

Para lá do céu visível: das ondas rádio aos raios gama e cósmicos na astrofísica

Paulo Crespo (crespo@lip.pt)

RÓMULO DE CARVALHO – CENTRO CIÊNCIA VIVA
Ciclo de Palestras +Ciência



AGÊNCIA NACIONAL
PARA A CULTURA
CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA
2013-12-12



• U



C •



QUALIFICAR É CRESCER.



QUADRO
DE REFERÊNCIA
ESTRATÉGICO
NACIONAL



COMPETE

PROGRAMA OPERACIONAL FACTORES DE COMPETITIVIDADE

Índice

1 Introdução

- Radiação electromagnética
- Raios cósmicos
- Variáveis medidas em astrofísica

2 Ondas rádio

3 Radiação no infravermelho

4 Radiação no visível

- Na astronomia
- Detecção

5 Raios X

- Detecção
- Na astronomia

6 Raios gama

- Na astronomia
- Detecção

7 Raios cósmicos no espaço: AMS

- Como se medem?
- Porque se medem?

8 Raios cósmicos no solo: Auger

- Como se medem?

9 Raios cósmicos no sub-solo: LUX

- Motivação
- Detector e resultados

Para lá do céu
visível:
das ondas rádio
aos raios gama e
cósmicos na
astrofísica

Índice

Resumo

Introdução

Ondas rádio

Radiação no
infravermelho

Radiação no
visível

Raios X

Raios gama

Raios cósmicos
no espaço: AMS

Raios cósmicos
no solo: Auger

Raios cósmicos
no sub-solo: LUX

Resumo

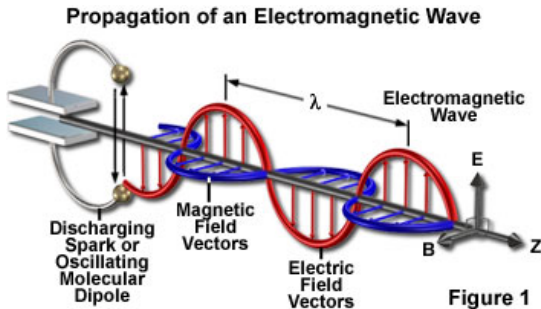
- Quais os métodos utilizados para obter informação astrofísica sobre o cosmos?
- Porque são alguns observatórios colocados em órbita no espaço (e.g. Hubble) e outros na Terra (e.g. ESO, Chile)?
- A resposta passa por transdutores especializados tanto na detecção de ondas eletromagnéticas como de partículas que a todo o momento nos chegam do nosso Universo, vizinho e longínquo.
- Faz também parte da resposta a compreensão dos fenómenos físicos que ocorrem desde
 - a fonte (big-bang, pulsares, gigantes vermelhas, anãs brancas, buracos negros, galáxias e aglomerados de galáxias),
 - o espaço interestelar (fotões do fundo de micro-ondas, lentes gravitacionais),
 - até ao alvo: a Terra, com a sua atmosfera e o seu campo magnético.

1. Introdução

1.1 Radiação electromagnética

- É a propagação, no espaço, de um campo eléctrico ortogonal a um campo magnético.

- Exemplo de onda electromagnética polarizada linearmente.
- Clicar na imagem para observar a relação vectorial entre $\vec{E}$, $\vec{B}(= \mu\vec{H})$, e a direcção de propagação da onda, $\hat{z}$.

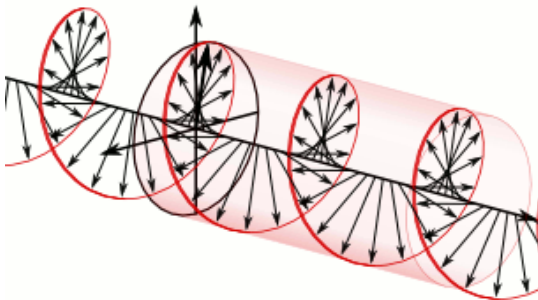


1. Introdução

1.1 Radiação electromagnética

- A sua propagação no espaço pode ser isotrópica (sem polarização preferencial), ou polarizada (e.g. planar, elíptica, circular).

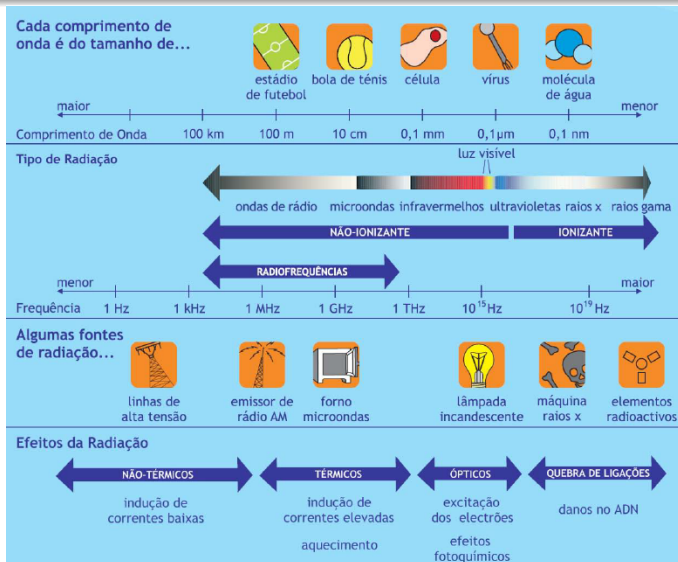
- Exemplo de polarização circular esquerda.
- Clicar na imagem para observar a rotação circular de $\vec{E}$ (ou $\vec{B}$) e a sua relação com a direcção de propagação, $\hat{z}$.



1. Introdução

1.1 Radiação electromagnética

- Origem e efeitos (na Terra)

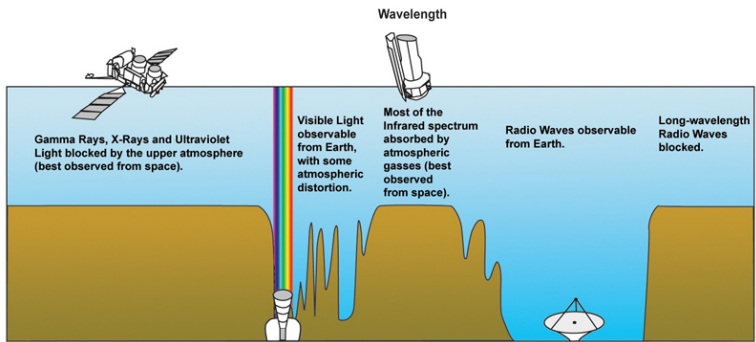
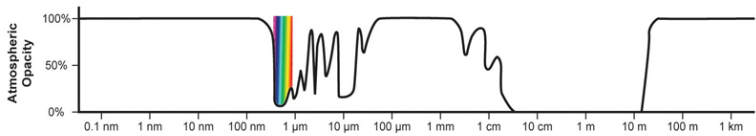


Fonte: C. Oliveira, D. Sebastião, D. Ladeira, M. Antunes, L. M. Correia,
Fontes de campos electromagnéticos em radiofrequência,
em Radioproteção, vol. 2, p. 73, 2010

1. Introdução

1.1 Radiação electromagnética

- Transmissividade/opacidade atmosférica



1. Introdução

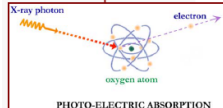
1.1 Radiação electromagnética

- Local de detecção na astronomia: na Terra ou em órbita? Opacidade da atmosfera terrestre é um problema para a observação astronómica de ondas rádio, micro-ondas, IV, UV, raios X e raios gama.

