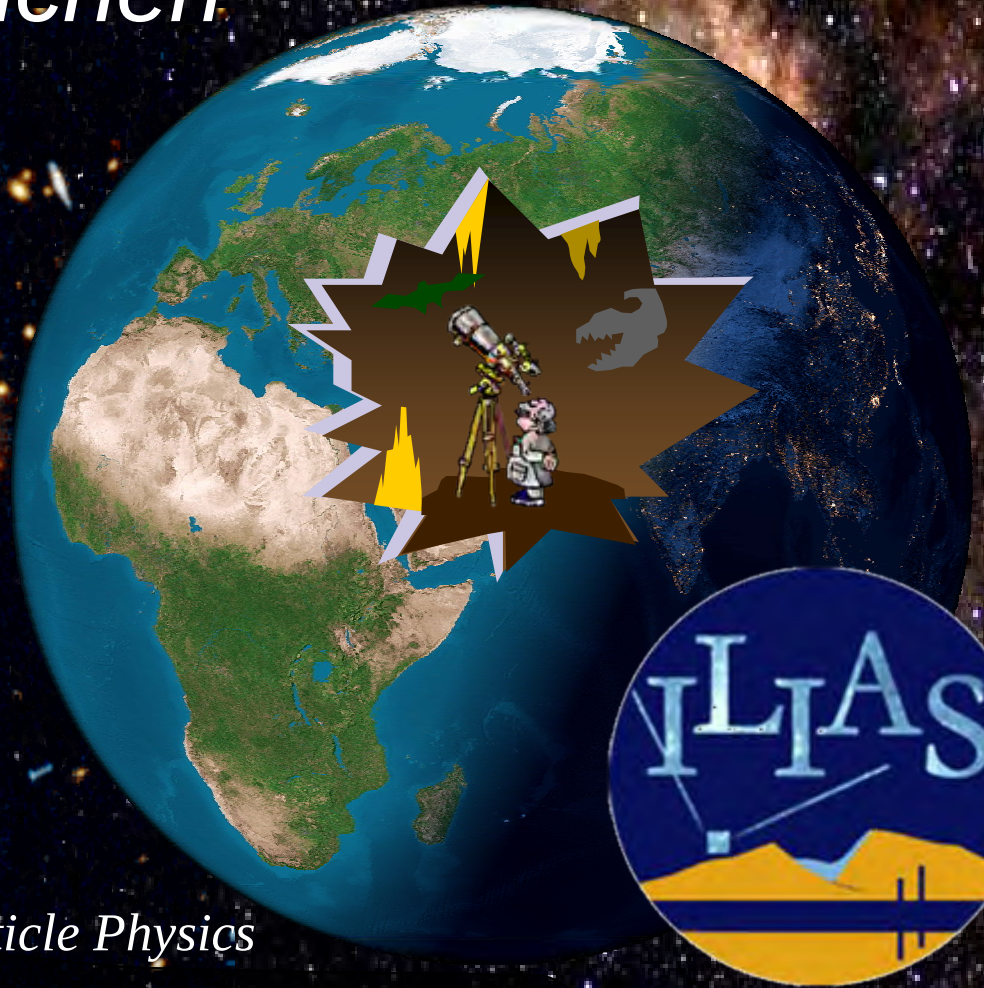


Dunkle Materie überall

*Eine Suche nach bisher
unbekannten Teilchen*



Josef Jochum
Kepler Center for Astro and Particle Physics
Universität Tübingen

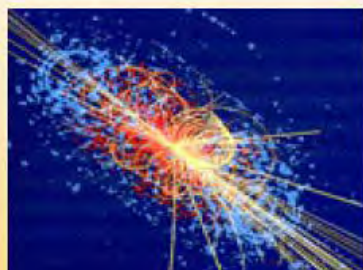


Integrated Large Infrastructures for Astroparticle Science



**From Fundamental Particles
and Gravity to Galaxies and the
Fabric of the Universe**

EC 6th Framework Programme



Participants

CEA, Paris, France
CNRS, Paris, France
INFN, Frascati, Italy
Universidad de Zaragoza, Spain
University of Sheffield, UK
Czech Technical University in Prague,
Czech Republic
University of Southern Denmark, Odense, Denmark
University of Jyväskylä, Finland
Max-Planck Society for the advancement of
Science, represented by Max-Planck-Institute
for Nuclear Physics, Heidelberg, Germany
Technische Universität München, Germany
Eberhard Karls Universität Tübingen, Germany
Aristotle University of Thessaloniki, Greece
INFN-CNR-Sezione di Trento, Italy
European Gravitational Observatory, Cascina, Italy
Leiden University, LION Institute of Physics,
Netherlands
Comenius University, Bratislava, Slovakia
Cern, Geneva, Switzerland
Bogazici University, Istanbul, Turkey
University of Glasgow, UK
University College London, UK
Joint Research Center, Brussels, Belgium
University of Patras, Greece

Partners

Yerevan Phys. Inst., U. Wien, U. Aarhus, Nordic Inst.
Theo. Physics, U. Helsinki, U. Bonn, Tech. U.
Darmstadt, U. Dortmund, U. Frankfurt, DESY, Laser
Zentrum Hannover, U. Heidelberg, U. Friedrich-Schiller,
Inst. für Physik, KFK, FZK, U. Karlsruhe Astro. Inst.,
U. Wuppertal, Inst. Theor. Phys. & Astro., Würzburg,
U. Athens, U. Ioannina, U. Demokritos, Politecnico di
Milano, U. Saga, U. Amsterdam, U. Utrecht, Nat. Inst.
Nucl. Phys. & High Energy Phys., U. Bergen, U. Oslo,
U. Silesia, Henryk Niewodniczanski Inst. Nucl. Phys.,
Jagiellonian U., U. Cracow, Inst. Maths, Polish Acad.
of Sciences, U. Warsaw, Inst. Sup. Techn., Inst. Nucl.
Res., Baksan Neutrino Obs., Joint Inst. for Nucl. Res.,
Inst. Theo. and Expt. Phys., U. Novi Sad, U.
Barcelona, U. de les Illes Balears, U. de Santiago de
Compostela, U. de Valencia, U. de Madrid, U.
Stockholm, U. Bern, U. Geneva, U. Lausanne, U.
Sussex, U. Birmingham, U. Cambridge, U. Cardiff,
RAL, U. Durham, ICL, U. Oxford, U. Southampton, U.
California, U. South Carolina, Idaho Nat. Eng. and
Environ. Lab., Mount Holyoke College, Fermilab,
SLAC, Brookhaven Nat. Lab., U. Princeton, CUPP
Pyhasalmi



Elementarteilchen $\Leftrightarrow$ *Struktur des Universums*



Enge Verknüpfung von
Teilchenphysik und Astrophysik

AstroParticlePhysics



Elementarteilchen $\Leftrightarrow$ *Struktur des Universums*



Enträtselung des Universums

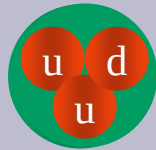
beginnt bei
den kleinsten Bestandteilen

Elementarteilchen

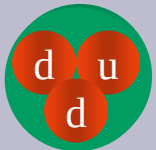


Elementare Bausteine der Materie

ILIAS



Proton



Neutron



Atomkern

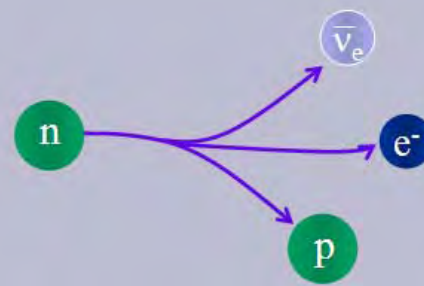


Elektron

Atomhülle



Neutrino



Elementare Bausteine der Materie

ILIAS



Proton

Schwere Teilchen = **Baryonen**

Masse $\approx 1\text{GeV} \approx 1\text{u}$

($1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$)



Neutron

Leichte Teilchen = **Leptonen**



Elektron

Masse = $511\text{keV} =$

($1\text{keV} = 10^3\text{eV}$)



$\frac{1}{2000}$



Neutrino

sehr kleine Masse

weniger als



$\frac{1}{1000.000.000}$

Wechselwirkungen der Bausteine

ILIAS

Gravitations - Kraft

Sonnensystem, Galaxien etc.

Masse



Elektromagnetische (Coulomb)- Kraft

Atomhülle,
Materie um uns herum

Ladung



Kern - Kraft

Atomkerne.

Baryon



Schwache - Kraft

Beta-Zerfall

alle



Kernfusion – Energieerzeugung der Sonne

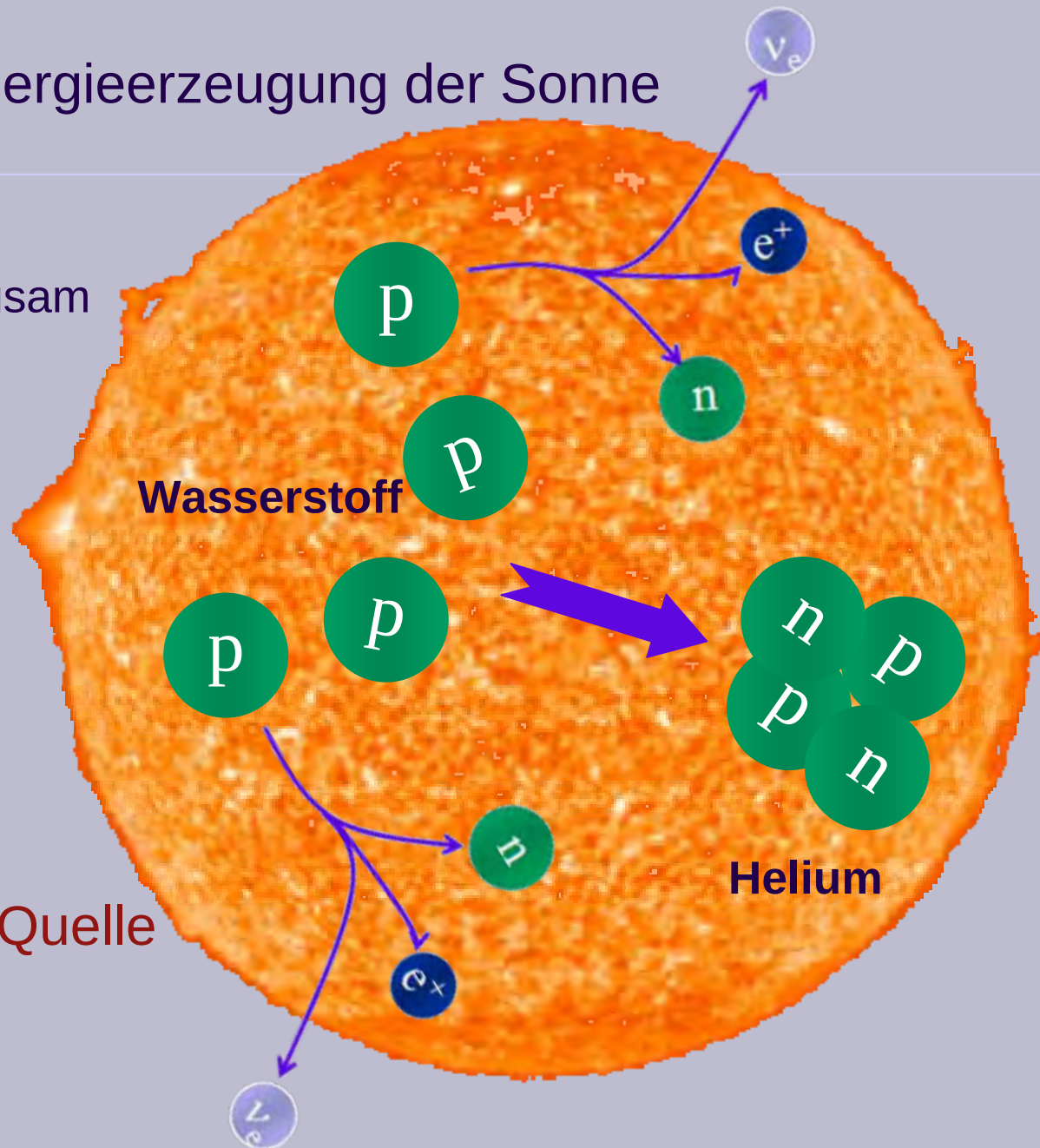
ILIAS

2x β -Zerfall => langsam

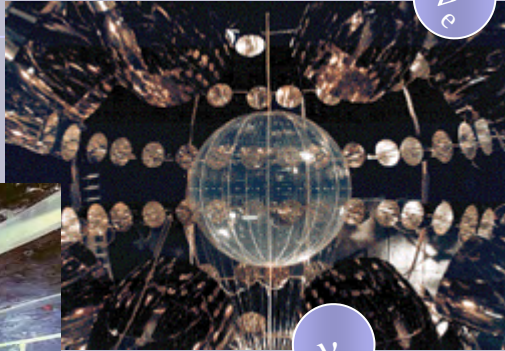
Sonne würde sonst
viel schneller
'abbrennen'

Sonne
starke Neutrino-Quelle

einzigste Information
aus dem Innern
der Sonne



Messung von Neutrinos aus der Sonne



ν_e

ν_e

ν_e



- Messungen führten zu überraschenden Ergebnissen
- Neutrinos verhalten sich anders als erwartet



ν_e

ν_e

ν_e

Fot. Kamioka Division, Institute for Cosmic Ray Res.



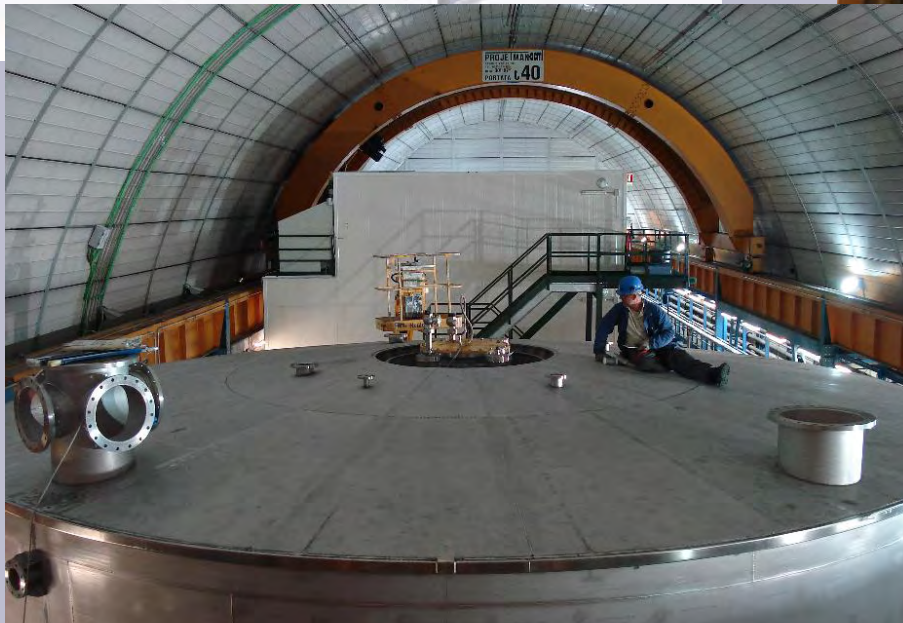
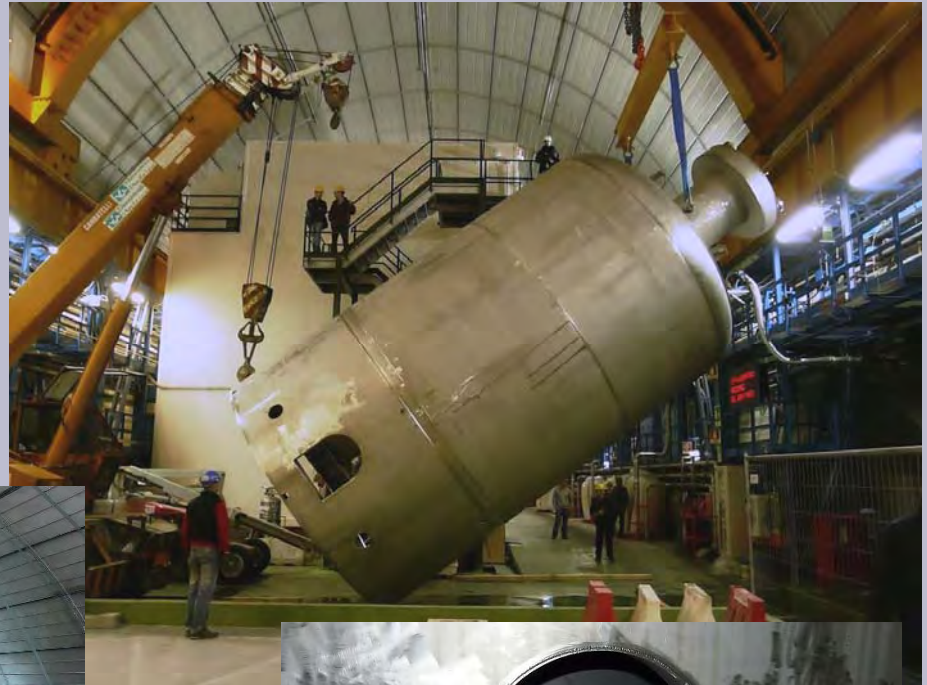
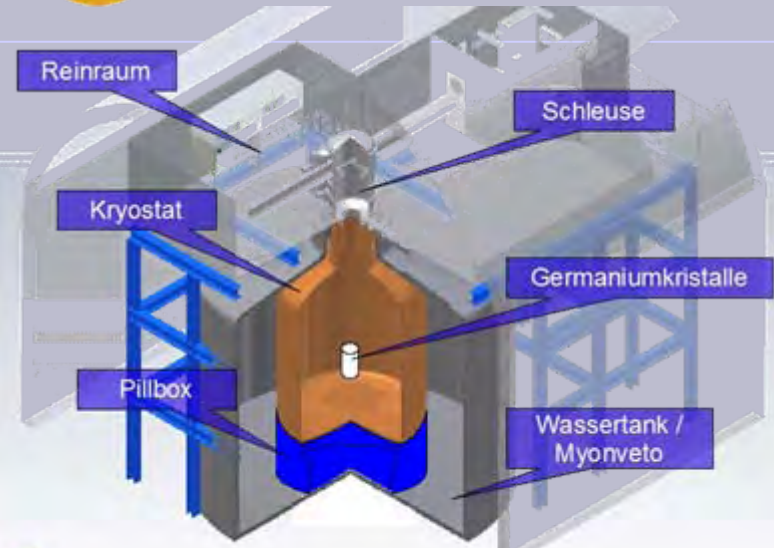
ν_e

