

Vertiefung in die Extraterrestrische Physik

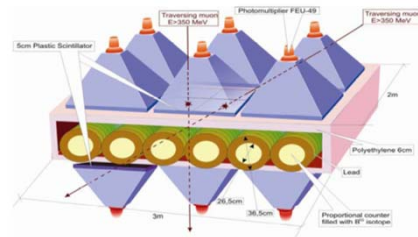
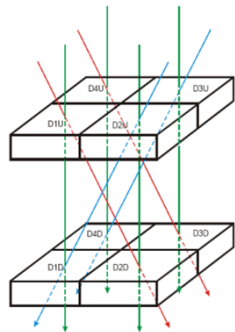
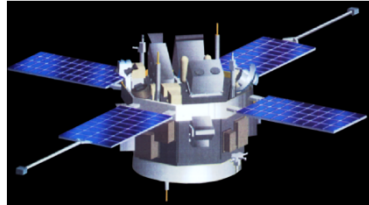
Neutronenmonitore

Bernd Heber

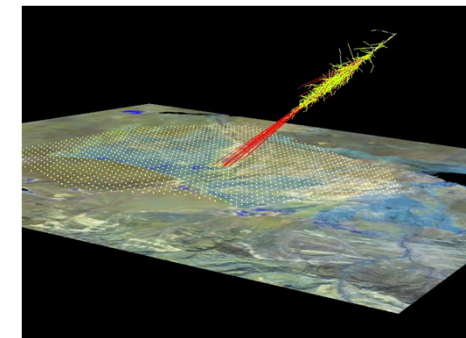
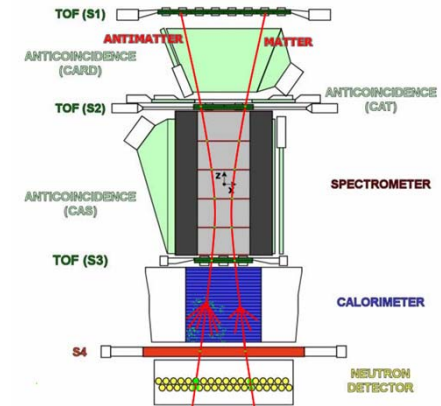
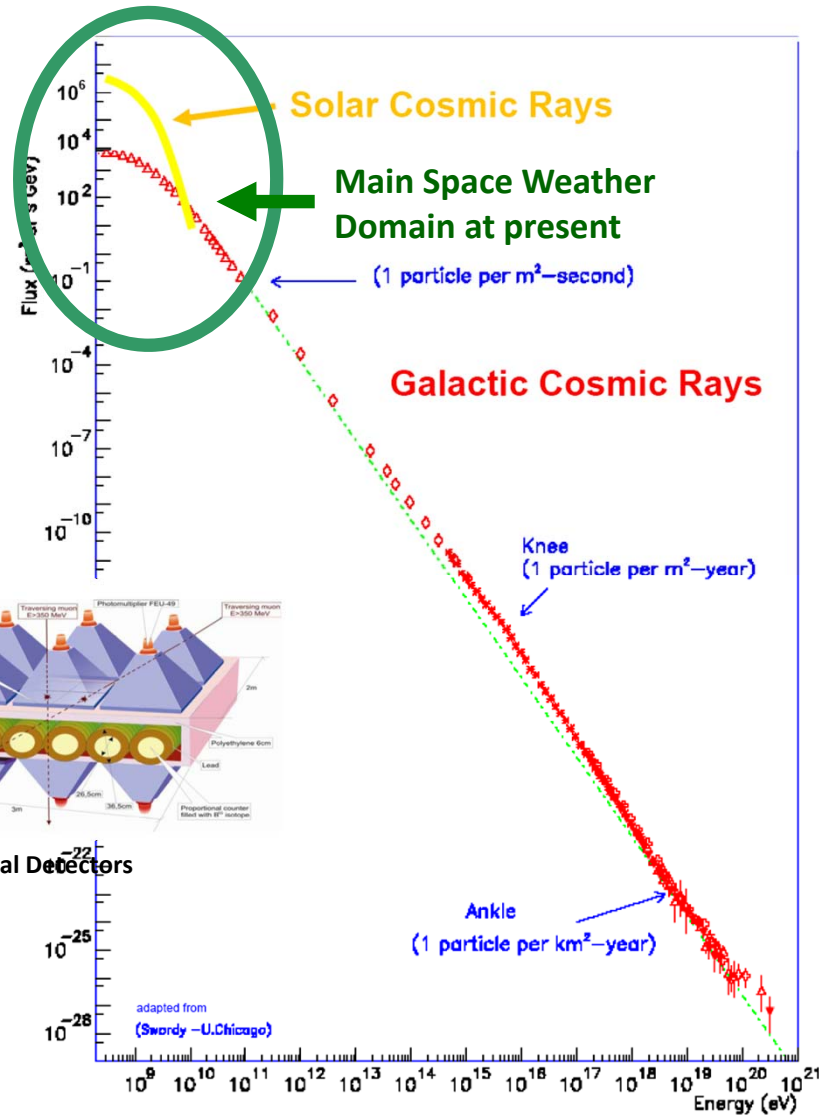
15 December, 2010