Absorption in der Atmosphäre der Erde

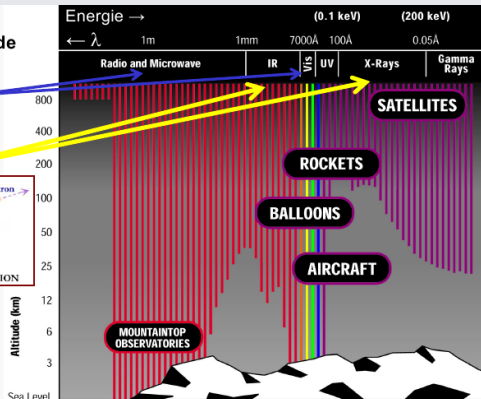
100 % Transmission

100 % Absorption



Moleküle: H_2O , O_2 , O_3 , CO_2 , N_2 , N

Mehr Infos:
Ref. 1, pp. 240



1. Introdução

1.1 Radiação electromagnética

- Transmissividade/opacidade atmosférica

Índice

Resumo

Introdução

Radiação electromagnética

Raios cósmicos

Variáveis medidas em astrofísica

Ondas rádio

Radiação no infravermelho

Radiação no visível

Raios X

Raios gama

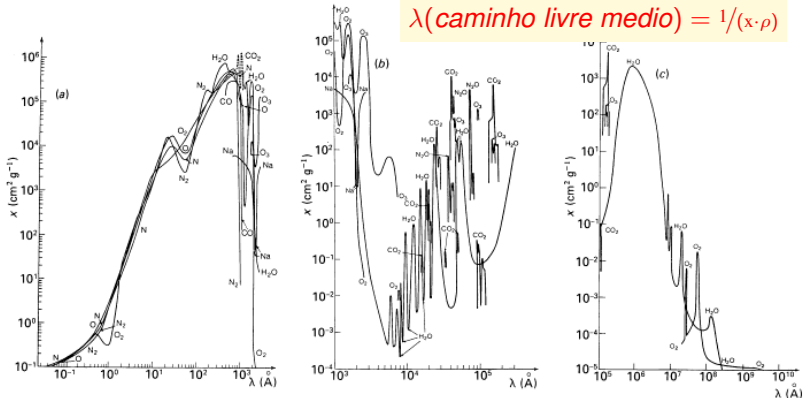
Raios cósmicos no espaço: AMS

Raios cósmicos no solo: Auger

Raios cósmicos no sub-solo: LUX

Opacity of the atmosphere

Attenuation of photons as a function of wavelength for various constituents of the atmosphere. The ordinate is the mass attenuation coefficient in $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$. (a) X-ray and EUV region; (b) UV, visible, and infrared region; (c) radio region. (Adapted from Pecker, J., *Space Observatories*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1970.)

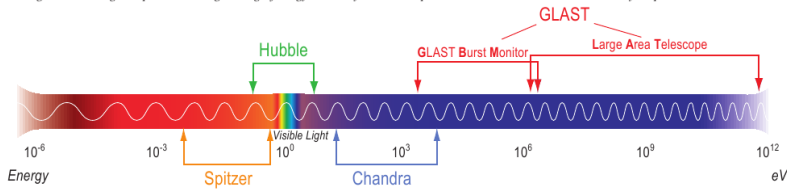


1. Introdução

1.1 Radiação electromagnética

- Local de detecção: na Terra ou em órbita? Mesmo radiação 100% transmitida pela atmosfera terrestre sofre perturbações de trajectória e visibilidade devido às condições atmosféricas.

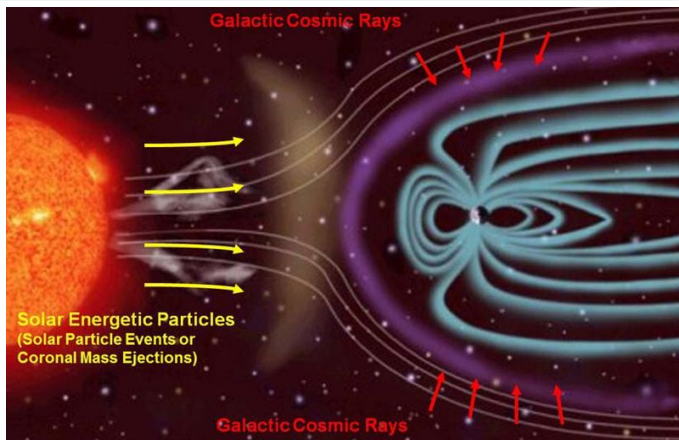
Figure: Electromagnetic spectrum showing the range of energy detected by GLAST compared to NASA's Great Observatories currently in operation.



1. Introdução

1.2 Raios cósmicos

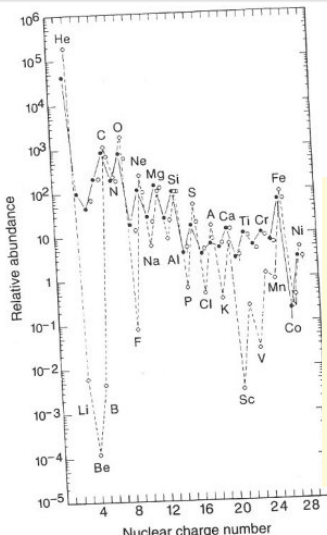
- Primários: núcleos e partículas carregadas estáveis ($\tau \leq 10^6$ a) incidentes no topo da atmosfera terrestre
- Secundários: produzidos em interações de raios cósmicos primários com o gás interestelar



1. Introdução

1.2 Raios cósmicos

- Abundância cósmica/solar relativa



- Normalizado ao silício.
- Círculos fechados: elementos cósmicos.
- Círculos abertos: elementos solares.

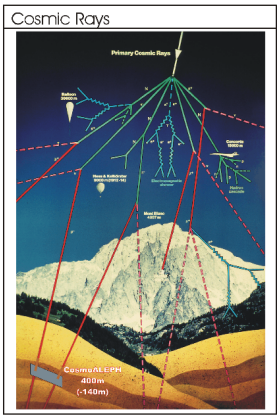
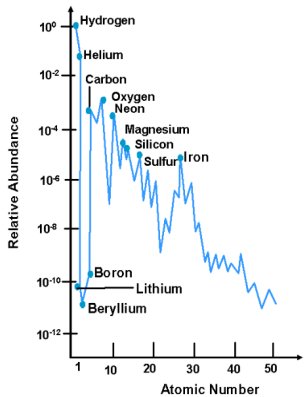
Excesso de elementos cósmicos abaixo de Fe e C explanável por reacções nucleares de evaporação (spallation). Contrariamente, defeito de H e He.

Fonte: H.V. Klapdor-Kleingrothaus, K. Zuber
Particle Astrophysics, IoP, 2000, Londres

1. Introdução

1.2 Raios cósmicos

- O que são? Partículas carregadas oriundas do Sol, de outras estrelas da Via Láctea ou de outras galáxias. Uma parte ínfima (mas calculável) foi produzida na fase do Big Bang denominada de *Big Bang Nucleosynthesis*.



1. Introdução

1.2 Raios cósmicos

- Onde se medem? Na Terra ou no espaço, desde que se tenha em conta a rigidez magnética da Terra.

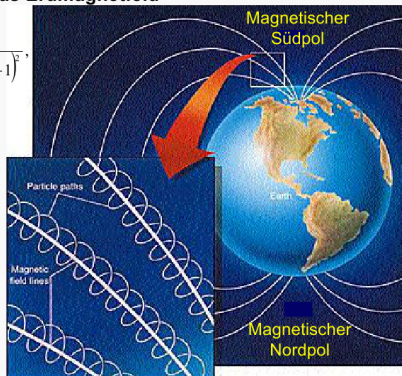
• Teilchenablenkung durch das Erdmagnetfeld

$$S = \frac{pc}{Ze} = \frac{M_{dip}}{R_{height}^2} = \frac{\cos^4 \theta_M}{\left(\sqrt{1 + \cos \alpha \cos^3 \theta_M} + 1\right)^2},$$

$$\left(\frac{M_{dip}}{R_{Earth}^2}\right) \approx 60 \times 10^9 \text{ Volt}$$

S : magnetische Steifigkeit
 R_{height} : Radius in bestimmter Höhe
 M_{dip} : Dipolmoment der Erde
 θ_M : Magnetische Breite
 α : Auftreffwinkel zur Erdoberfläche

Mehr Infos:
 Ref. 1, pp. 225
 Ref. 2

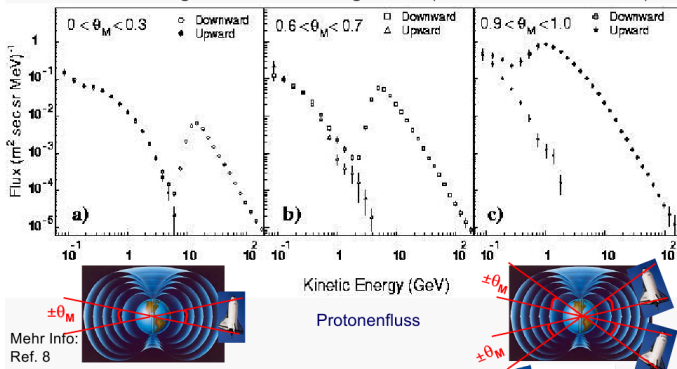


1. Introdução

1.2 Raios cósmicos

- Onde se medem? Na Terra ou no espaço, desde que se tenha em conta a rigidez magnética da Terra.