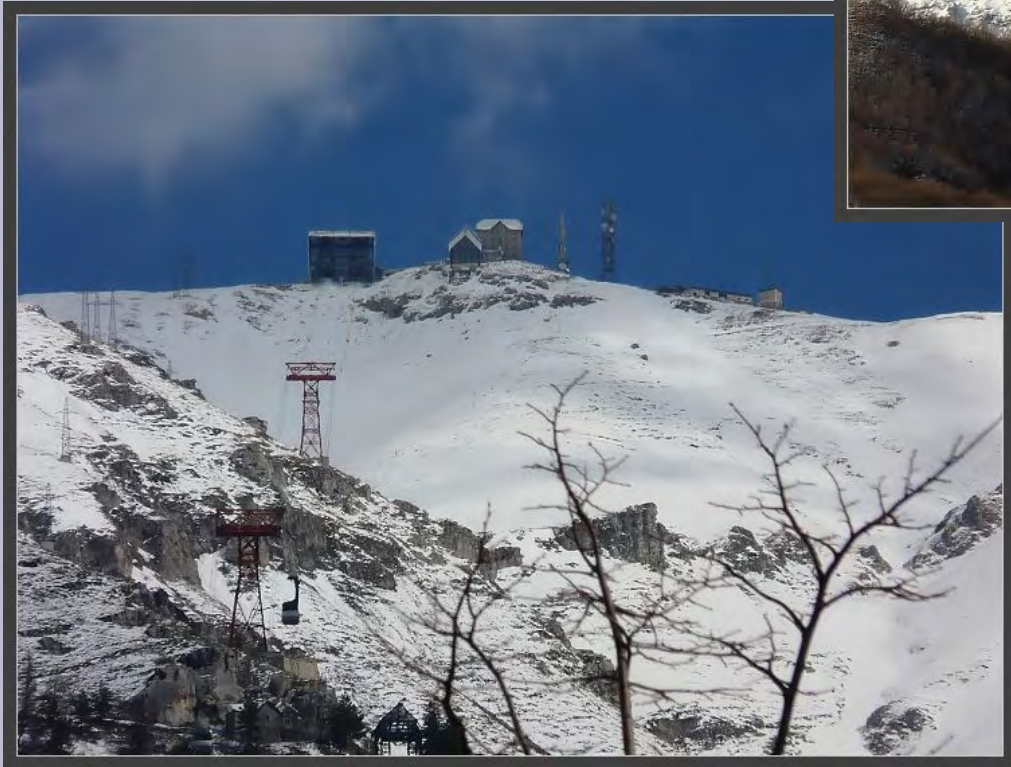
ν_e



Europäische Wissenschaftler beim Studium der Neutrinos

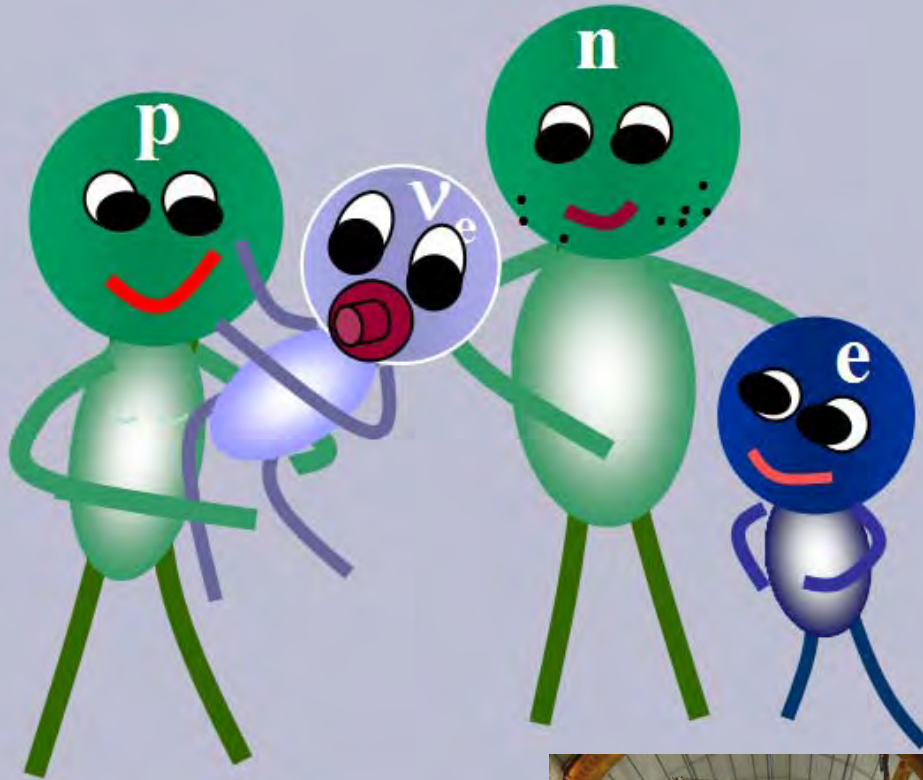
ILIAS





Die Elementarteilchen-Familie

ILIAS



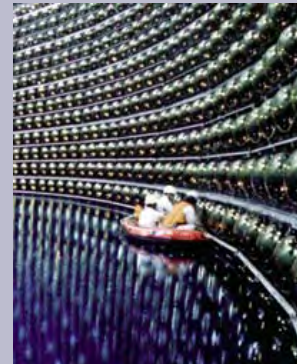
Neutrino – unser Nesthäckchen:

es ist das leichteste und schwächste

es kam unerwartet

es verhält sich oft 'komisch'

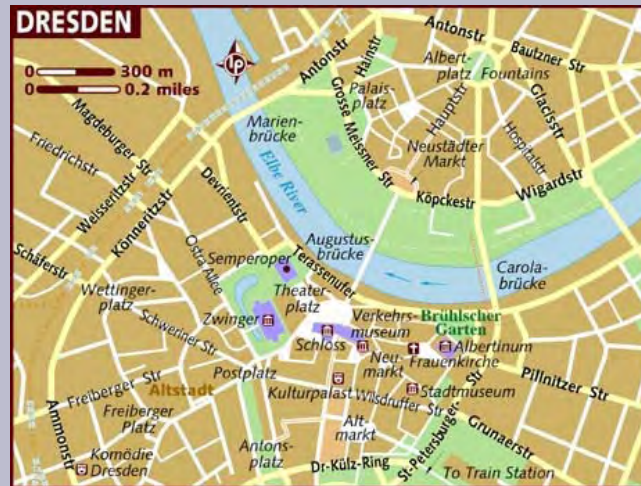
alles dreht sich nur um das Kleine



Reaktor-Neutrinos in Dresden !!!

Reaktoren insgesamt

0,4 Mio ν /cm²/sec



Krümmel, Stade
Brokdorf, Brunsbüttel
Unterweser

45.000 ν /cm²/sec

Gronde

19.000 ν /cm²/sec

Cattenom
Chooz

34.000 ν /cm²/sec

Grafenrheinfeld, Biblis,
Obrigheim, Philippsburg,
Neckarwestheim

84.000 ν /cm²/sec

Gösgen, Leibstadt,
Beznau

13.000 ν /cm²/sec

Fessenheim

8.000 ν /cm²/sec

Isar 37000 ν /cm²/sec

Gundremmingen

63.000 ν /cm²/sec

Temelin 56000 ν /cm²/sec

Dukovani

92.000 ν /cm²/sec

Ignalina

4.000 ν /cm²/sec

Neteshin, Ukr
Rovno, Ukr.

Chernobyl Ukr 2000 ν /cm²/sec
Bohunice Slov

21.000 ν /cm²/sec

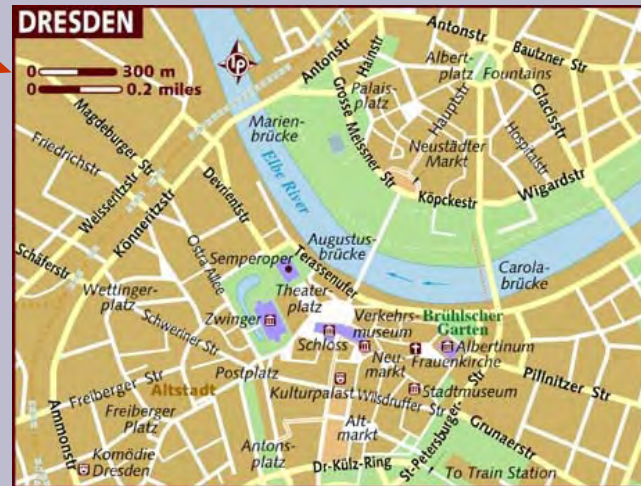
Urknall-Neutrinos in Dresden !!!

ILIAS

Reaktoren insgesamt



0,4 Mio ν /cm²/sec



Sonnen-Neutrinos

60.000 Mio ν /cm²/sec

Urknall-Neutrinos

~ 1.000.000 Mio

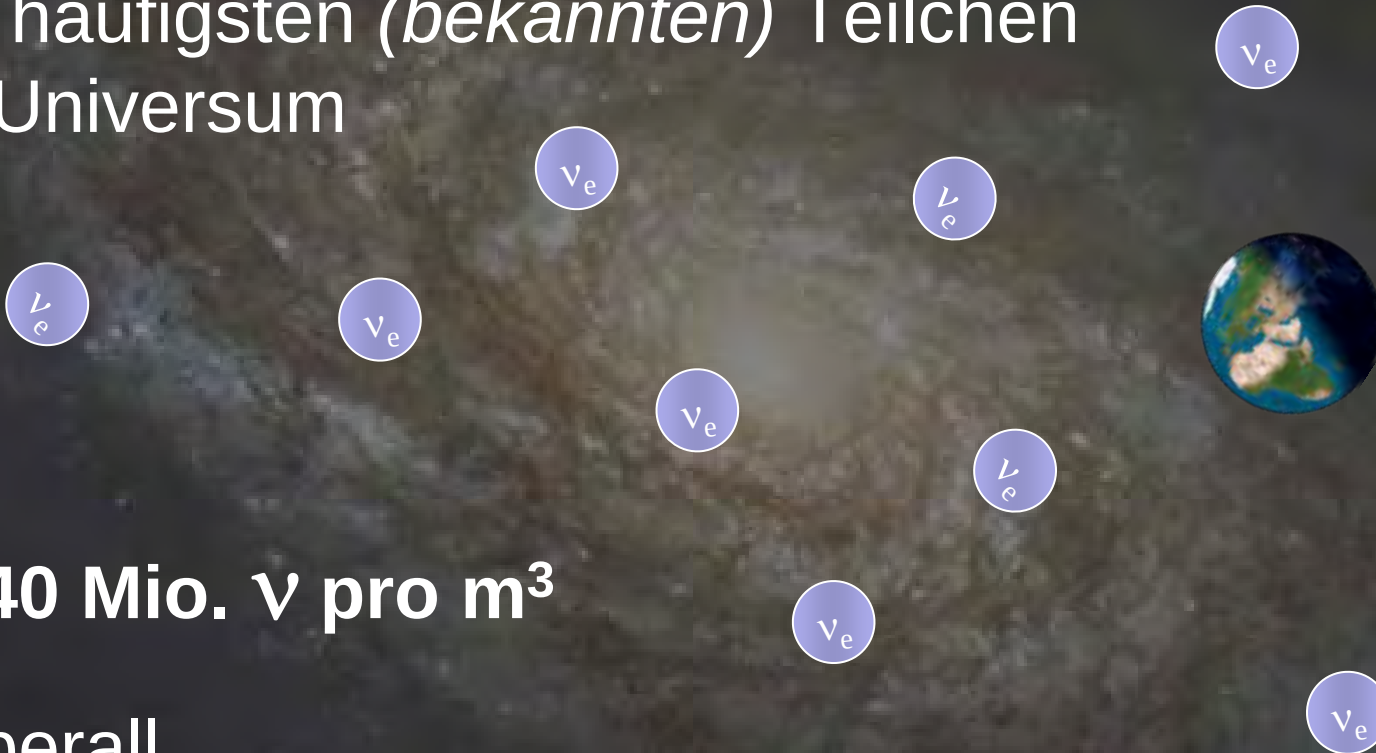
ν /cm²/sec



Geo-Neutrinos

5 Mio ν /cm²/sec

Neutrinos sind (*neben Strahlung*)
die häufigsten (*bekannten*) Teilchen
im Universum



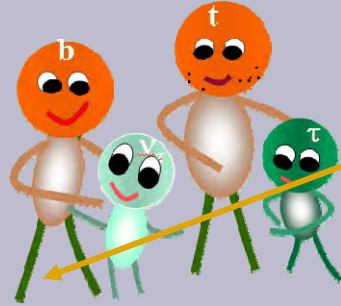
340 Mio. ν pro m^3

überall

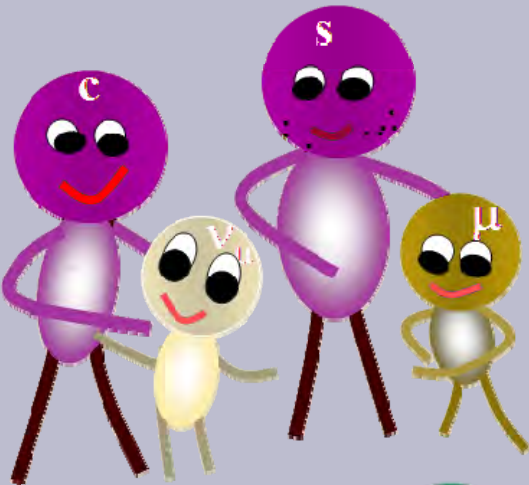
(*auch hier im Hörsaal*)