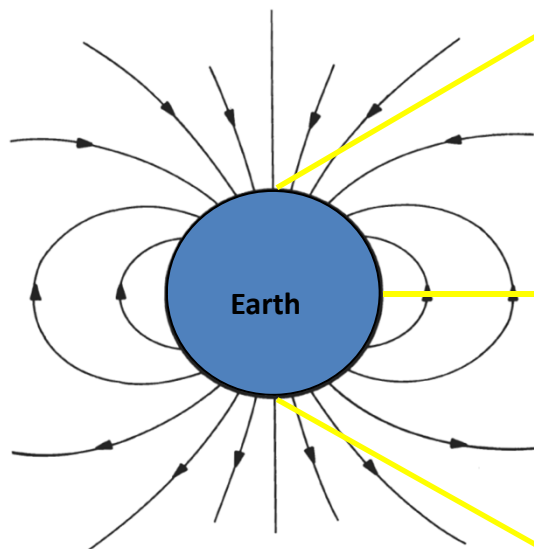
Galactic and Solar Cosmic Rays



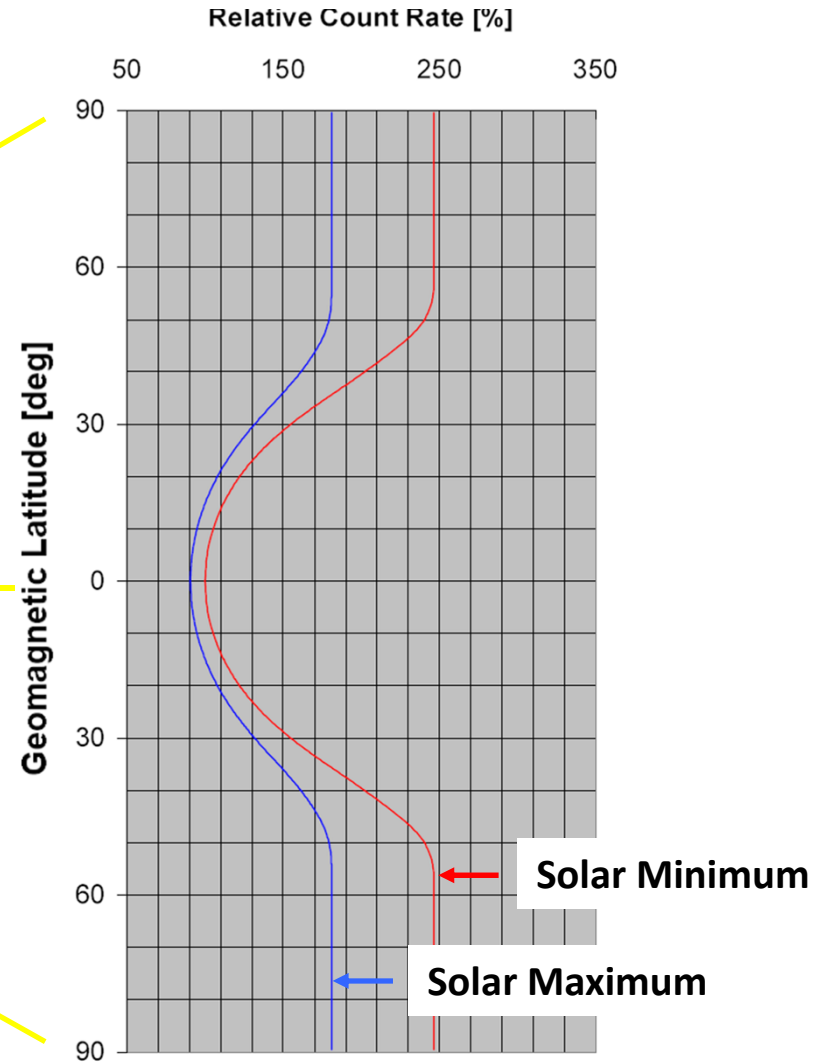