- Teilchenablenkung durch das Erdmagnetfeld ($E > 100$ MeV bei 400 km)



1. Introdução

1.3 Variáveis medidas em astrofísica/cosmologia

- Radiação electromagnética
 - **Fluxo:** magnitude estelar aparente, distância, magnitude absoluta
 - **Espectroscopia:** temperatura, composição química das estrelas (astrofísica nuclear)
 - **Desvio de Doppler:** velocidade de afastamento/aproximação
 - **Espectroscopia resolvida no tempo:** e.g. supernovas
 - **Sinais periódicos:** e.g. pulsares
 - **Polarização:** permite quantificar campos magnéticos cósmicos
- Raios cósmicos
 - **Partículas carregadas:** e.g. astrofísica nuclear
 - **Antipartículas:** e.g. relíquias do Big Bang?
 - **Partículas exóticas:** e.g. WIMPs, relíquias do Big Bang?
 - **Partículas neutras:** e.g. neutrinos, relíquias do Big Bang
- Ondas gravitacionais (fora do âmbito desta comunicação)

Índice

Resumo

Introdução

Radiação
electromagnética

Raios cósmicos

Variáveis medidas
em astrofísica

Ondas rádio

Radiação no
infravermelho

Radiação no
visível

Raios X

Raios gama

Raios cósmicos
no espaço: AMS

Raios cósmicos
no solo: Auger

Raios cósmicos
no sub-solo: LUX

2. Ondas rádio

Detecção

- No solo, através de antenas e electrónica dedicada

- Fokussierung:**

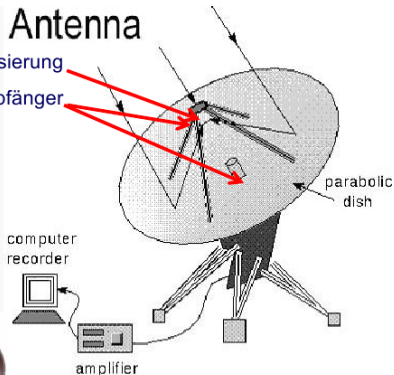
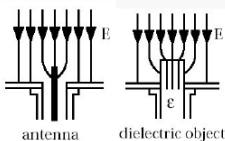
$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{D}$$

$\Delta\theta$: Winkelauflösung

λ : Wellenlänge des Strahls

D : Durchmesser des Parabolspiegels

- Detektor (Empfänger):**



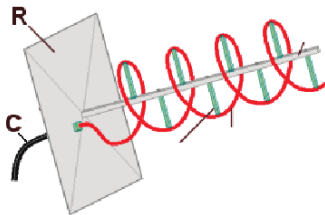
Mehr Infos:
Ref. 7

2. Ondas rádio

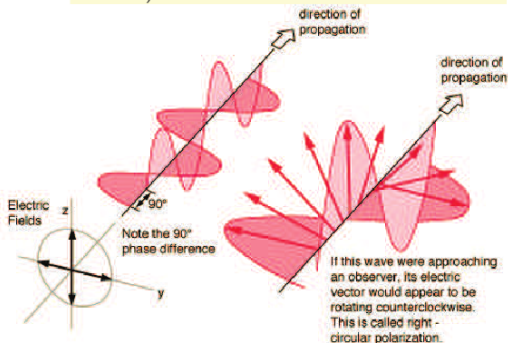
Deteção

- No solo, através de antenas, que podem ser polarizadas

Antenas e polarização da luz: Onda EM polarizada circularmente no espaço



Em condições **espaciais e temporais** específicas, uma antena helicoidal (imagem à esquerda) cria uma onda EM com polarização circular que se propaga na direcção do seu eixo central (imagem à direita).



2. Ondas rádio

Para lá do céu visível:
das ondas rádio aos raios gama e cósmicos na astrofísica

Índice

Resumo

Introdução

Ondas rádio

Radiação no infravermelho

Radiação no visível

Raios X

Raios gama

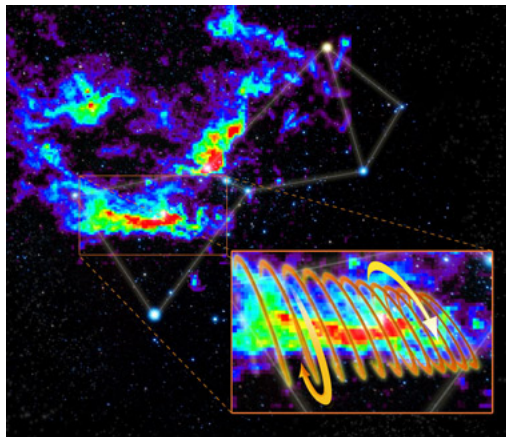
Raios cósmicos no espaço: AMS

Raios cósmicos no solo: Auger

Raios cósmicos no sub-solo: LUX

Detecção

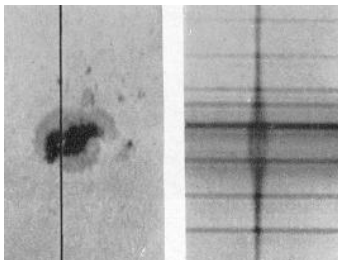
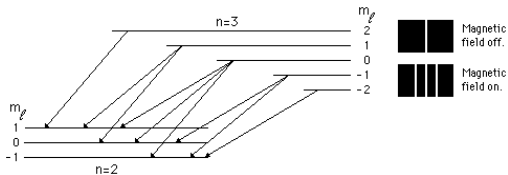
- Nuvens filamentosares nas OMC (Orion molecular clouds)
- Juntamente com espectroscopia (implementada através da electrónica de leitura), e
- Efeito de Zeeman (próximo slide)



2. Ondas rádio

Deteccção

- Efeito de Zeeman: interacção entre o campo magnético e o momento magnético dipolar m_l .
- Utilizado para medir campos magnéticos estelares ou de outra natureza cósmica

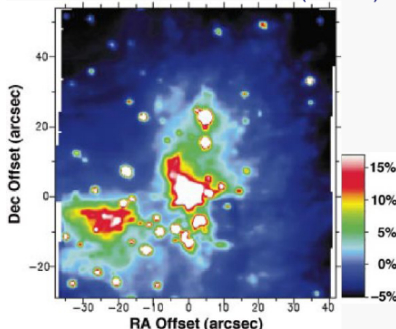


3. Radiação no infra-vermelho

Imagens 2D de ondas polarizadas circularmente

- Resultados: permitem calcular a intensidade do campo magnético na origem

zirkular polarisiertes Infrarotlicht (2.2 μm)
aus den Orion molecular clouds (OMC-1)



$$w_c = \frac{ecB}{E_e}, \quad E_\gamma = \frac{en\hbar cB}{E_e}$$

w_c : Zyklotronfrequenz
 E_e : Energie des Elektrons
 B : Magnetfeld des kosmischen Objektes
 E_γ : Energie des polarisierten Photons
 n : Ordnung der harmonische Frequenz

Mehr Infos:
Ref. 5

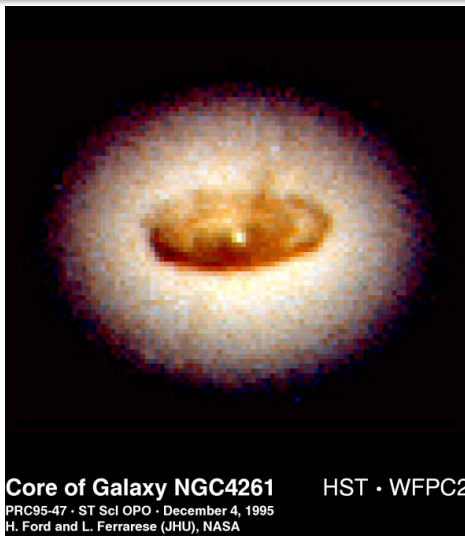
Dec: Deklination
 RA : Rektaszension

Mehr Infos:
Ref. 6

4. Radiação no visível

4.1 Na astronomia: necessário detector 2D e óptica

- Visível: buraco negro?