Die ganze Verwandtschaft

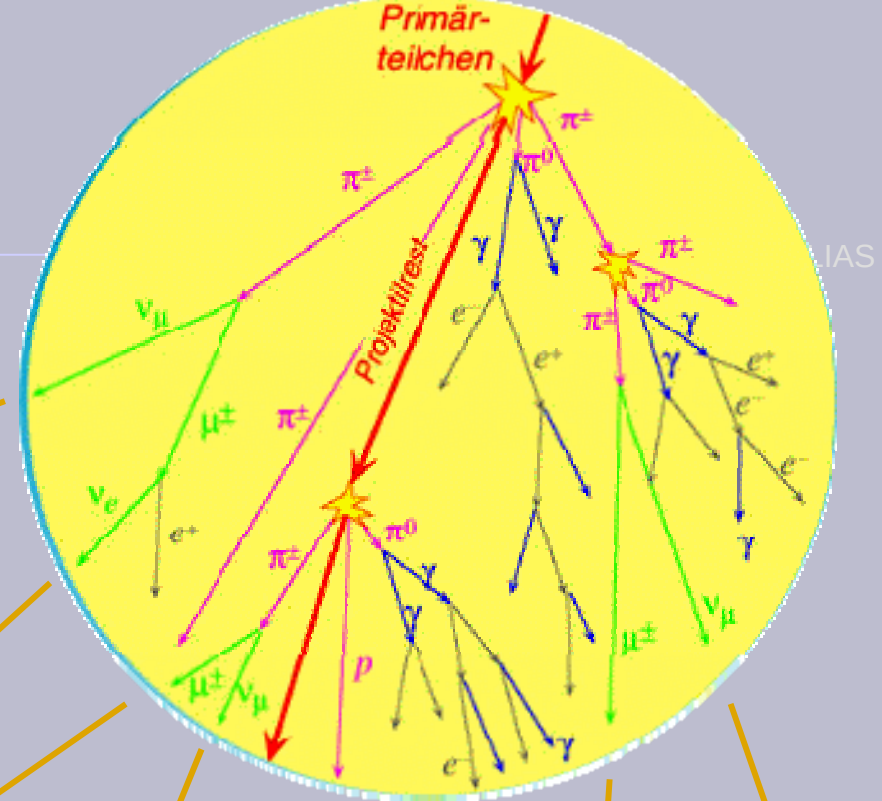
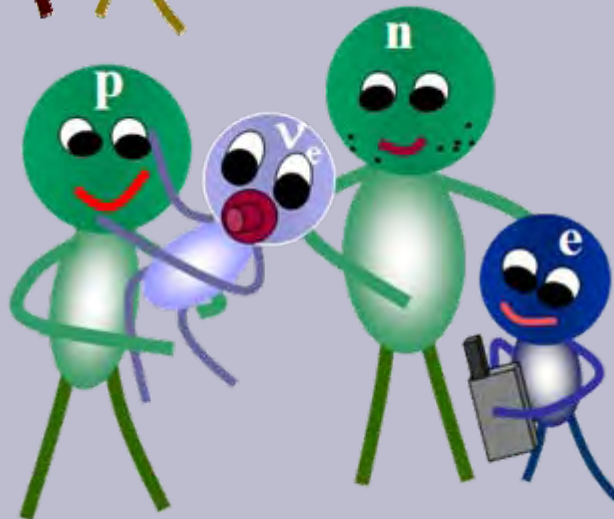
Familie
Tau



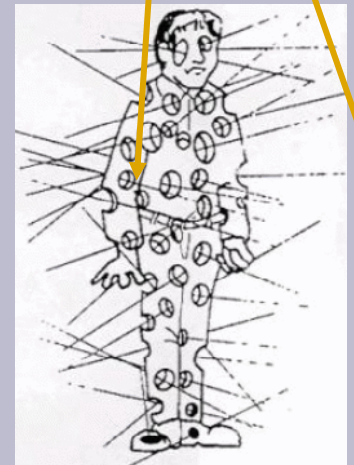
Familie
Muon



Familie
Elektron



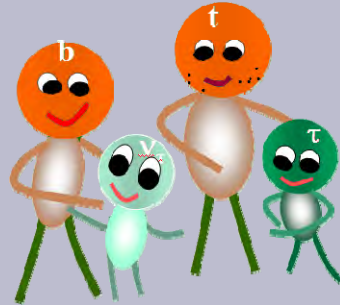
Muon-Teilchen
100 /m²/sec
aus kosmischer
Strahlung



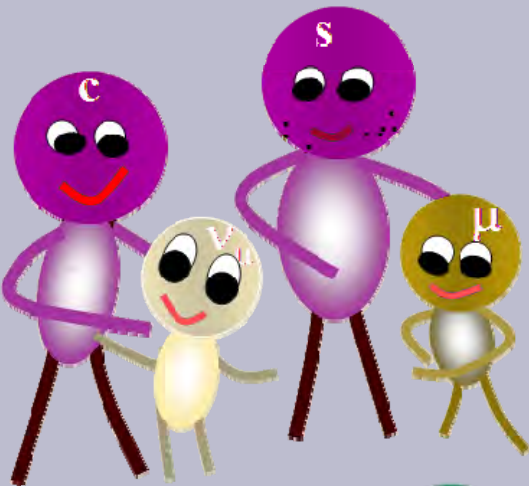
Die ganze Verwandtschaft

ILIAS

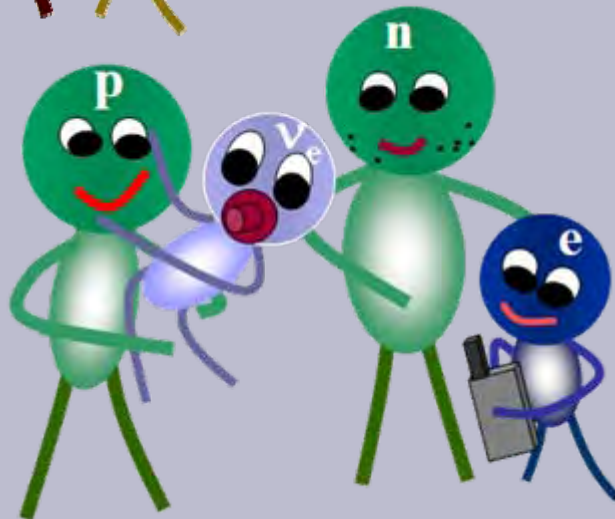
Familie
Tau



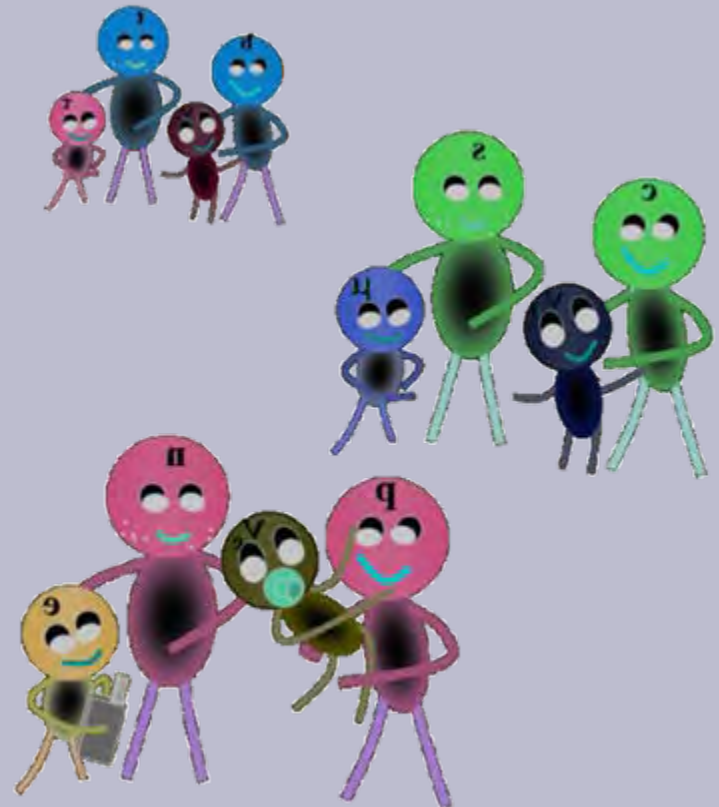
Familie
Muon



Familie
Elektron



Anti-Teilchen



Standardmodell - Ist das die ganze Wahrheit ?

ILIAS

p

n

e^-

ν_e

plus Kräfte:

Gravitation

elektromagnetische Kraft

schwache Kraft

starke Kraft

Fragen:

- Asymmetrie Materie-Antimaterie ?
- Wieso sind Neutrinos so leicht ?
- Sind die Kräfte verschiedene Formen einer 'Urkraft'?
- ...

keine Antworten mit den bisher
experimentell bewiesenen
Theorien und Modellen



größere Vielfalt an
Elementarteilchen ?

Neue, schwere Elementarteilchen

ILIAS



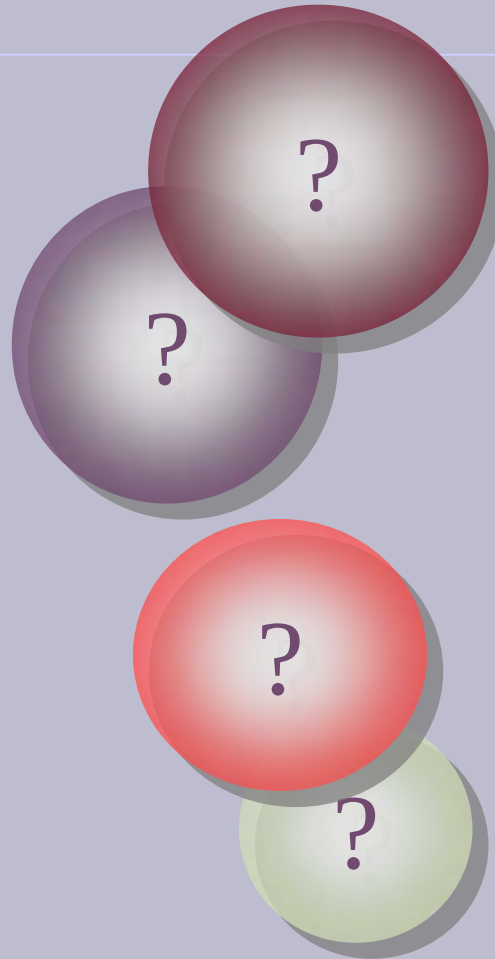
plus Kräfte:

Gravitation

elektromagnetische Kraft

schwache Kraft

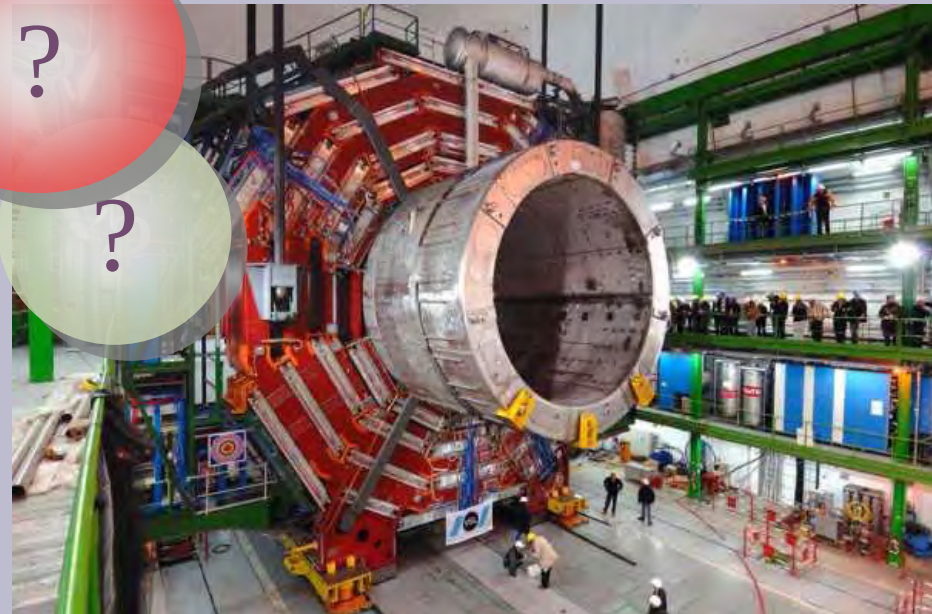
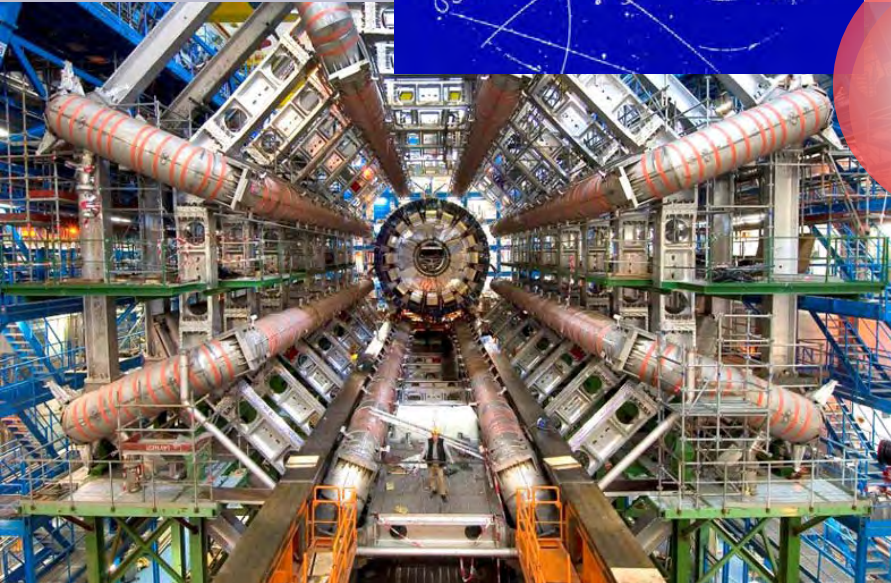
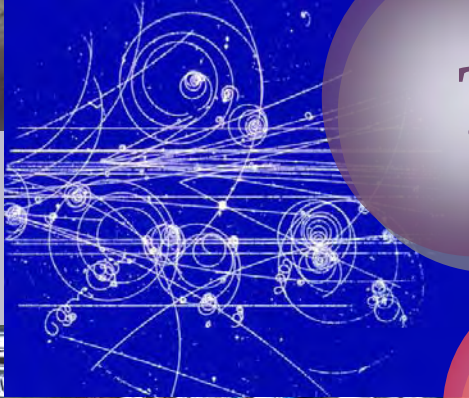
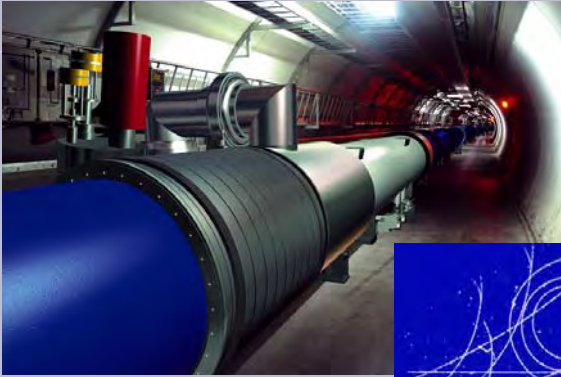
starke Kraft



neue Kräfte ?

Suche nach neuen Elementarteilchen

Physik jenseits des Standardmodells



Elementarteilchen $\Leftrightarrow$ *Struktur des Universums*



DUNKLE



MATERIE



u

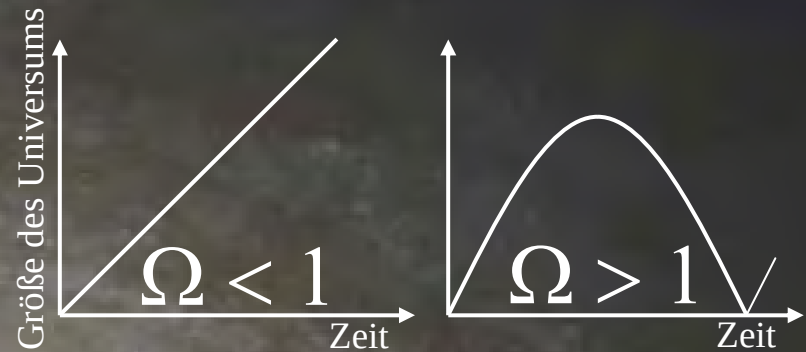
e

ν_e

d

?

Masse des Universums ?