Special Detectors



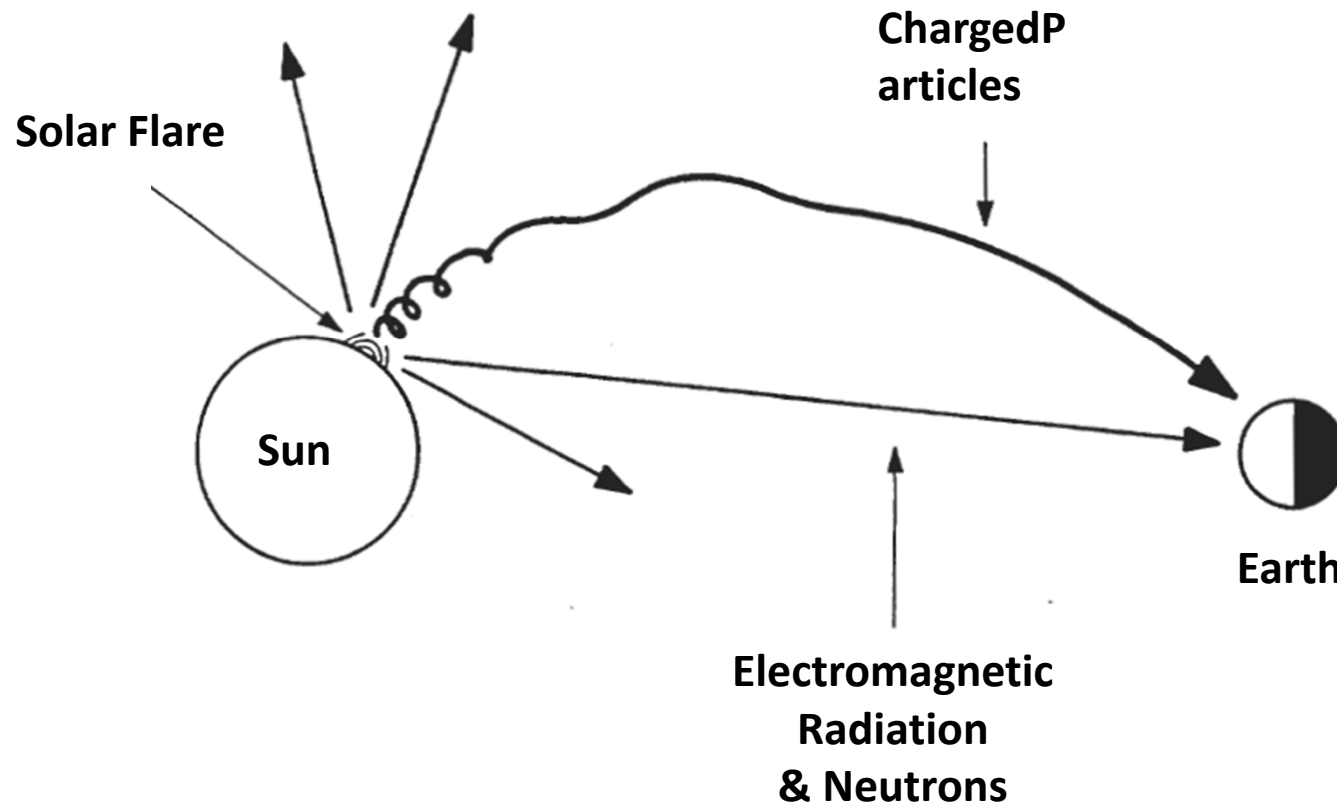
Geomagnetic Shielding of Galactic Cosmic Rays