4. Radiação no visível

4.1 Na astronomia: fluxo, espectro, espectro resolvido no tempo para classificação do tipo de supernova

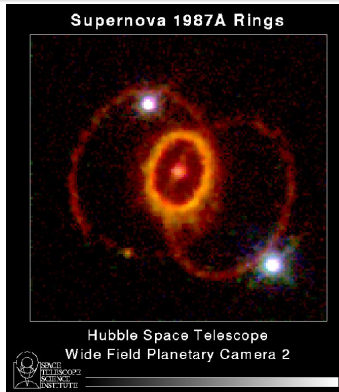
- Supernova: SN1987A durante a explosão e hoje. Anéis duplos de material em ejeção (próximo slide) não são ainda hoje percebidos.



4. Radiação no visível

4.1 Na astronomia: fluxo, espectro, espectro resolvido no tempo para classificação do tipo de supernova

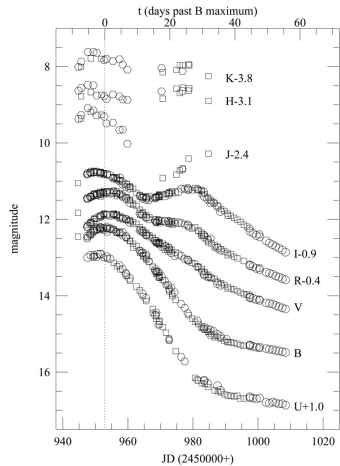
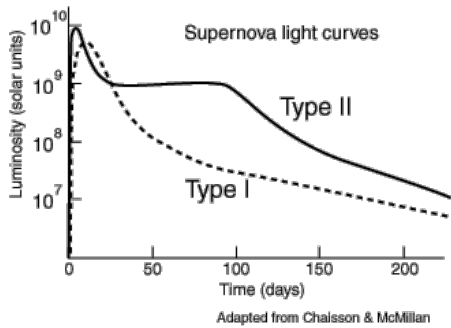
- SN1987A fotografada pelo HST. Anéis duplos de material em ejeção não são ainda hoje percebidos.



4. Radiação no visível

4.1 Na astronomia: fluxo, espectro, espectro resolvido no tempo para classificação do tipo de supernova

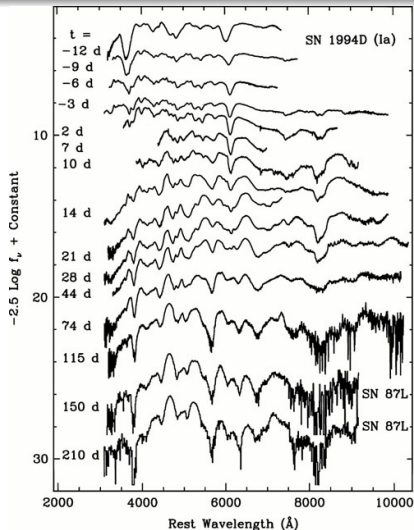
- Supernova I vs II: evolução temporal do fluxo de fótons.



4. Radiação no visível

4.1 Na astronomia: fluxo, espectro, espectro resolvido no tempo para classificação do tipo de supernova

- Supernova Ia: evolução temporal do espectro (UV a NIR).

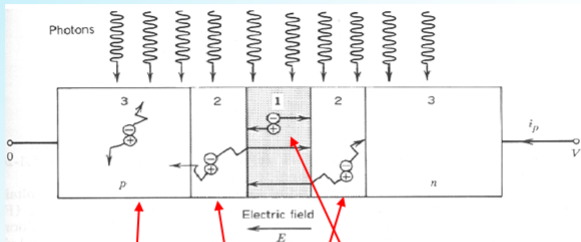


4. Radiação no visível

4.2 Semicondutor: célula básica de detecção de luz

- Visível: O detector mais moderno de radiação visível é o semicondutor com base no silício dopado (junção p-n).

- Light collection at the junction



e-h pair not collected
(recombination)

e-h pair promptly
separated

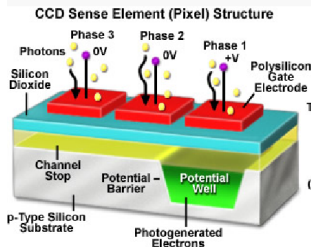
Eventually collected
after drifting

4. Radiação electromagnética

4.2 Semicondutor: célula básica de detecção de luz

- Visível: A leitura de imagens é efectuada com base em várias junções p-n construídas num CCD (charge coupled device).

• Häufigster Detektor: der CCD (*Charge-coupled Device*)

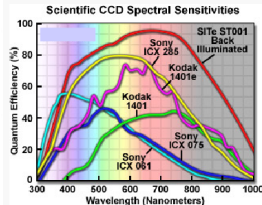
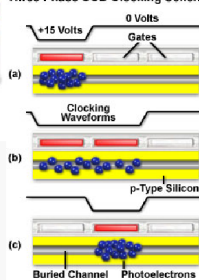


Mehr Infos:
Ref. 1, pp. 362
Ref. 4

• wichtiger Vorteil:

- Auslesen einer Multipixelmatrix ist mit wenigen Transfer-Gates möglich

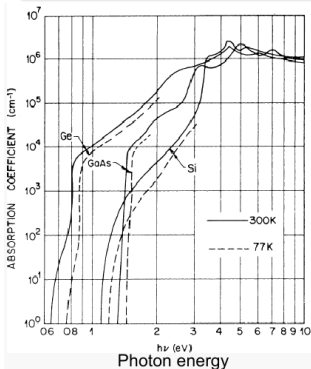
Three Phase CCD Clocking Scheme



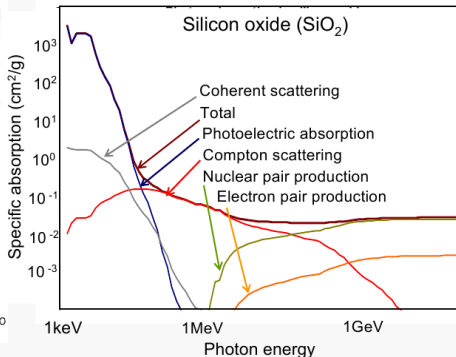
4. Radiação electromagnética

4.2 Semicondutor: célula básica de detecção de luz

- Eficiência: do IV aos raios X de mais baixa energia.



← Radiowellen sichtbares Spektrum



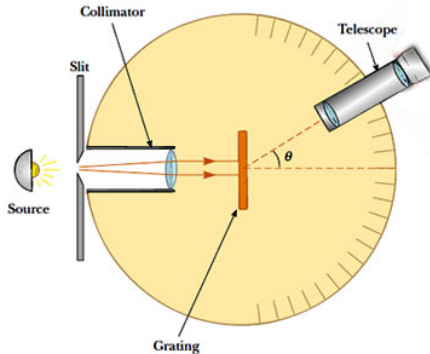
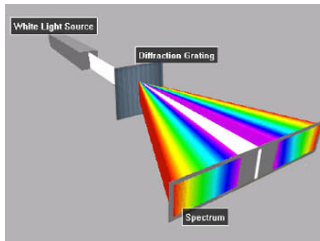
Röntgen

Gamma →

4. Radiação electromagnética

4.2 Espectrometria: tem como base o fenómeno de difracção ou de filtragem da luz

- Visível: rede de difracção (do IV ao UV).

