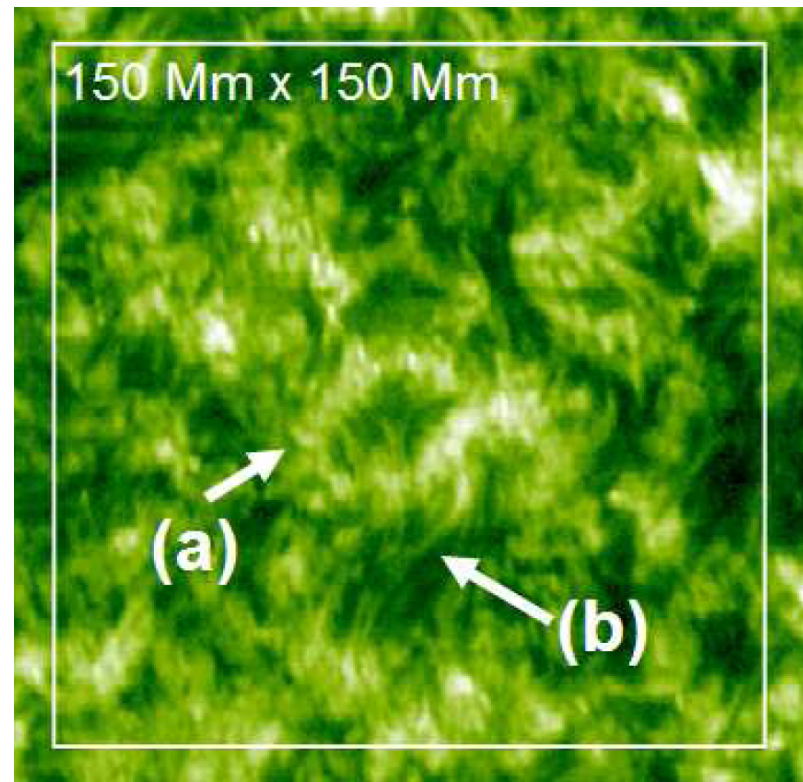
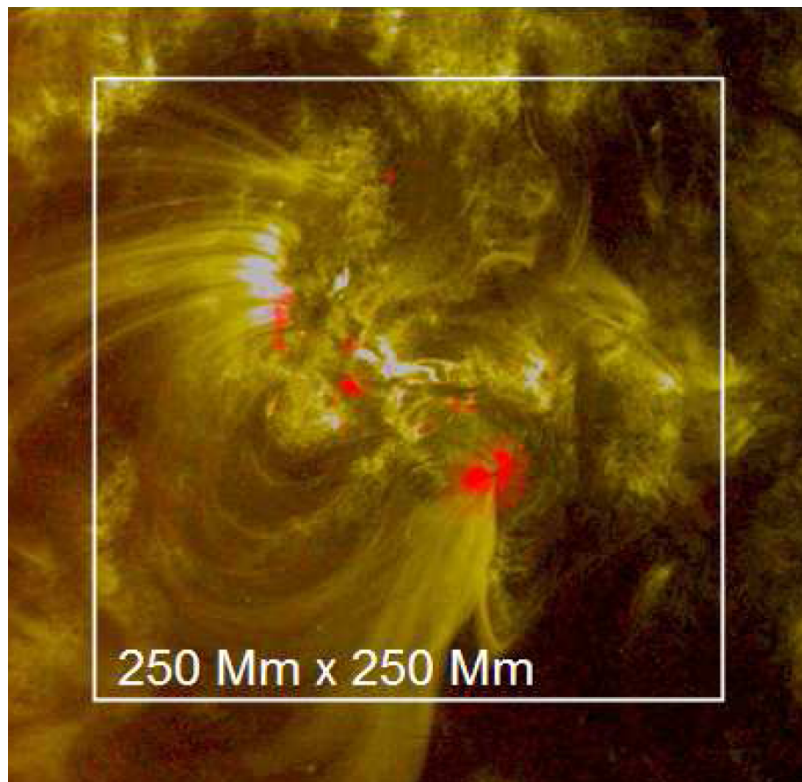




## Ausblick auf Simulationen

### Ziel:

- Box von  $250 \times 250 \times 100 \text{ Mm}^3$  / Gitter:  $512^3$  (besser  $1024^3$ ):
  - \* Aktive Region bei „echter“ Skalierung
  - \* Wechselwirkung mit Netzwerk
  - \* größere koronale Bögen (wie mit TRACE beobachtbar)
  - \* mehr magnetischer Fluss: höhere Temperaturen (XRT/Hinode)



Fragen...?