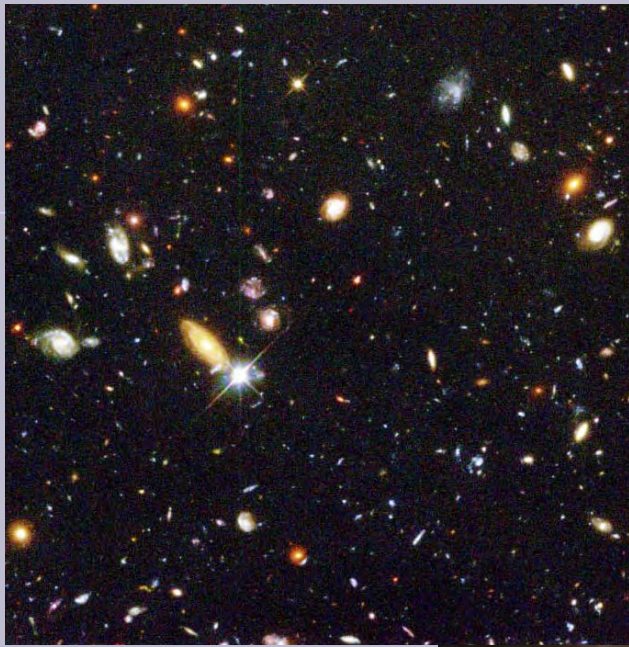


$\Omega = 1$ kritische Dichte
Universum flach
(euklidische Geometrie)

entspricht

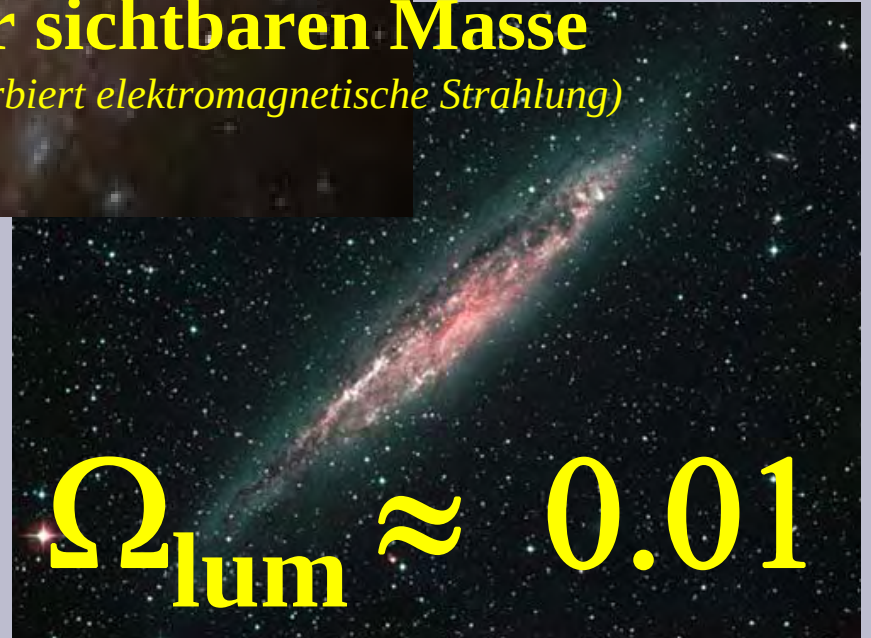
5 GeV / m³

5 Protonen / m³



Dichte der sichtbaren Masse

(emittiert oder absorbiert elektromagnetische Strahlung)

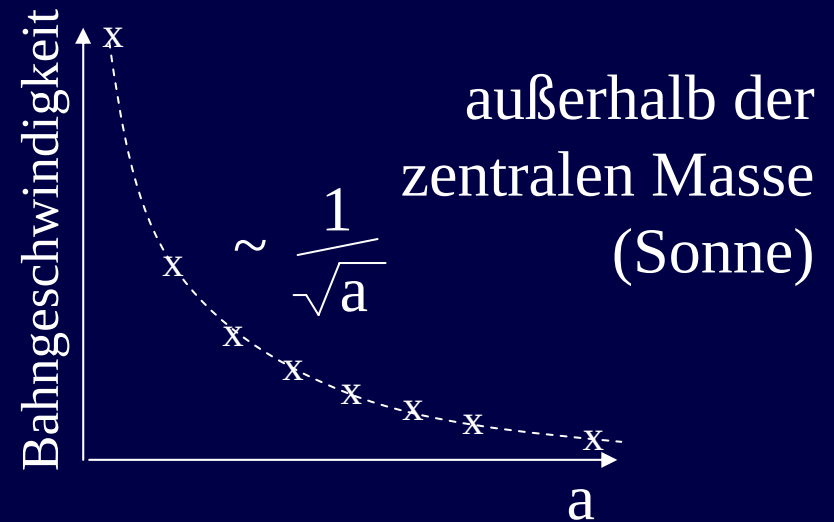
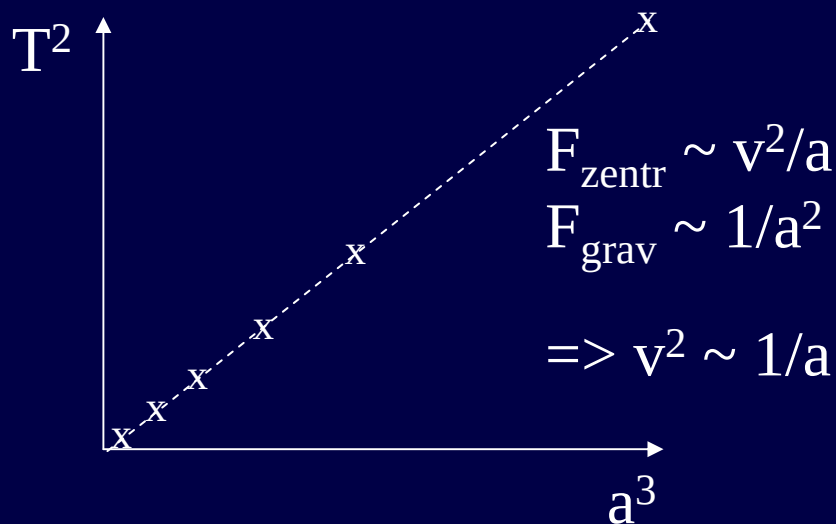


$$\Omega_{\text{lum}} \approx 0.01$$

3. Keplersches Gesetz

Zusammenhang zwischen
Umlaufzeit T
und Bahnradius a
der Planeten im Sonnensystem

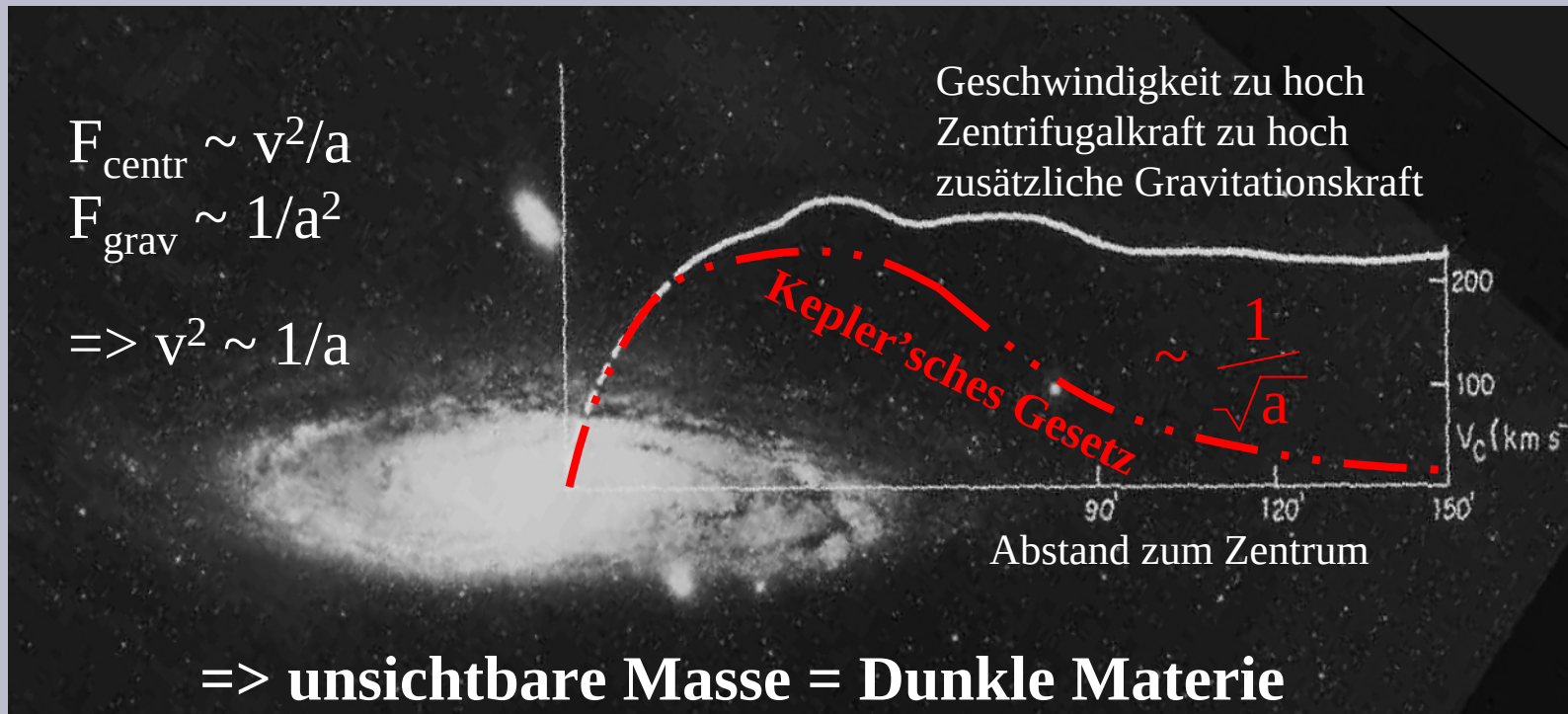
$$T^2 \sim a^3$$



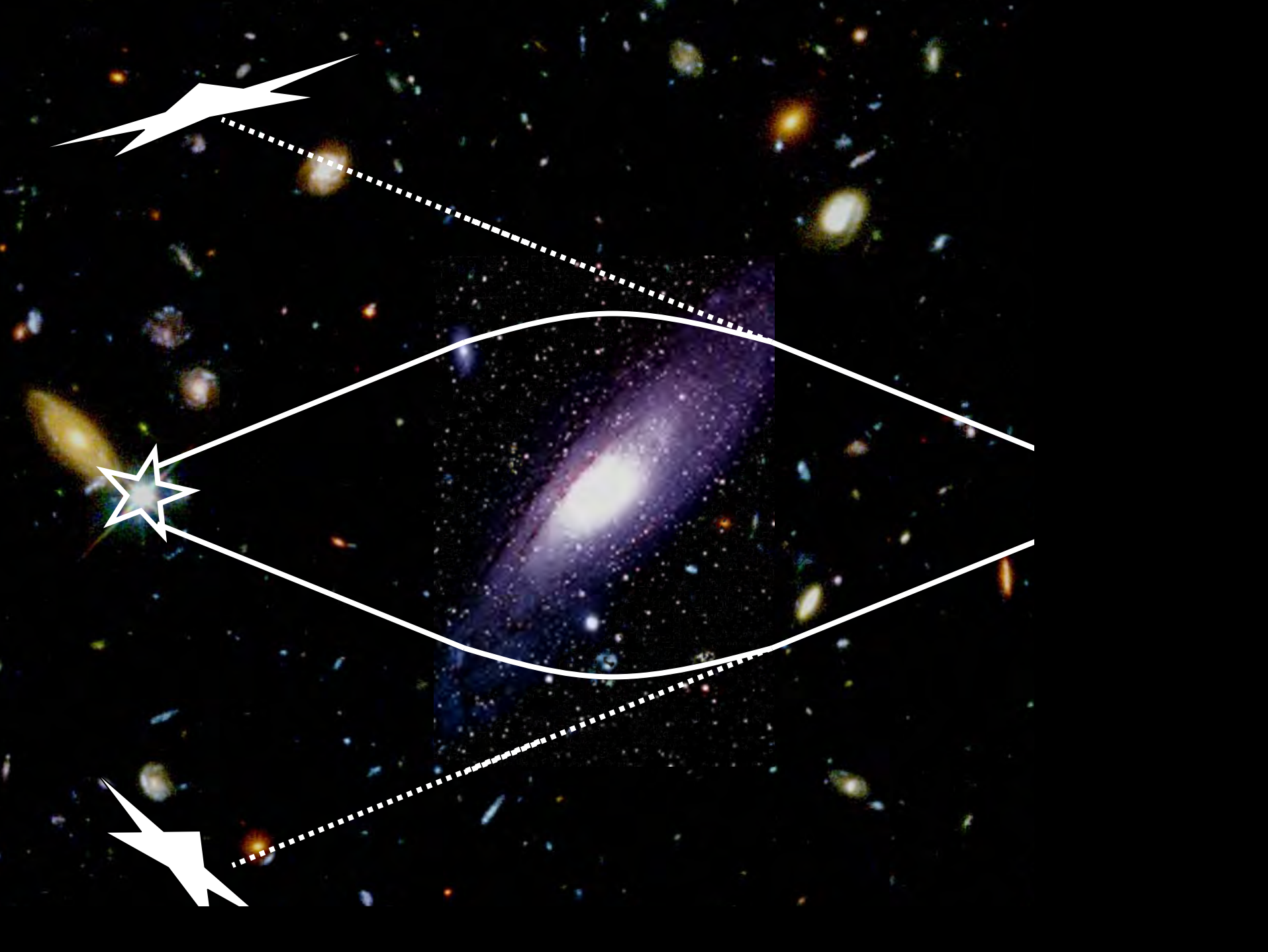
Dunkle Materie im Universum

ILIAS

Rotationskurven: Bahngeschwindigkeiten der Sterne
als Funktion des Abstandes zum Zentrum der Galaxie



$$\Omega_{\text{mat}} > \Omega_{\text{lum}} \approx 0.01$$





vorhandene Materie

$$\Omega_{\text{mat}} \approx 0.27$$

sichtbare Materie

$$\Omega_{\text{lum}} \approx 0.01$$

Staub, Gas, sichtbar

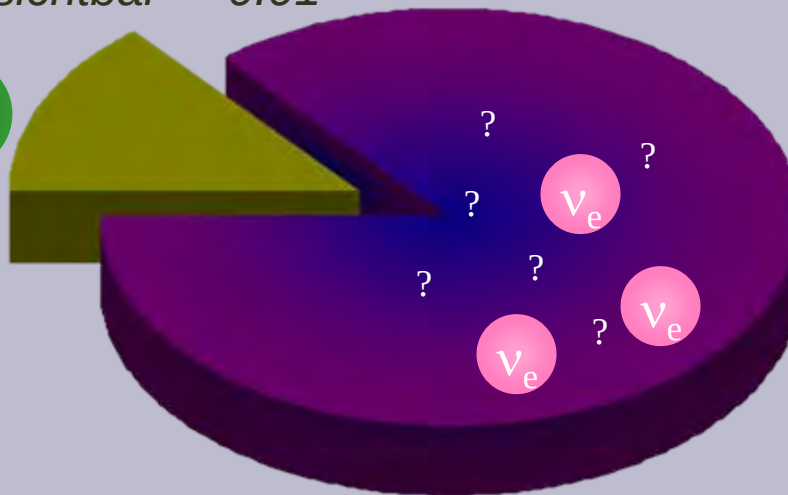
$$\Omega_{\text{bar}} \approx 0.04$$

Materie im Universum

$$\Omega_{\text{mat}} \sim 0.27$$

woraus besteht die
dunkle Materie ?

‘normale’
baryonische Materie 0.04
davon sichtbar ~ 0.01



dunkle Materie
0.23

Wechselwirkungen der Bausteine

ILIAS

Gravitations - Kraft

Sonnensystem, Galaxien etc.

Masse



Elektromagnetische (Coulomb)- Kraft

Atomhülle,
Materie um uns herum

Ladung



Kern - Kraft

Atomkerne.