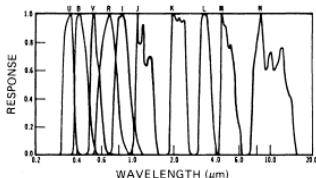


4. Radiação electromagnética

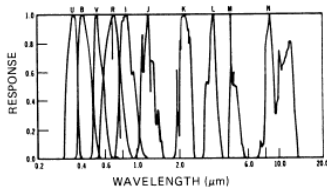
4.2 Espectrometria: tem como base o fenómeno de difracção ou de filtragem da luz

- Resposta fotométrica de sistemas utilizados na astronomia.

Photometer response curves for UBVRI and long wavelength systems.
(Adapted from Webbink, R. F. & Jeffers, W. Q., *Space Sci. Rev.*, **10**, 191 1969.)



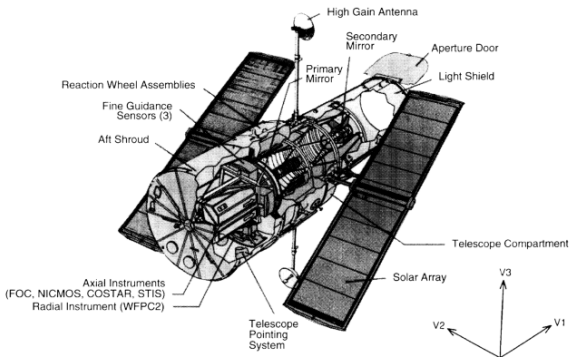
Response curves of photometer plus atmosphere. (Adapted from Webbink, R. F. & Jeffers, W. Q., *Space Sci. Rev.*, **10**, 191, 1969.)



4. Radiação no visível

4.1 Na astronomia: fluxo, espectro, espectro resolvido no tempo para classificação do tipo de supernova

- Detecção no espaço: telescópio Hubble



- FOC: faint object camera.
- NICMOS: near infrared camera and multi-object spectrometer.
- COSTAR: corrective optics space telescope axial replacement.
- STIS: space telescope imaging spectrograph.
- WFPC2: wide field planetary camera.

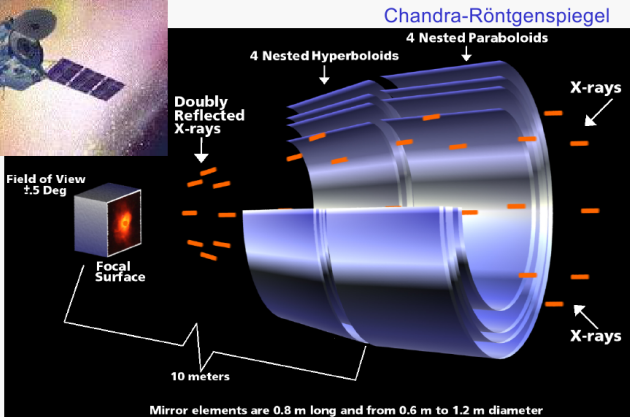
5. Raios X

5.1 Detecção na astronomia

- Telescópio Chandra construído para operar no espaço



• Chandra Röntgenteleskop



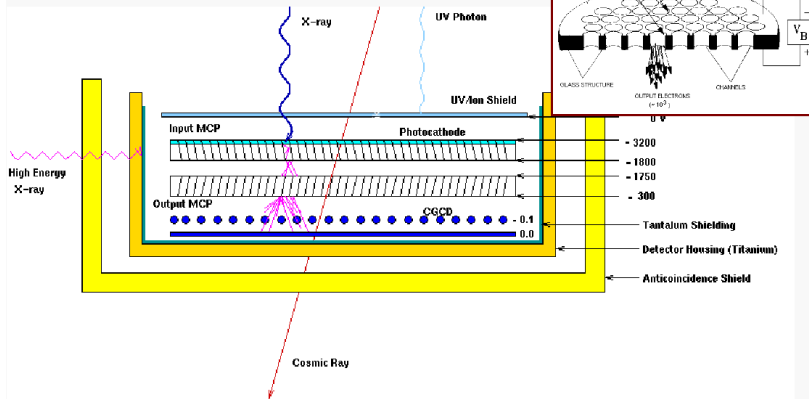
Mehr Info:
Ref. 13

5. Raios X

5.1 Detecção na astronomia

- Pormenor do detector do telescópio Chandra

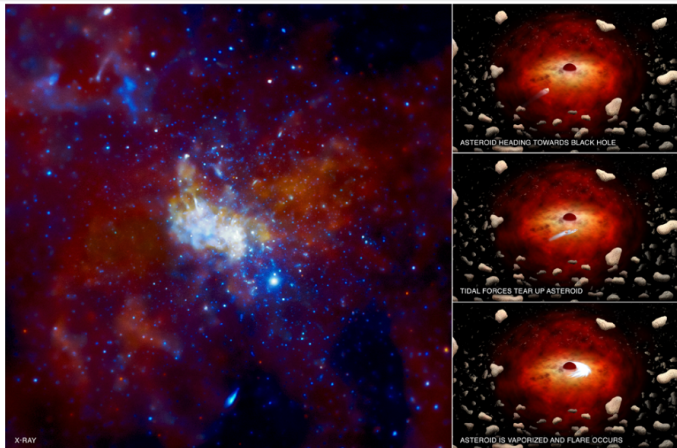
• Chandra Röntgendetektor (HRC = High Resolution Camera)



5. Raios X

5.2 Na astronomia

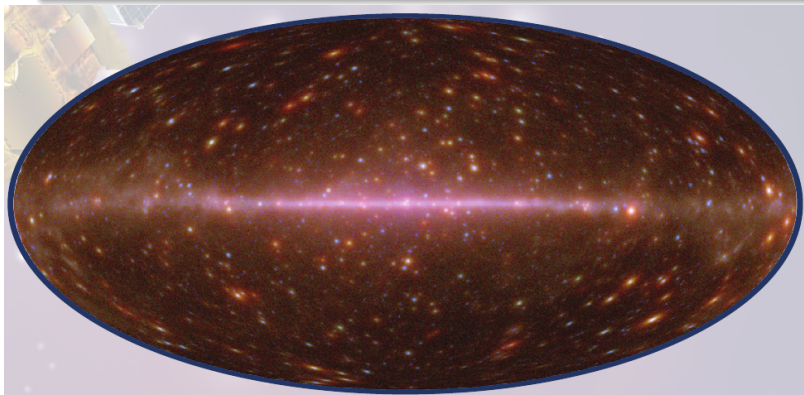
- Chandra detecta episódios de flashes de raios X em torno do centro da Via Láctea (constelação do Sagitário)



6. Raios gama

6.1 Na astronomia

- Previsão do céu observável (coordenadas galácticas)



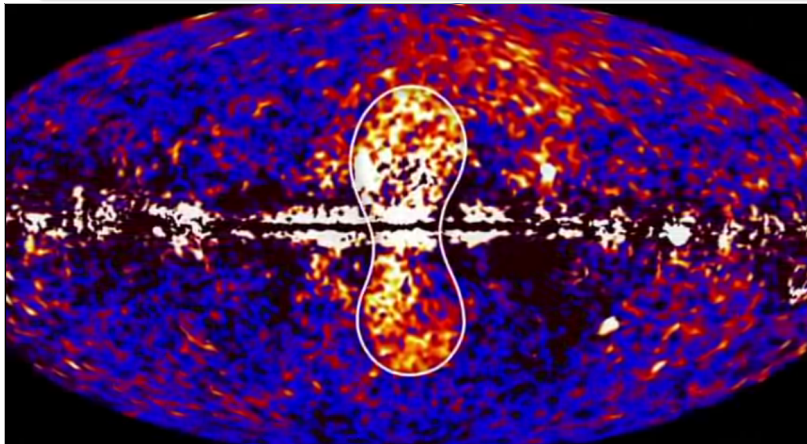
Simulated gamma-ray sky as seen with GLAST after one year of operations - Seth Digel, Stanford



6. Raios gama

6.1 Na astronomia

- Céu efectivamente observado (coordenadas galácticas)