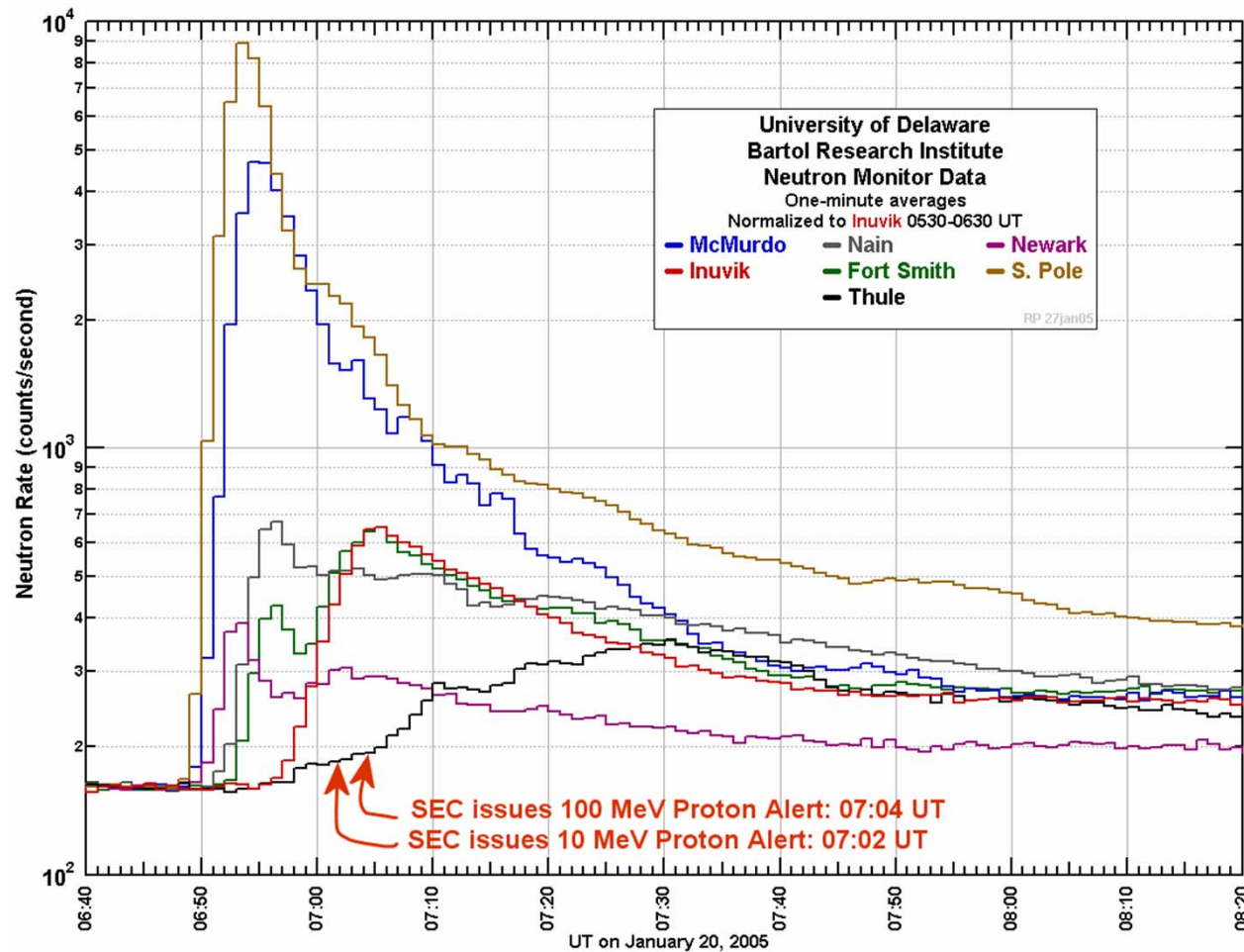
Latitude Dependence of
Cosmic Ray Intensity
(sea level)