Baryon



Schwache - Kraft

Beta-Zerfall

alle



gesucht $\Omega_{\text{Dunkle Materie}} = 0.23 \Rightarrow$ entspricht 1 **p** / m³

p gibt es (im Mittel)
nur eines alle 5 m³

$$\Rightarrow \Omega_{\text{Baryon}} = 0.04$$

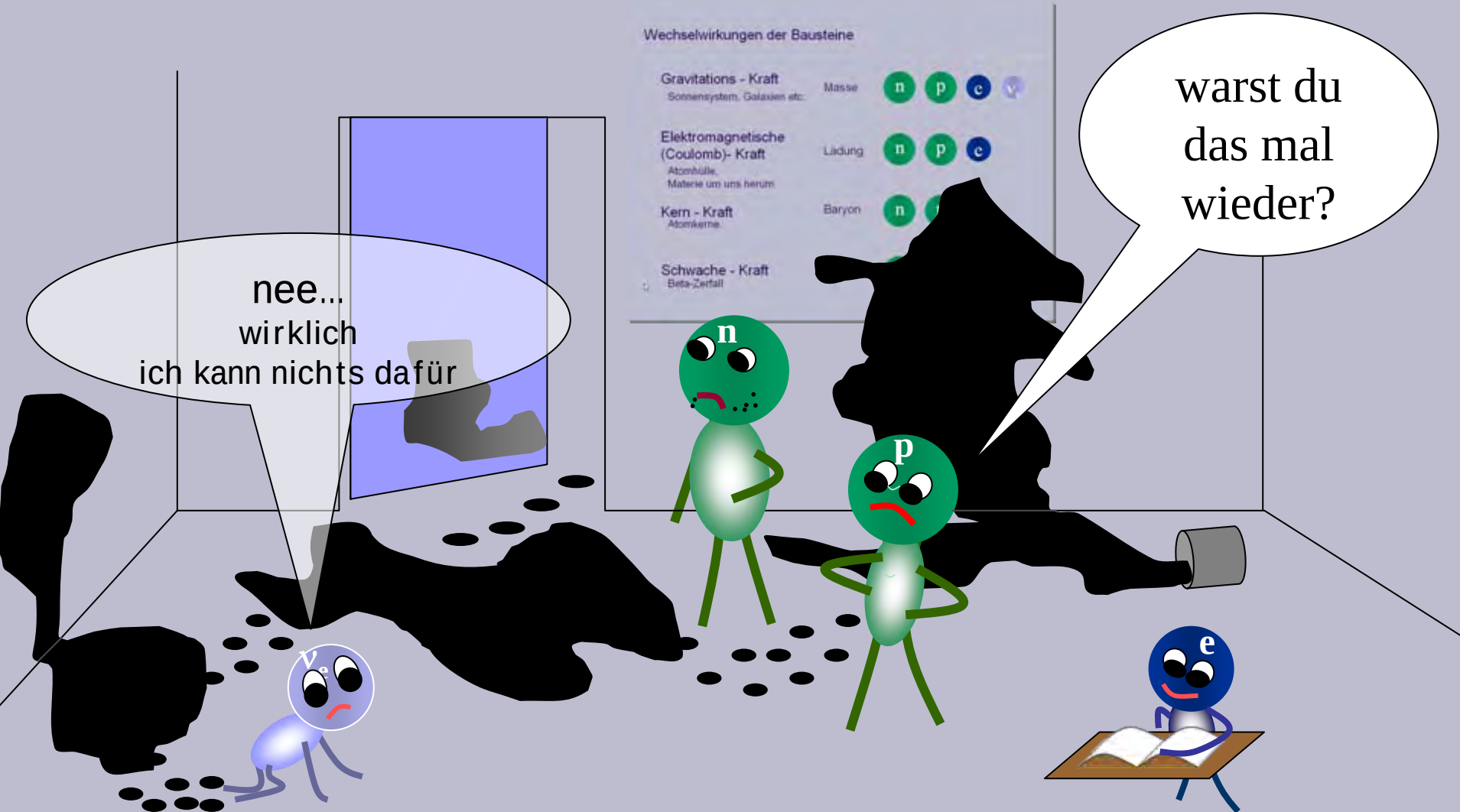
v - Masse

kleiner **p** / 1000.000.000 aber 340.000.000 **v** pro m³

$\Rightarrow$ könnte für bis zu $\Omega = 0.3$ ausreichen

Alles voller Dunkler Materie – Wer war das wohl !

ILIAS



Bildung der Strukturen im Universum

wenn der überwiegende Teil
der Materie aus Dunkler Materie
besteht, dann

dominiert sie auch die Strukturbildung

=> Ist Strukturbildung mit Neutrinos möglich ?

Dunkle Materie



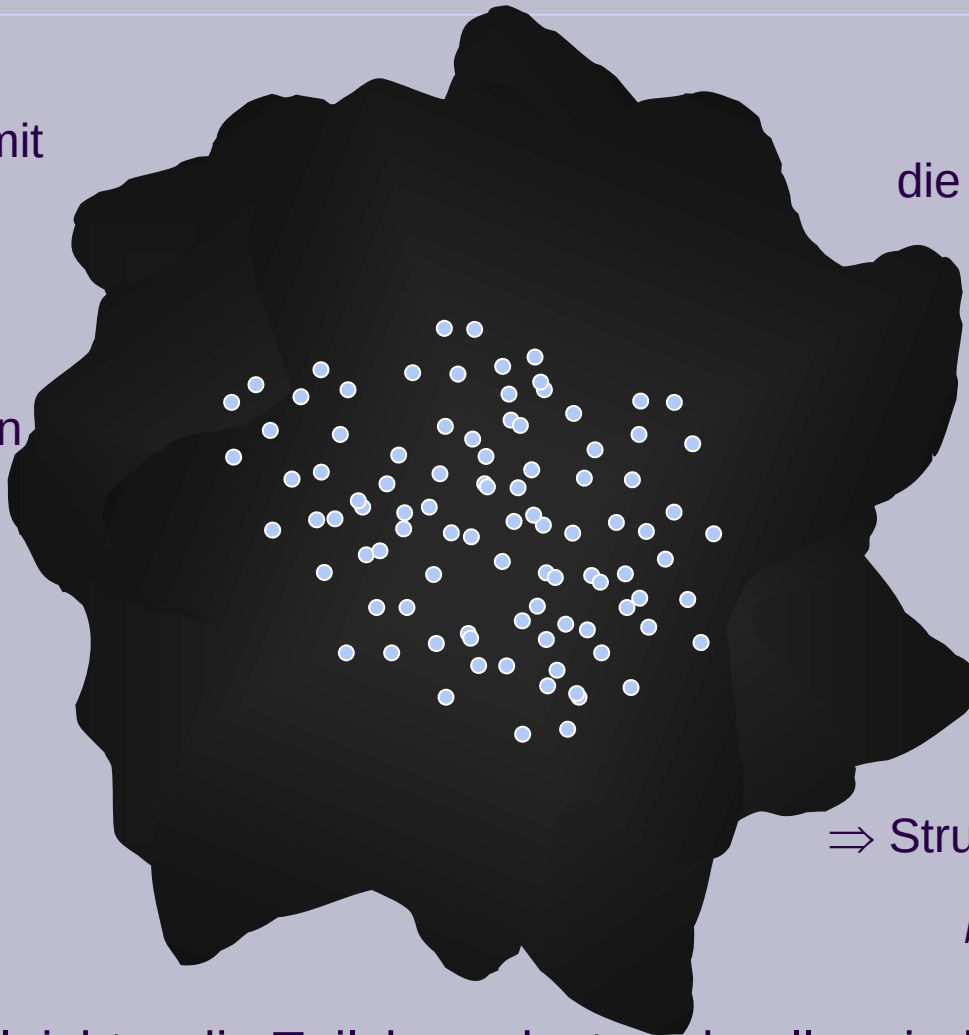
Bildung der Strukturen im Universum

ILIAS

eine 'Wolke' mit
Überdichte
kollabiert
durch die
Anziehung
der Gravitation

dazu
benötigt
sie eine
gewisse Zeit

'Kollaps-Zeit'



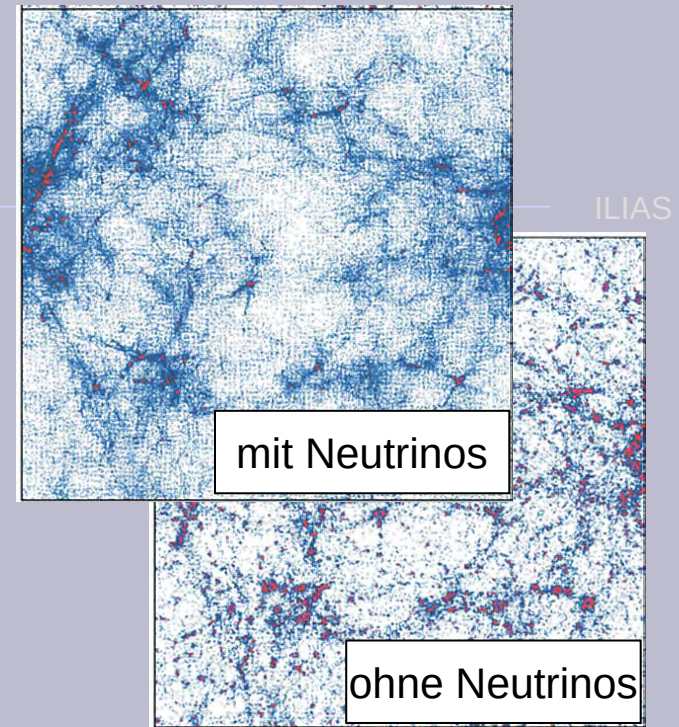
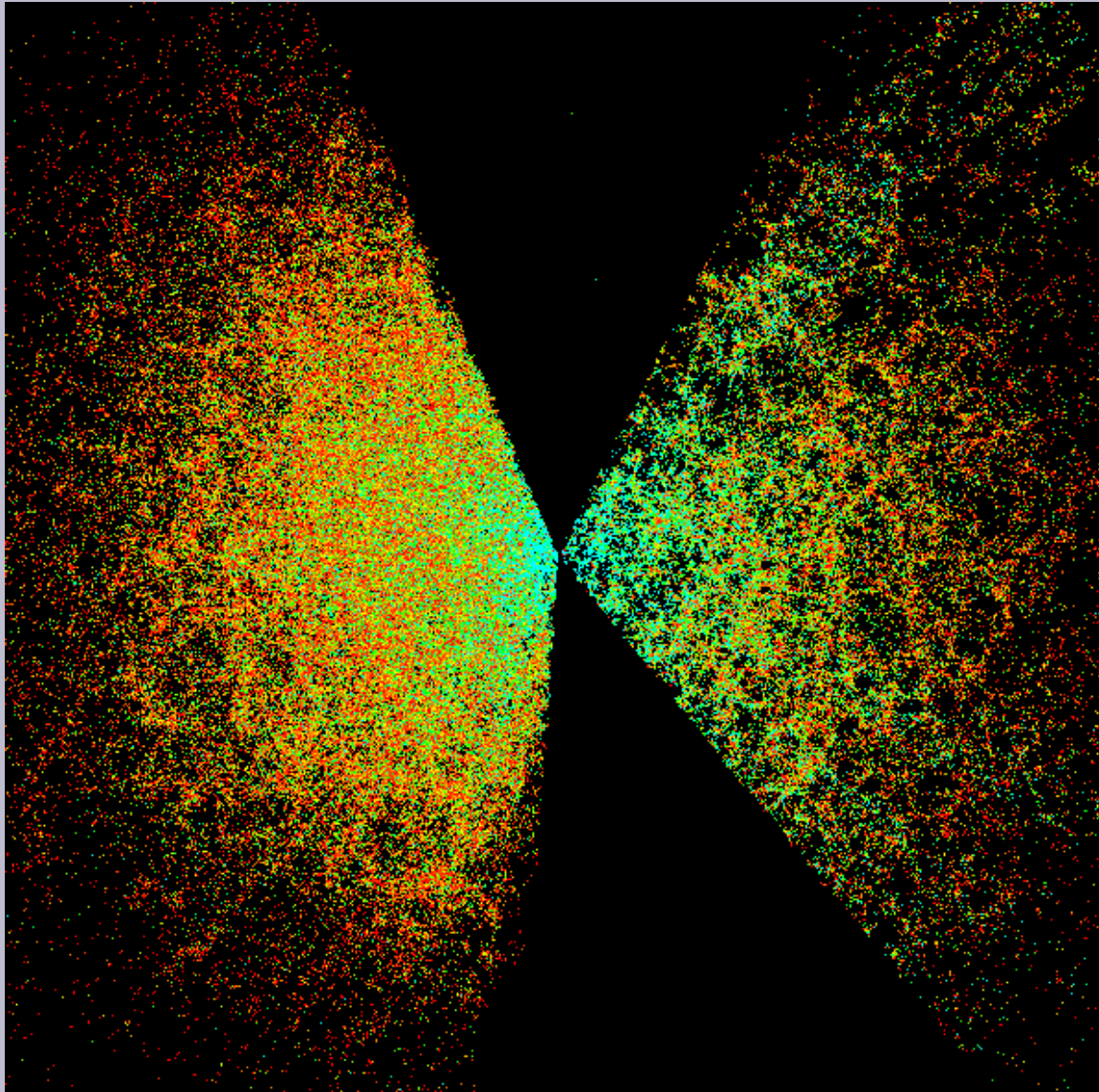
die Teilchen aus denen
die Wolke besteht
fliegen in alle
Richtungen

durchqueren
die Teilchen
die Wolke
schneller als
'Kollaps-Zeit'

⇒ Struktur wird 'verwischt'
*fliegt auseinander,
bevor sie sich bilden kann*

je leichter die Teilchen, desto schneller sind sie,
umso mehr werden kleine Strukturen verwaschen

Bildung der Strukturen im Universum

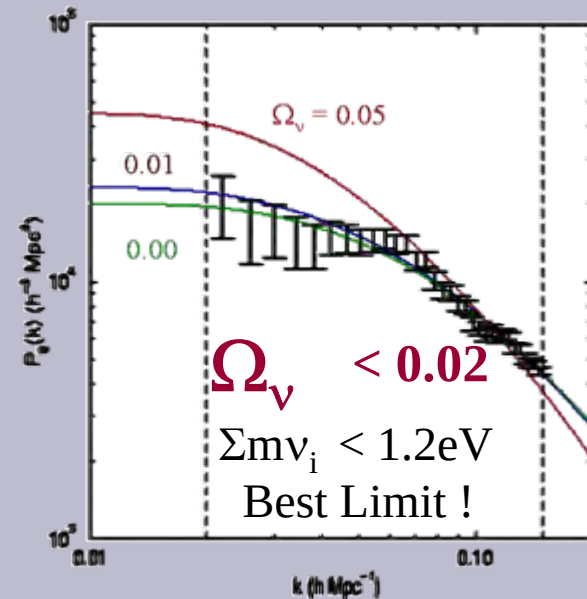
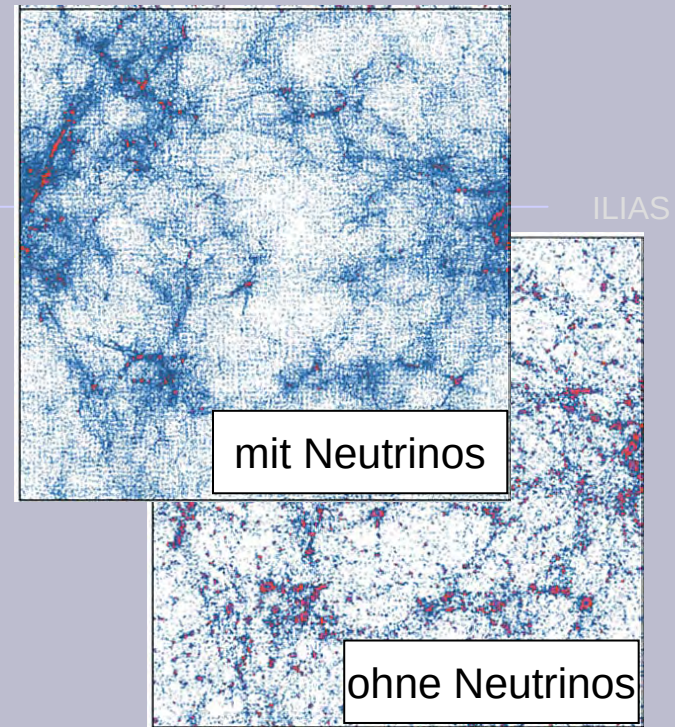
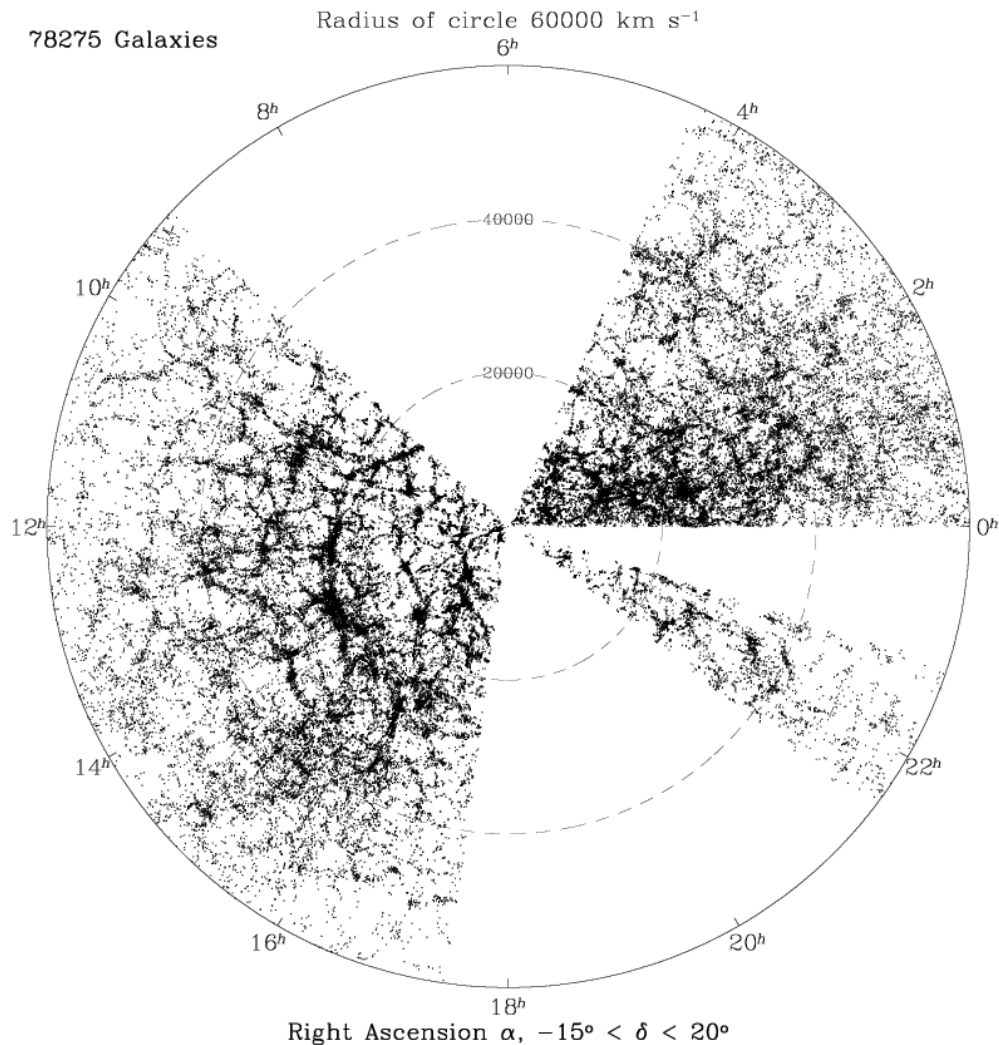