Para lá do céu
visível:
das ondas rádio
aos raios gama e
cósmicos na
astrofísica

Índice

Resumo

Introdução

Ondas rádio

Radiação no
infravermelho

Radiação no
visível

Raios X

Raios gama
Na astronomia

Deteção

Raios cósmicos
no espaço: AMS

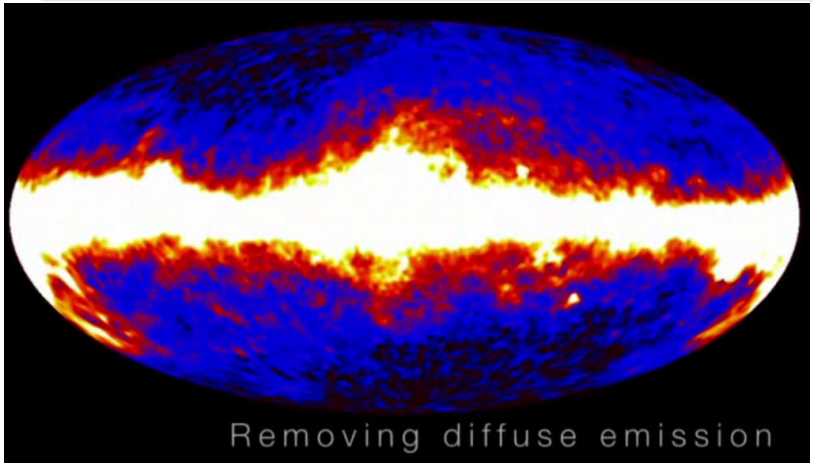
Raios cósmicos
no solo: Auger

Raios cósmicos
no sub-solo: LUX

6. Raios gama

6.1 Na astronomia

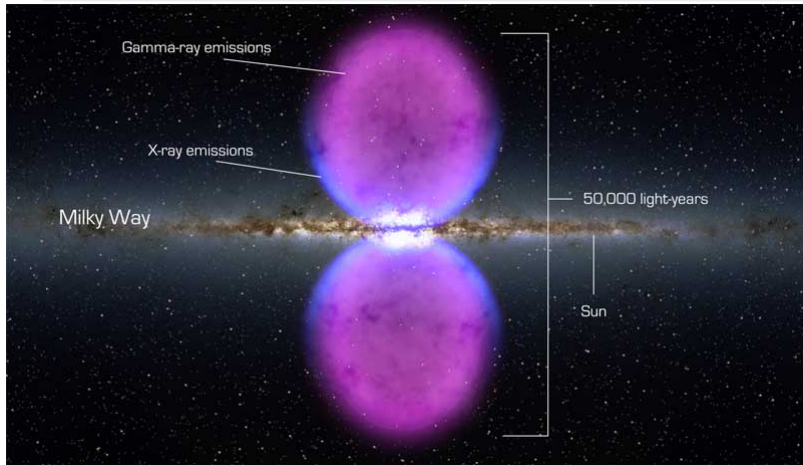
- Céu efectivamente observado (antes de correcção de efeitos de dispersão ocorrentes sobretudo no plano da nossa galáxia)



6. Raios gama

6.1 Na astronomia

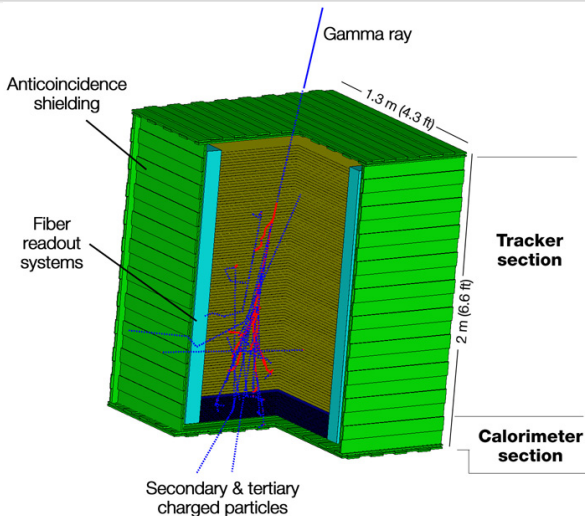
- Raios gama e raios X: após todas as correcções



6. Raios gama

6.2 Detecção na astronomia

- Esquema do detector GLAST (gamma ray large area space telescope)

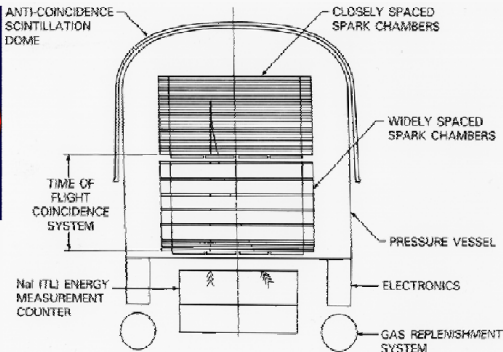
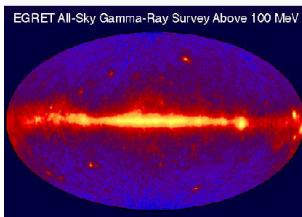


6. Raios gama

6.2 Detecção na astronomia

- Menor energia (EGRET) não parece revelar estrutura lobular em torno do centro da Via Láctea

- **EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope):**
Messung mit Richtungsinformation ($E_\gamma > 10 \text{ MeV} \rightarrow \text{EM shower}$)

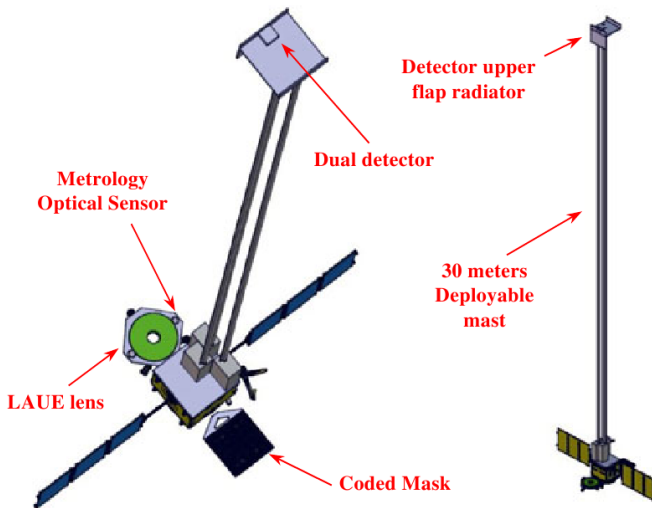


Mehr Info:
Ref. 14

6. Raios gama

6.2 Detecção na astronomia

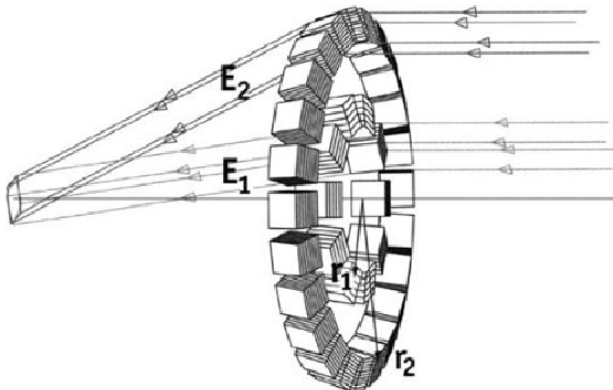
- Proposta de detector DUAL a ser investigada por cientistas do LIP (Doutor Rui Silva: ruil.silva@coimbra.lip.pt)



6. Raios gama

6.2 Detecção na astronomia

- Proposta de detector DUAL: lentes Laue



Para lá do céu
visível:
das ondas rádio
aos raios gama e
cósmicos na
astrofísica

Índice

Resumo

Introdução

Ondas rádio

Radiação no
infravermelho

Radiação no
visível

Raios X

Raios gama
Na astronomia

Detecção

Raios cósmicos
no espaço: AMS

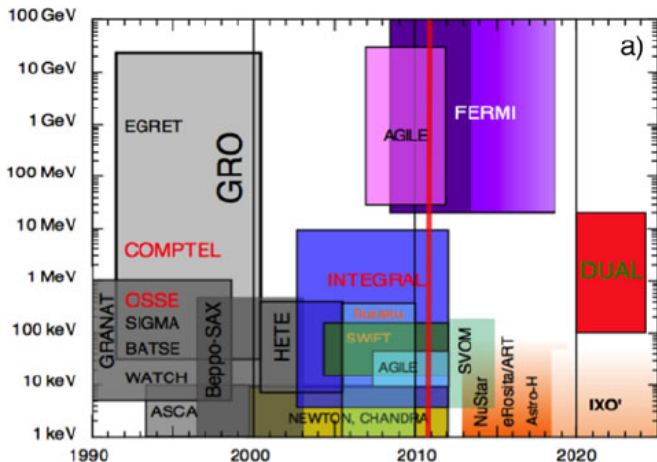
Raios cósmicos
no solo: Auger

Raios cósmicos
no sub-solo: LUX

6. Raios gama

6.2 Detecção na astronomia

- Proposta de detector DUAL: cobertura de energia (com medida de polarização)

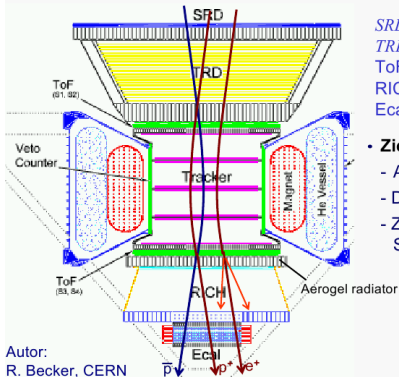


7. Raios cósmicos no espaço: AMS

Como se medem?