Solar Cosmic Rays

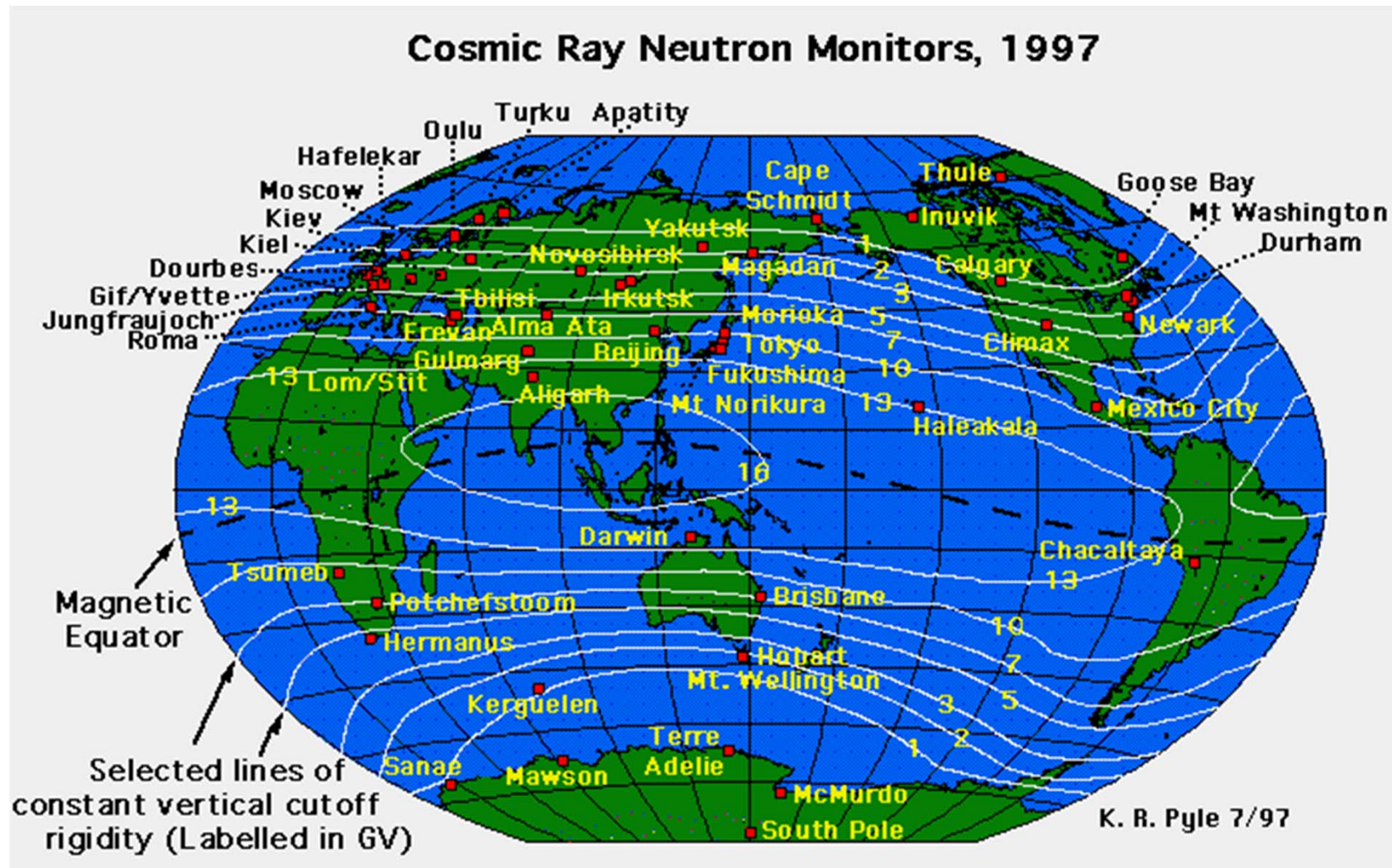


Solar Energetic Particle Event Alert



- In the January 20, 2005 GLE, the earliest neutron monitor onset preceded the earliest Proton Alert issued by the Space Environment Center **by 14 minutes**
- Neutron Monitors can provide the earliest alert of a Solar Energetic Particle Event