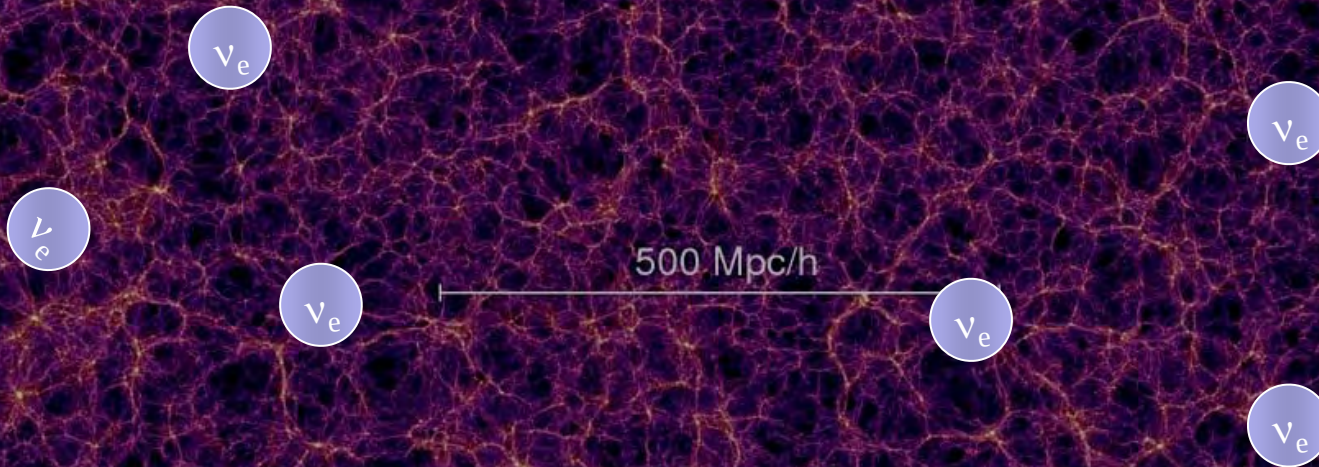
Messung der großräumigen
Struktur

Sloan Digital Sky Survey

Richtung und Entfernung
von Millionen von Galaxien

Bildung der Strukturen im Universum





Messung der großräumigen Struktur im Universum

⇒ **bisher beste Messung der Masse des Neutrinos !**

⇒ Neutrinomasse kleiner

p

1000.000.000

Aber Dunkle Materie besteht nicht (hauptsächlich) aus Neutrinos

Zusammensetzung der Materie im Universum

ILIAS

‘ ν zu leicht‘

der
überwiegende Teil
der (kalten)
Dunklen Materie
besteht aus bisher
unbekannten
Elementarteilchen

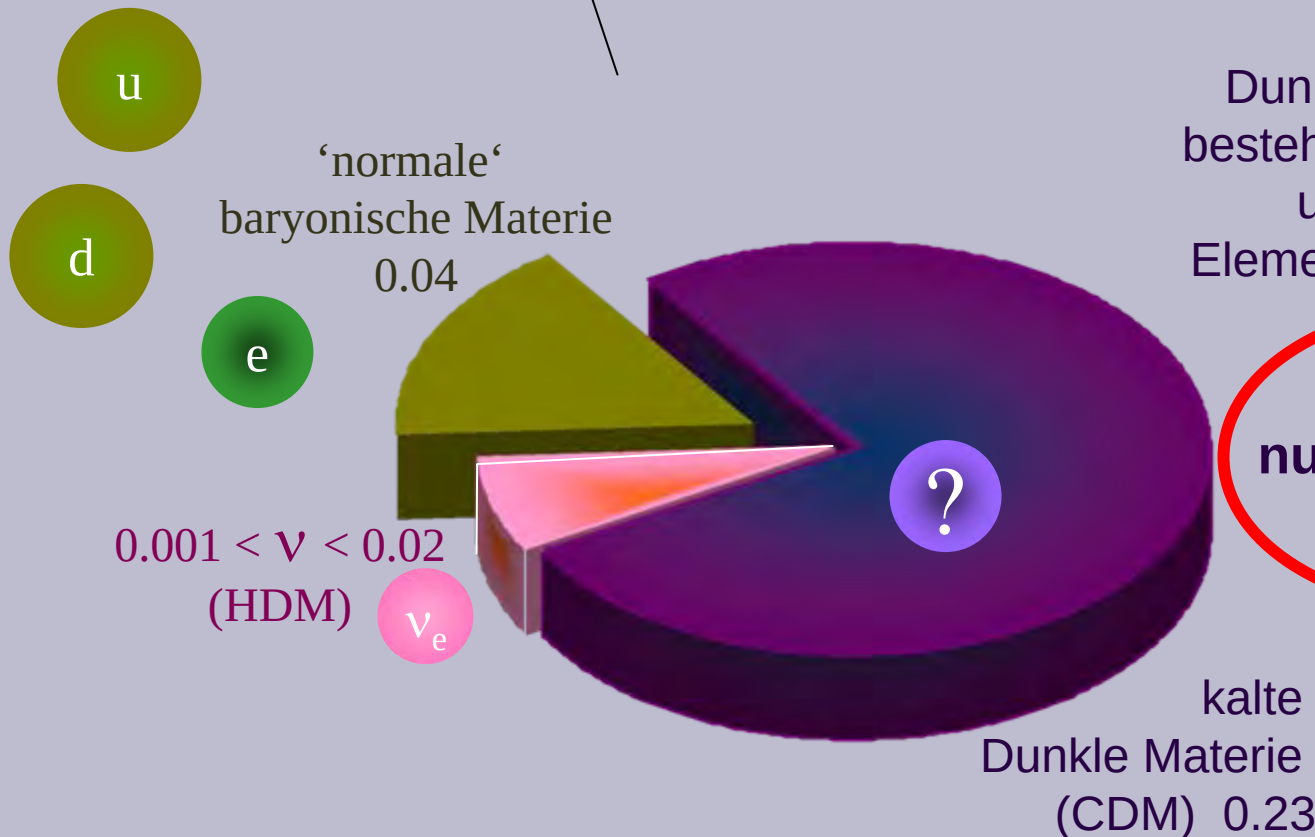
ähnlich ν
nur sehr viel
schwerer

$$\Omega_{\text{mat}} \sim 0.27$$

‘normale‘
baryonische Materie
0.04

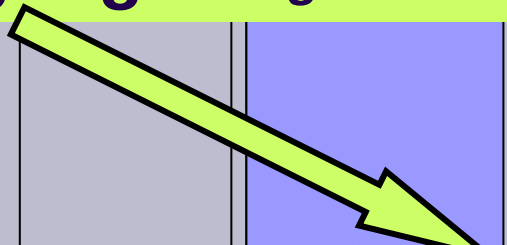
$0.001 < \nu < 0.02$
(HDM)

kalte
Dunkle Materie
(CDM) 0.23



Alles voller Dunkler Materie – Wer war das wohl !

Feigling *engl. WIMP*



Wechselwirkungen der Bausteine

Gravitations - Kraft
Sonnenystem, Galaxien etc.

Masse

n p e ν

Elektromagnetische
(Coulomb)- Kraft
Atomhülle,
Materie um uns herum

Ladung

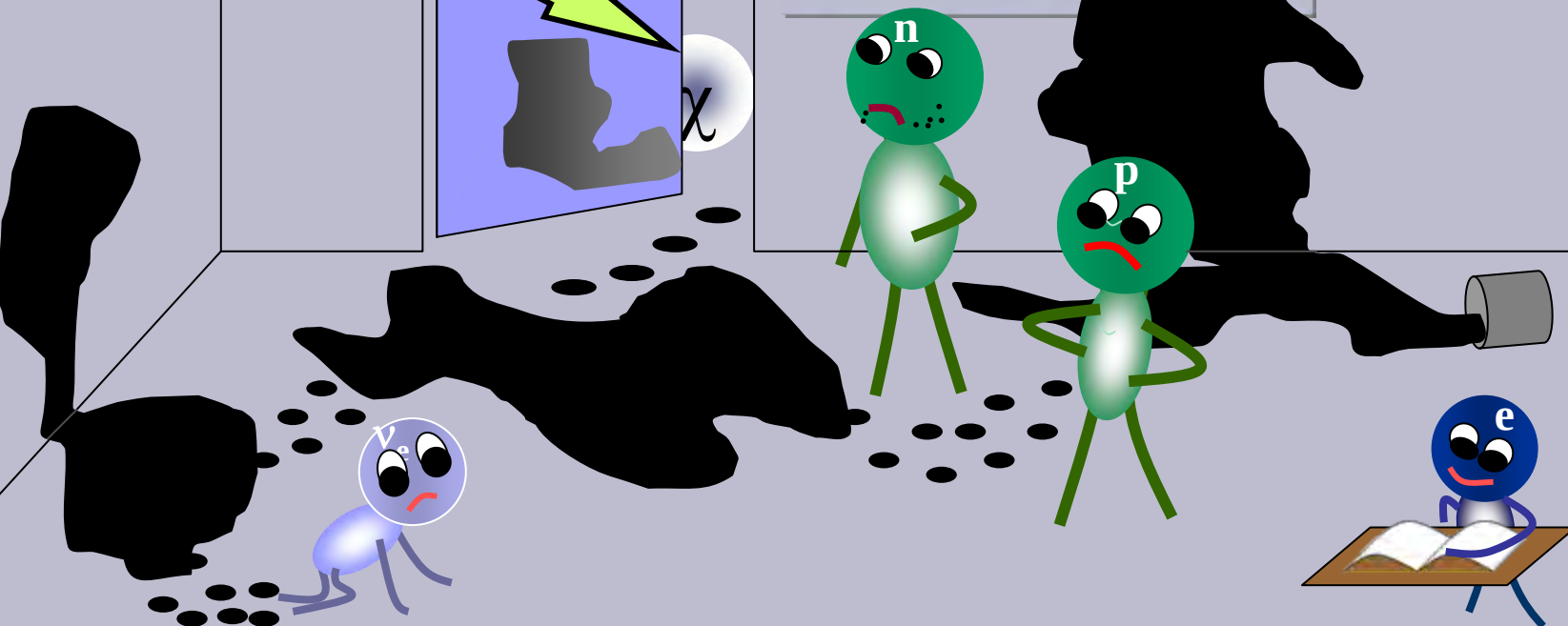
n p e

Kern - Kraft
Atomkerne

Baryon

n p

Schwache - Kraft
Beta-Zerfall

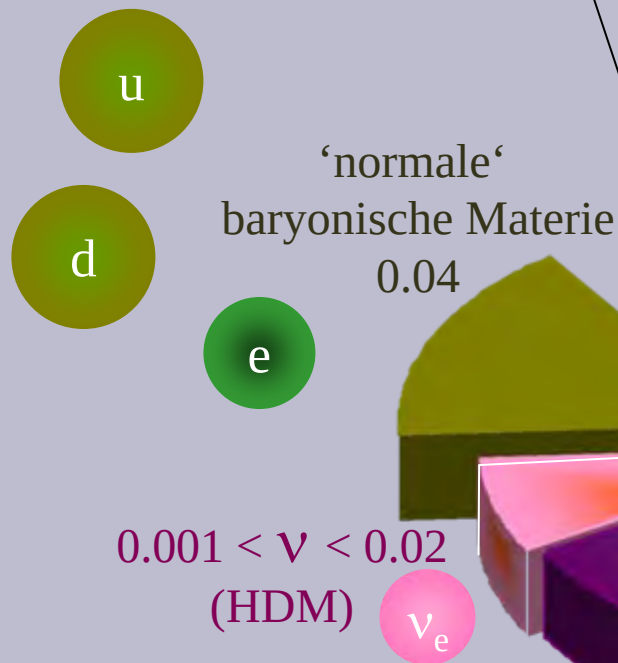


Zusammensetzung der Materie im Universum

ILIAS

ähnlich ν
nur sehr viel
schwerer

$$\Omega_{\text{mat}} = 0.27 \pm 0.04$$



Weakly Interacting
(schwach wechselwirkendes)
Massive Particle
(schweres Teilchen)

WIMP

kalte
Dunkle Materie
(CDM) 0.23



Dunkle Materie

~85% der Masse des Universums ist unbekannt
nicht-baryonisch

Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Neue Modelle
(z.B. Supersymmetrie)

Kosmologische
Beobachtungen

Teilchen-Physik

neue Elementarteilchen

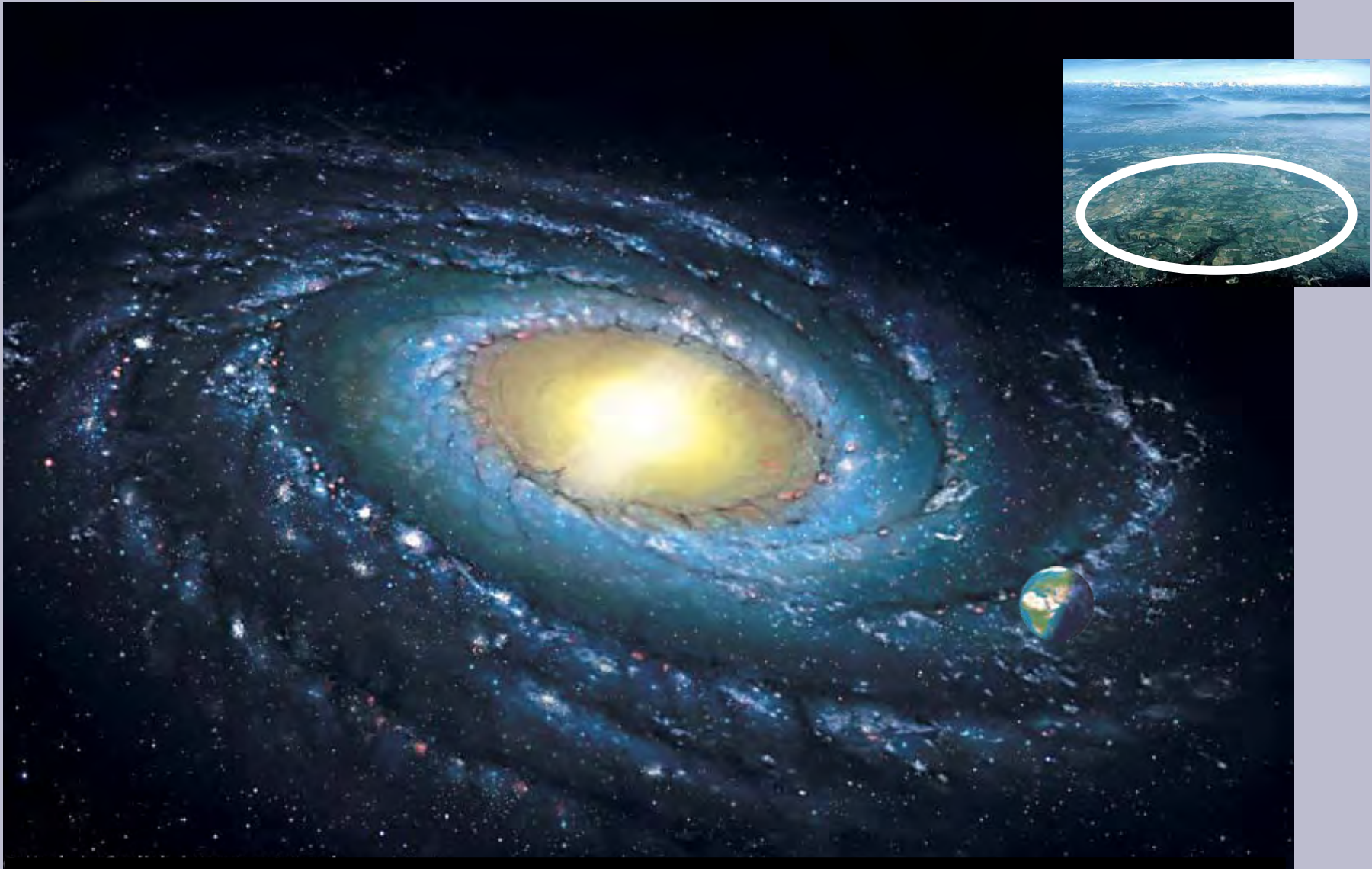
spannend:

Modelle / Theorien zur Erweiterung der Teilchenphysik
enthalten perfekte Kandidaten für kalte Dunkle Materie (WIMP)

Suche nach neuen Teilchen

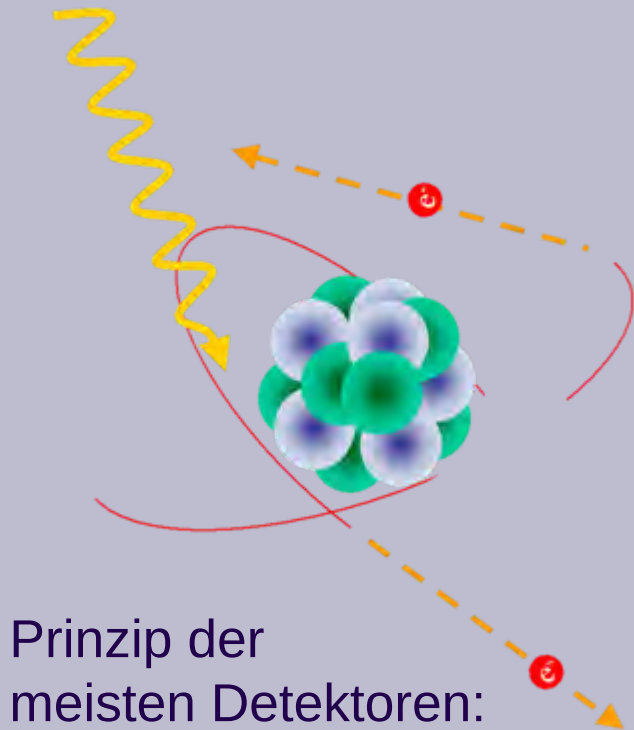
WIMP - Direkter Nachweis als Bestandteil der Dunklen Materie

ILIAS



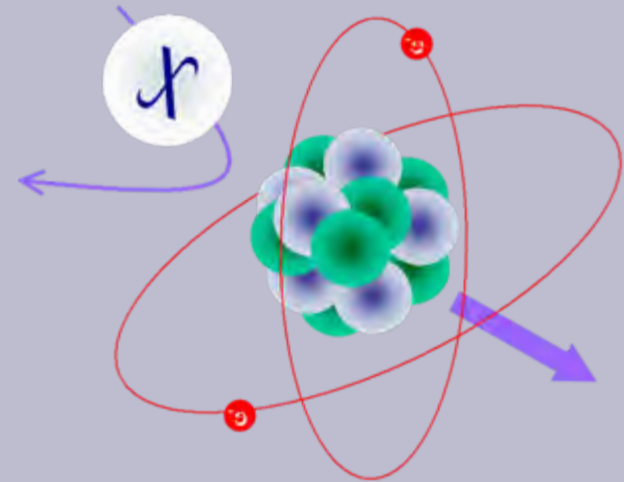
WIMP - Direkter Nachweis als Bestandteil der Dunklen Materie

ILIAS



Prinzip der meisten Detektoren:
Nachweis der Reaktionen mit Atomhülle
(Ladungs- oder Licht-Erzeugung)

Dunkle Materie-Teilchen
stoßen nur den
Atomkern an!



=> kaum Ladung / Licht

⇒ Neuartige Detektoren erforderlich !



WIMP - Direkter Nachweis

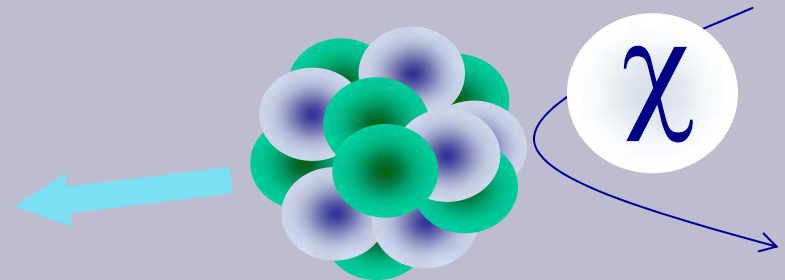
Weakly Interacting Massive Particles = **WIMPs**

ILIAS

Elastische Streuung an Atomkernen in einem Detektor

- Kernrückstöße: geringe Effizienz zur Erzeugung von Ladung und Licht

⇒ nur wenige keV Energie



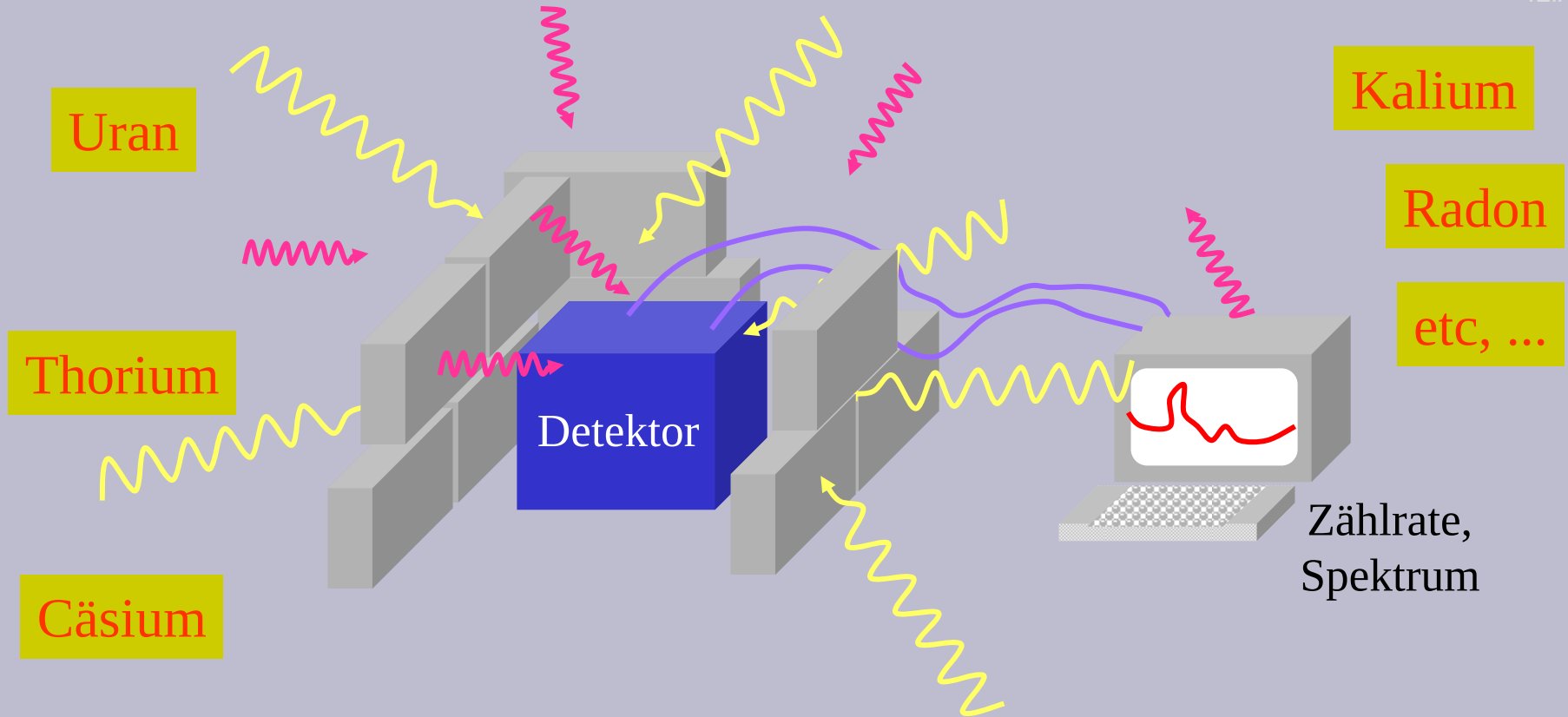
- Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\chi} < 10^{-36} \text{ cm}^2$
- lokale WIMP-Dichte $\rho_{\chi} = 0.3 \text{ GeV} / \text{cm}^3$ entspr. 3 WIMPs^(100GeV) / liter
- Geschwindigkeit $v \sim 270 \text{ km/s}$ 75000 /s /cm²

⇒ ~ 500 Mio Teilchen pro Sekunde durch unseren Körper

Dennoch: sehr seltene Streuereignisse (< 0.1 / Tag / kg)

Radioaktivität in der Umgebung

ILIAS



erforderliche Sensitivität ~ 1 Ereignis / kg / Woche (in Zukunft noch 100 x weniger)

Umgebungs-Radioaktivität: $> 1\text{Hz/kg} \sim 10^7$ Ereignisse /kg /Woche
=> 'saubere' Abschirmung: (altes) Pb, Cu

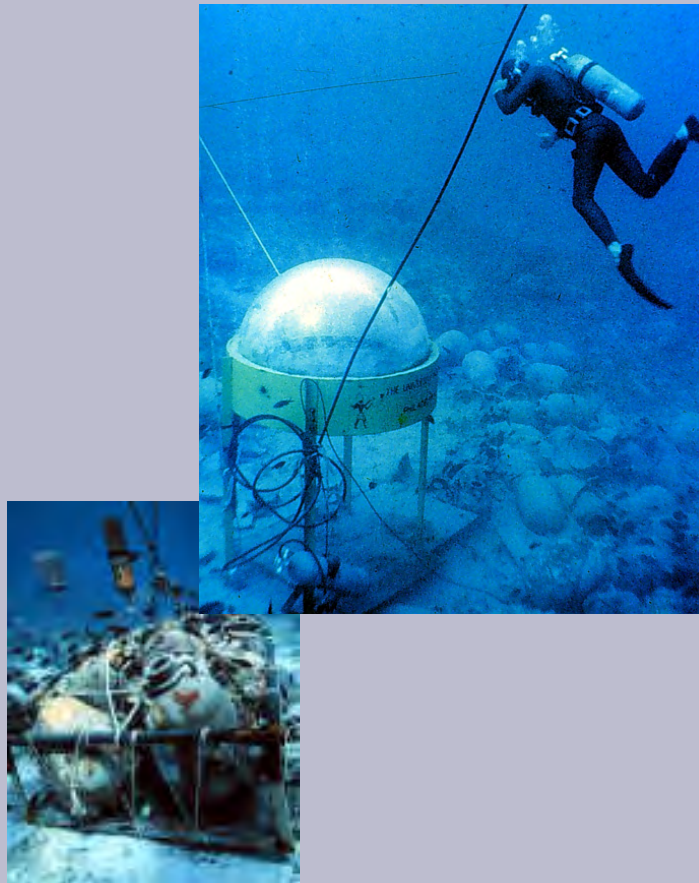
Innerster Teil einer Abschirmung aus Blei oder Kupfer

ILIAS



^{210}Pb in Blei-Abschirmung

22 Jahre Halbwertszeit => altes Blei



Experiment unter Reinraum-Bedingungen, um Staub (Radioaktivität) zu vermeiden

ILIAS

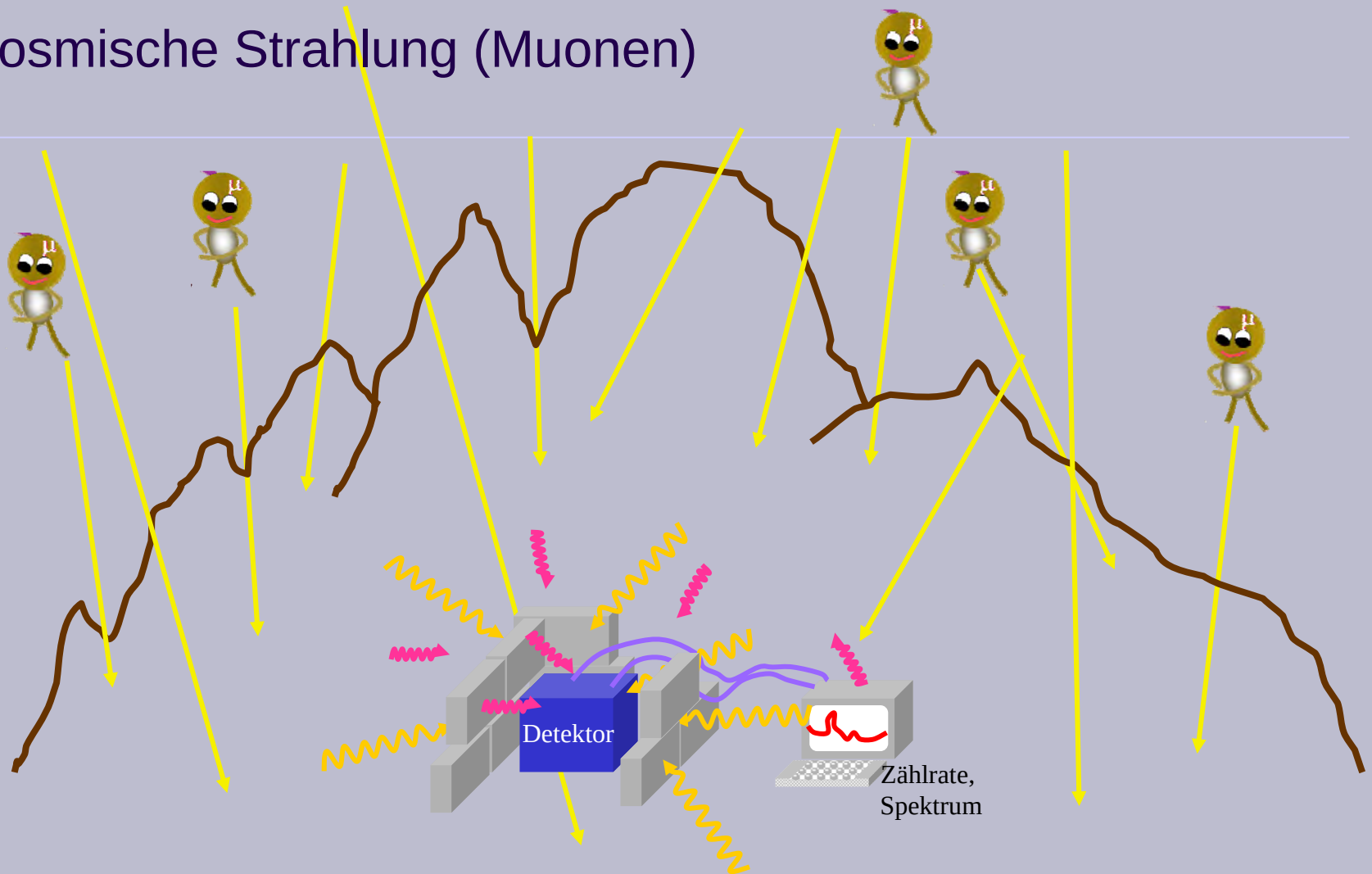


Aufbewahrung der Detektoren in Stickstoff-Atmosphäre, um Kontakt mit Radon (aus der Luft) zu vermeiden



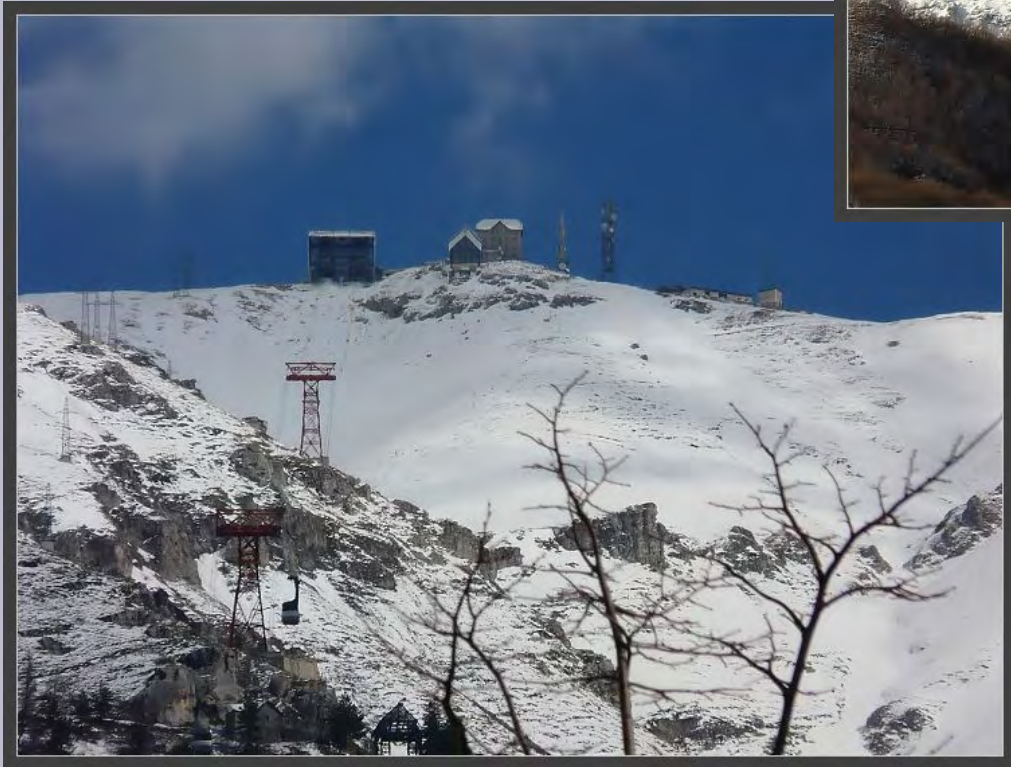
Kosmische Strahlung (Muonen)

ILIAS



erforderliche Sensitivität ~ 1 Ereignis / kg / Woche (in Zukunft noch 100 x weniger)

Muonen $\sim 0.1\text{Hz/kg}$: $\sim 10^6$ Ereignisse /kg /Woche
 ~ 1.5 km Gestein erforderlich $\Rightarrow$ Untergrund-Labor





Untergrund-Labore für die Suche nach seltenen Ereignissen

ILIAS

Suche nach Dunkler Materie
Neutrino-Nachweis
Spurenelement-Nachweis

...