- Directamente, através de detectores de partículas no espaço: balões, foguetões, ou na International Space Station (ISS), com colaboração de cientistas Portugueses (Prof. Fernando Barão: barao@lip.pt).

• **Space-borne Spektrometer: AMS** (Alpha Magnetic Spectrometer)



SRD : synchrotron radiation detector
TRD : transition radiation detector
ToF : time of flight (Geschwindigkeit)
RICH : ring-imaging Čerenkov
Ecal : EM calorimeter

• **Ziel: Nachweis von**

- Antimaterie
- Dunkle Materie
- Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

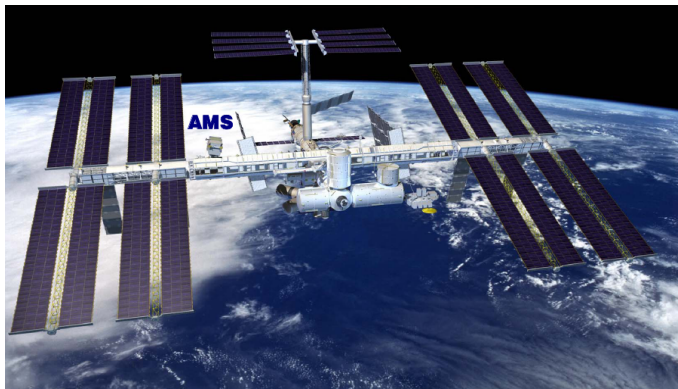
Autor:
R. Becker, CERN

Mehr Info:
Ref. 12

7. Raios cósmicos no espaço: AMS

Como se medem?

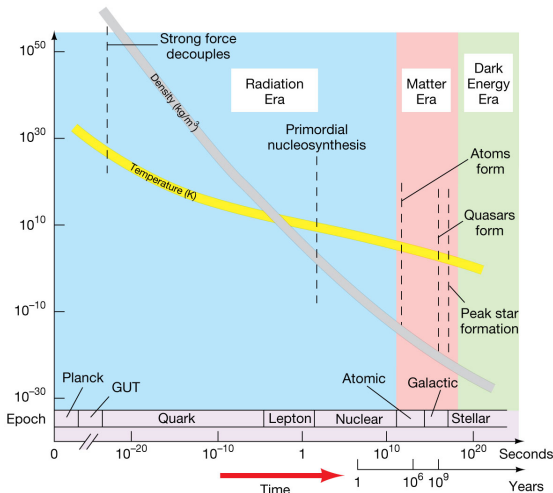
- Directamente, através de detectores de partículas no espaço: balões, foguetões, ou na International Space Station (ISS).



7. Raios cósmicos no espaço: AMS

Porquê procurar antipartículas?

- O arrefecimento do universo na era radiativa cria igual número de partículas e antipartículas.



© 2011 Pearson Education, Inc.

8. Raios cósmicos no solo: Auger

Como se medem?

- Indirectamente, através de detectores de partículas na Terra (exemplo: observatório Auger na Argentina).
- A atmosfera funciona como calorímetro.

• **Sehr hohe Energien** (≥ 1 TeV): Physikalische Prozesse in die Atmosphäre, wie bei dichten Targets

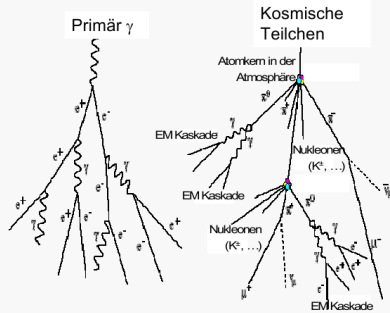
• **Nachweis in der Atmosphäre:**

- Čerenkov-Strahlung
- *Extensive air-showers* (Matrix aus Detektoren)
- Fluoreszenz von N_2

• **Nachweis mit Detektoren im Weltraum** (wie im Labor):

- EM- oder Hadronen-Kaskaden (Kalorimetrie)
- Spektrometer (Magnetfeld + Tracker + Flugzeitmessungen)
- Čerenkov-basierte Detektoren
- Übergangsstrahlung

Mehr Info: Ref. 9



8. Raios cósmicos no solo: Auger

Como se medem?

- Indirectamente, através de detectores de partículas na Terra (exemplo: observatório Auger na Argentina).

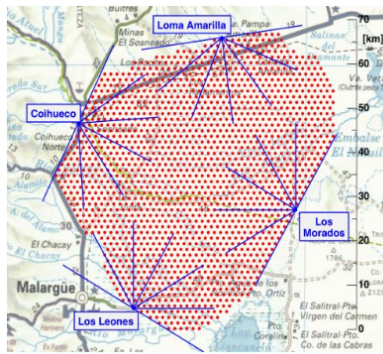
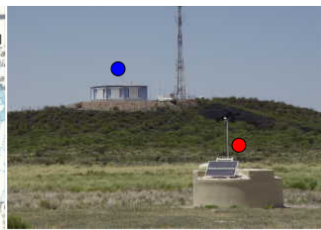


Figure 4: The Auger array of detectors

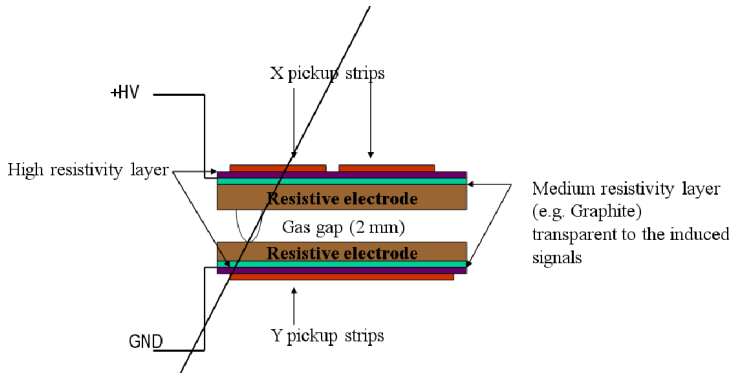


- set of fluorescence telescopes
- Cherenkov detector

8. Raios cósmicos no solo: Auger

Desafios para a próxima geração de telescópio(s) Auger:

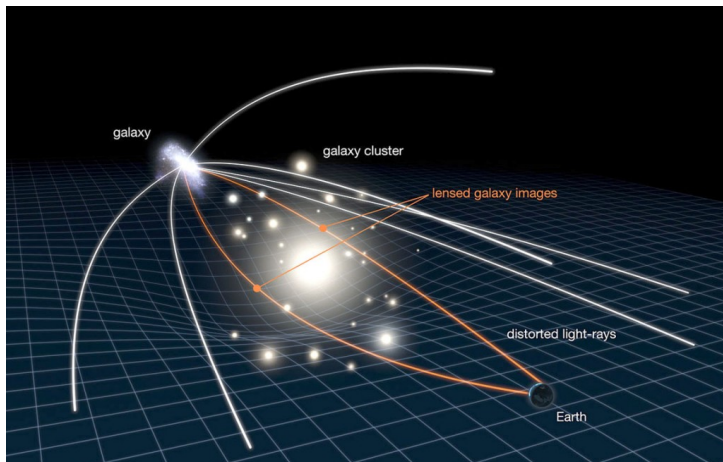
- Astrofísica: número de muões observado diverge das expectativas (Prof. Mário Pimenta: pimenta@lip.pt)
- Detectores de superfície (SD): baseiam-se na detecção de radiação Cerenkov produzida na água. Próxima geração incluirá uma câmara de placas resistivas por SD para contar muões (Prof. Paulo Fonte: fonte@coimbra.lip.pt)