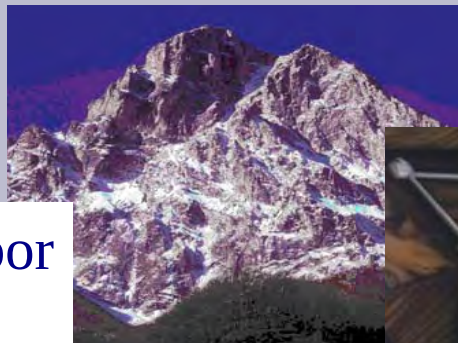
IUS

Institute of Underground
Science in Boulby mine,
UK



LSC

Laboratorio Subterraneo
de Canfranc, Spain



Gran Sasso Labor

Abschirmung
1.5km Fels

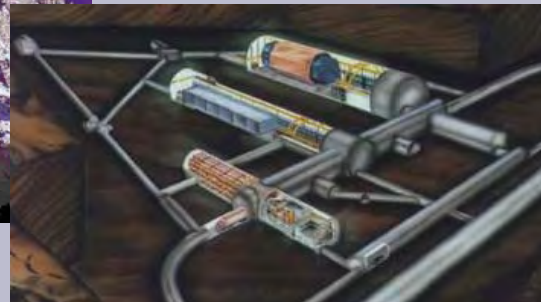


Laboratoire Souterrain
de Modane, France



LNGS

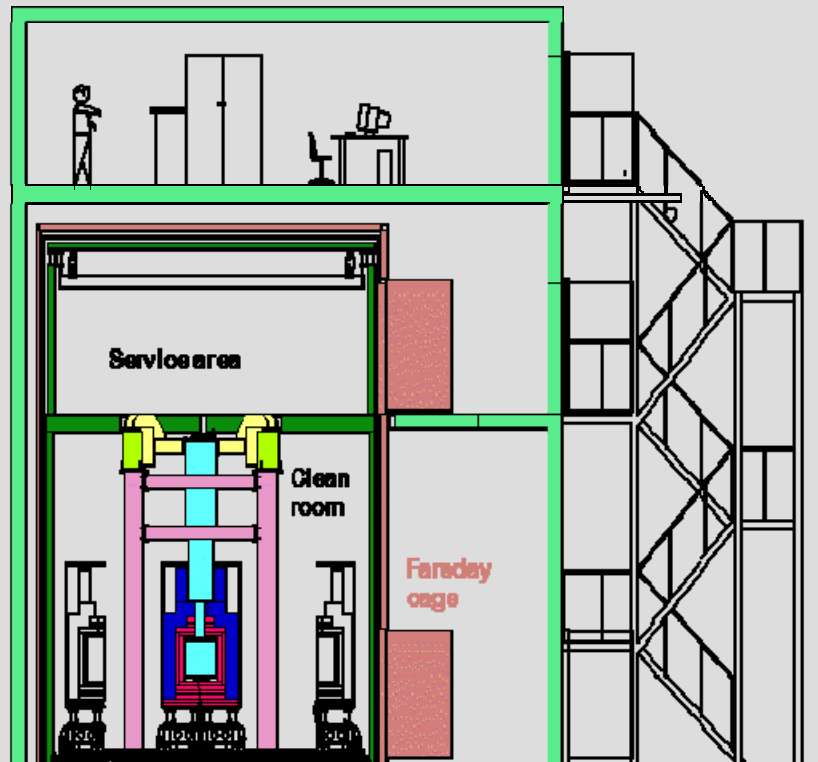
Laboratori Nazionali del
Gran Sasso, Italy





Suche nach Dunkler Materie im Gran Sasso Untergrund Labor

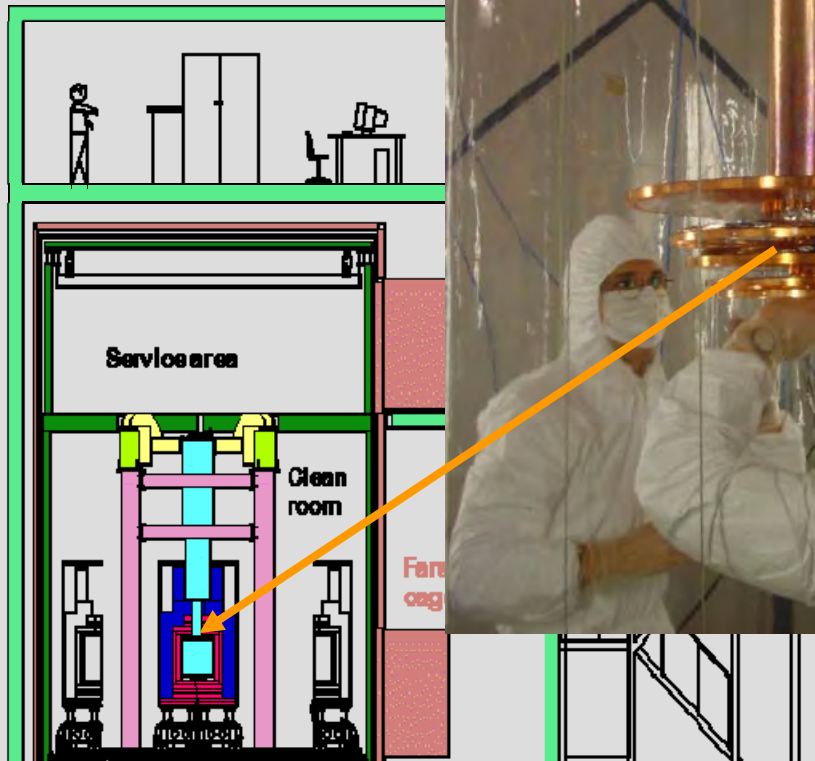
ILIAS





Suche nach Dunkler Materie im Gran Sasso Untergrund Labor

ILIAS





Dresdner Kernphysiker forscht an Dunkler Materie

Professor Zuber findet nichts so spannend wie das Nichts

Unglaublich! Der Dresdner TU-Kernphysiker Professor Kai Zuber erforscht das NICHTS! Sein Thema ist eine große Unbekannte, die 95 Prozent des Weltalls beherrschen soll: die geheimnisvolle Dunkle Materie.

Planeten, Sterne, Milliarden Milchstraßen - sie machen gerade fünf Prozent des Universums aus. Und der Rest? „Dunkle Materie“, ist sich Prof. Zuber sicher. „Weil am Rand der Galaxien die Sterne nicht wie gedacht immer langsamer, sondern im gleichen Tempo rotieren, muss sie dort eine Materie in Fluss halten.“ Auch unsere Milchstraße sei von einer „Kugel“ voller Dunkler Materie umgeben.

Keiner weiß, wie sie aussieht, woraus sie besteht und gleich gar nicht, wie sie bei der Erklärung der Welt einen Platz finden soll. „Wir wissen nur, dass diese Teilchen alles und jeden mühelos durchdringen - eine Vorstellung, die manchen nicht mehr schlafen lässt“, sagt Zuber. „Man kann sie mit bisher kommerziell Technik sehen oder messen, nicht greifen, nicht sammeln oder manipulieren wie etwa Elektronen. Die Teilchen sind allenfalls schwach wechselwirkend, wollen also mit keinem was zu tun haben. Sie sind einfach nur da.“

Um ihnen auf die Spur zu kommen, reist der 45-jährige viel nach Italien und Kanada. Hier liegt er mit Kollegen rund um die Uhr in „störungsfreien“ Laboren 1500 Meter unter einem Abraz-

zen-Massiv beziehungsweise 2000 Meter tief in einer Nickelmine von Ontario an Computern auf der Lauer. Auch im Dresdner „Felsenkeller“ ist ein - allerdings viel kleineres - Labor in Betrieb. „Wir suchen die Nadel im Heuhaufen, einem gigantischen Heu-

haufen“, sagt Prof. Zuber. „Keiner weiß, wann wir solch ein seltenes „dunkles“ Teilchen mal einlangen und wie es dann wirklich daherkommt. Wir hoffen, dass es in den nächsten zehn, fünfzehn Jahren passiert.“ Astrophysiker aus aller Welt

treffen sich vom 16. bis zum 20. Februar in der Dreikönigskirche zum Erfahrungsaustausch über dieses Thema. Der Vortrag „Dunkle Materie überall“ am 17. Februar um 19 Uhr im TH-Hörsaalzentrum (Bergstr. 64) ist öffentlich.

Die Forscher hoffen, dass ihnen mit dieser gigantischen unterirdischen Technik in Kanada die unbekannten Teilchen ins Netz gehen.

Prof. Zuber: „Die Entdeckung der Dunklen Materie wird das Weltbild völlig revolutionieren!“



Foto: Thomas Vogel/SPG

ILIAS

?

?

?

?

Chans auf Sachsens Straßen

Juwelenraub in Pirna - und

Wo stehen wir heute ? Teilchen bisher nicht gefunden !

Sensitivität: **1 Messereignis pro kg in zwei Wochen**

Detektormasse: einige kg, 10-30 Detektoren

DUNKLE

?

ν_e

MATERIE

Wo müssen wir hin ?

einige Messereignisse pro 100 kg in einem Jahr

- ⇒ sorgfältiger (sauberer) Ausbau
- ⇒ mehrere 1000 Detektoren, insgesamt ~ 1t
- ⇒ europäische Zusammenarbeit



Das Ziel !

Dunkle
Materie

ν_e

Teilchen identifiziert ?

χ

Physik jenseits des
Standardmodells

neue Teilchen erzeugt ?



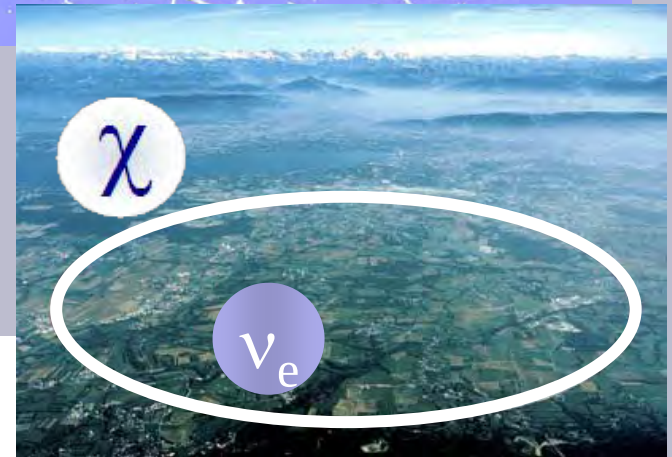
χ

ν_e

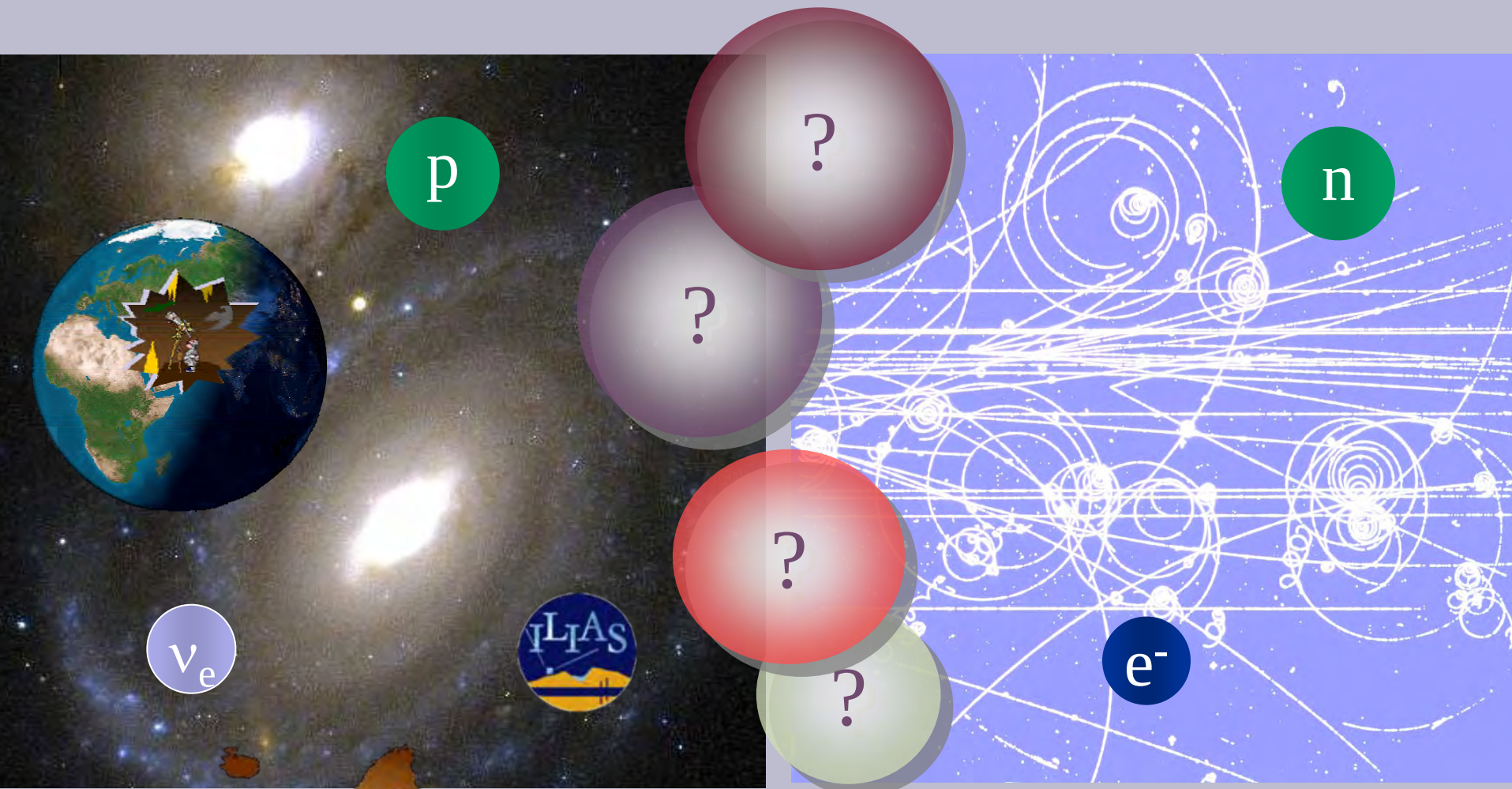
χ

enge
Verbindung

Astrophysik und Teilchenphysik



ν_e



enge
Verbindung
Astrophysik und Teilchenphysik