9. Raios cósmicos no sub-solo: LUX (large underground xenon experiment)

Motivação: evidências da existência de matéria não luminosa (negra)

- Lentes gravitacionais



Para lá do céu visível:
das ondas rádio
aos raios gama e
cósmicos na
astrofísica

Índice

Resumo

Introdução

Ondas rádio

Radiação no
infravermelho

Radiação no
visível

Raios X

Raios gama

Raios cósmicos
no espaço: AMS

Raios cósmicos
no solo: Auger

Raios cósmicos
no sub-solo: LUX

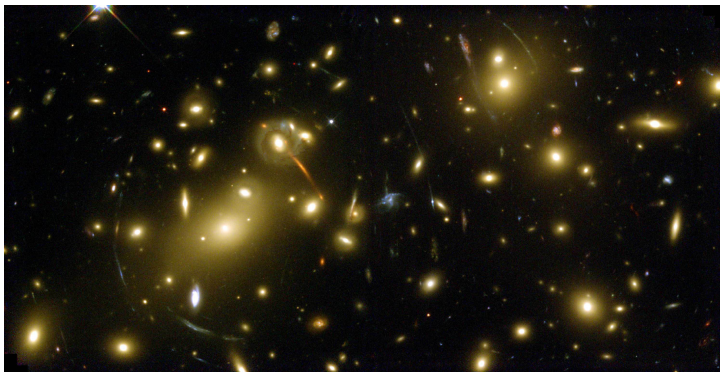
Motivação

Detector e resultados

9. Raios cósmicos no sub-solo: LUX

Motivação: evidências da existência de matéria negra

- Lentes gravitacionais: aglomerado de galáxias Abell



Para lá do céu visível:
das ondas rádio
aos raios gama e
cósmicos na
astrofísica

Índice

Resumo

Introdução

Ondas rádio

Radiação no
infravermelho

Radiação no
visível

Raios X

Raios gama

Raios cósmicos
no espaço: AMS

Raios cósmicos
no solo: Auger

Raios cósmicos
no sub-solo: LUX

Motivação

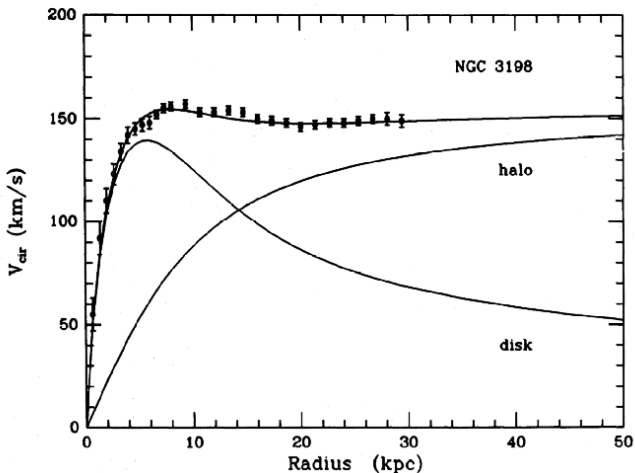
Detector e resultados

9. Raios cósmicos no sub-solo: LUX

Motivação: evidências da existência de matéria negra

- Velocidade de rotação das galáxias

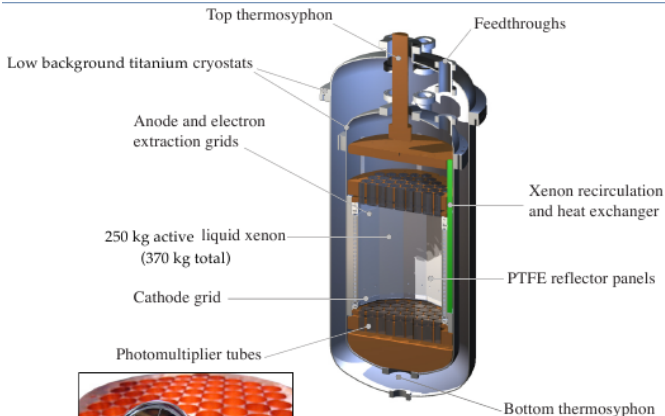
DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN NGC 3198



9. Raios cósmicos no sub-solo: LUX

Detector e resultados

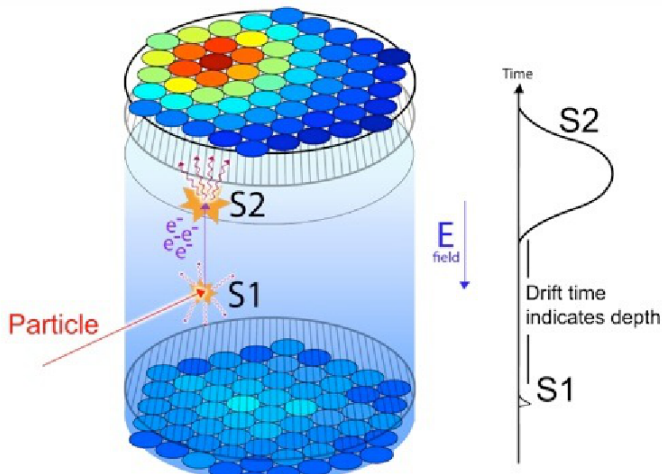
- Matéria activa do detector: xénon líquido e gasoso.
- Cientistas Portugueses muito activos na experiência: Prof. Isabel Lopes: isabel@coimbra.lip.pt.



9. Raios cósmicos no sub-solo: LUX

Detector e resultados

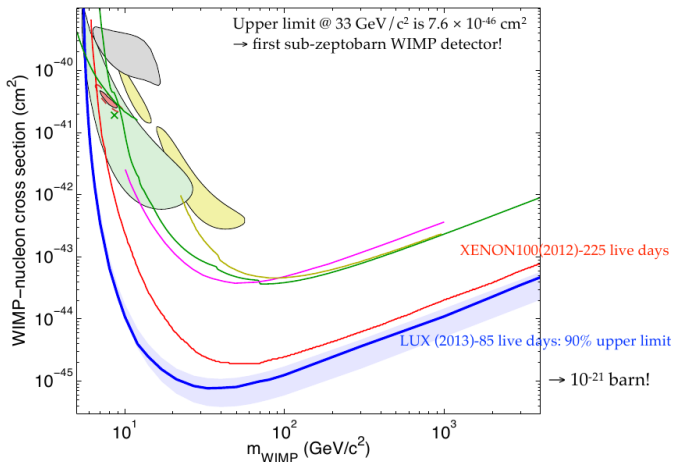
- Matéria activa do detector: xénon líquido e gasoso.
- Cientistas Portugueses muito activos na experiência: Prof. Isabel Lopes: isabel@coimbra.lip.pt.



9. Raios cósmicos no sub-solo: LUX

Detector e resultados

- Resultados: gráfico de exclusão



Agradecimentos

Para lá do céu
visível:
das ondas rádio
aos raios gama e
cósmicos na
astrofísica

- À audiência pela atenção.
- À comissão organizadora do evento, em particular Guilherme Banca Geraldo e colegas, alunos deste Departamento de Física.
- Estes e outros temas afins são desenvolvidos no mestrado de especialização em *Astrofísica e Instrumentação para o Espaço*.
Mais informação: Prof. José Pinto da Cunha (jpinto@uc.pt)

Índice

Resumo

Introdução

Ondas rádio

Radiação no
infravermelho

Radiação no
visível

Raios X

Raios gama

Raios cósmicos
no espaço: AMS

Raios cósmicos
no solo: Auger

Raios cósmicos
no sub-solo: LUX

Motivação

Detector e resultados