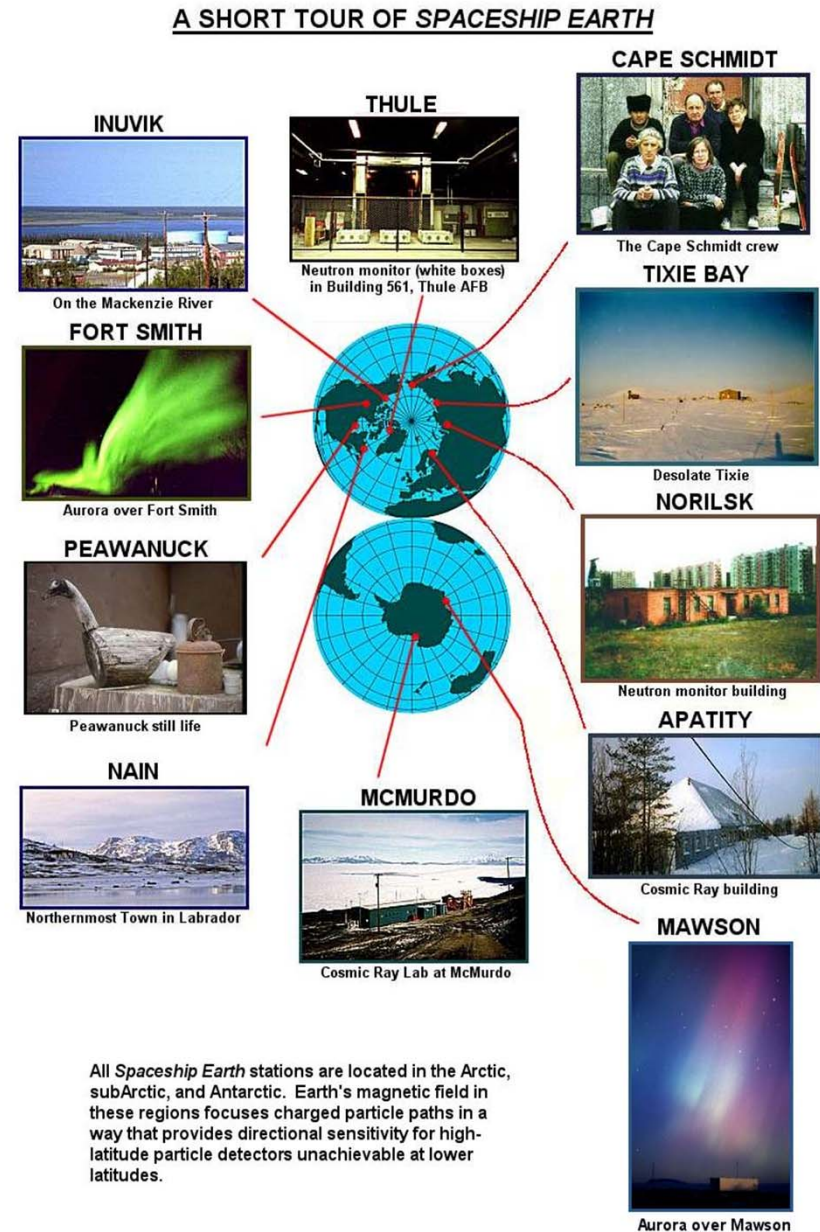
Worldwide Neutron Monitor Network



Spaceship Earth

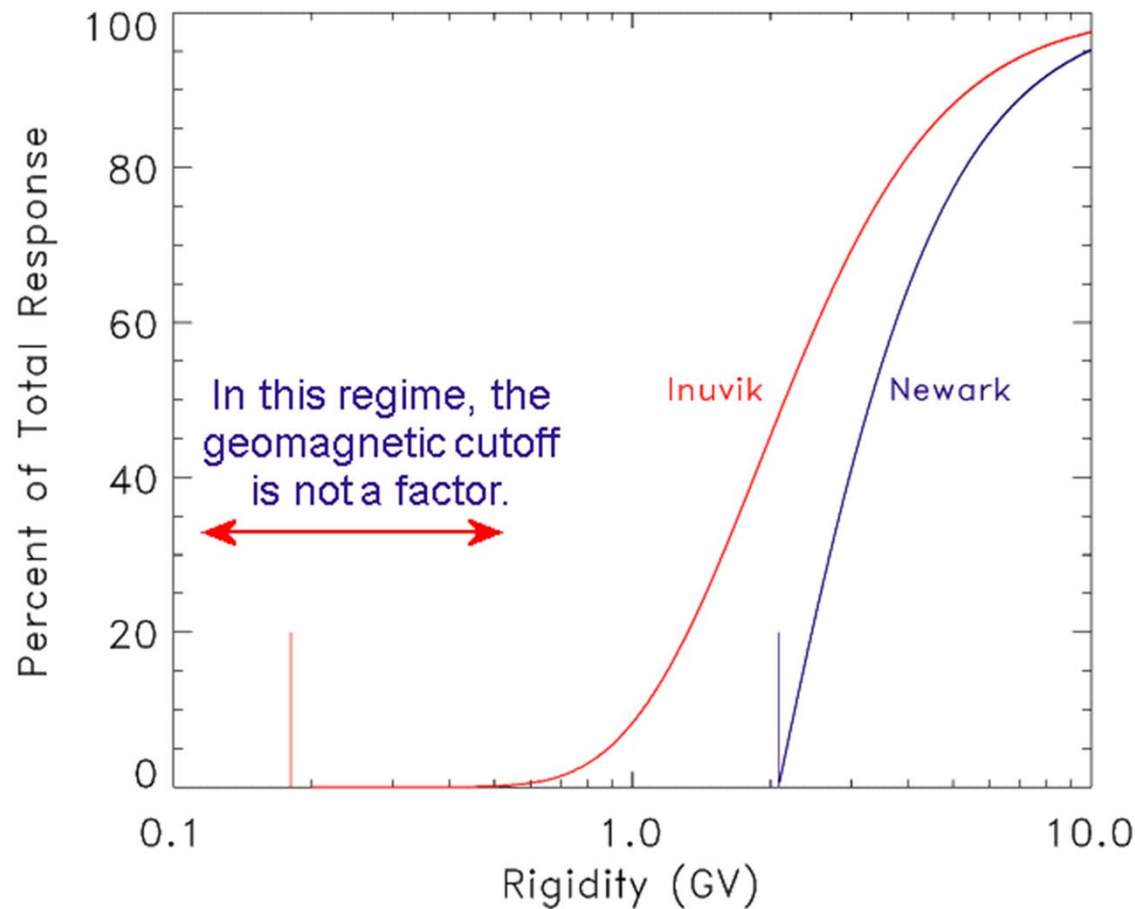
Spaceship Earth is a network of neutron monitors strategically deployed to provide precise, real-time, 3-dimensional measurements of the cosmic ray angular distribution:

- 11 Neutron Monitors on 4 continents
- Multi-national participation:
 - Bartol Research Institute, University of Delaware (U.S.A.)
 - IZMIRAN (Russia)
 - Polar Geophysical Inst. (Russia)
 - Inst. Solar-Terrestrial Physics (Russia)
 - Inst. Cosmophysical Research and Aeronomy (Russia)
 - Inst. Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation (Russia)
 - Australian Antarctic Division
 - Aurora College (Canada)



Why are all the stations at high latitude?

Reason 1: Uniform energy response



- Plot shows neutron monitor response to a simulated (rigidity)⁵ solar particle spectrum
- Below a geomagnetic cutoff of about 0.6 GV, atmospheric absorption determines the cutoff – all stations have a uniform energy response in this regime

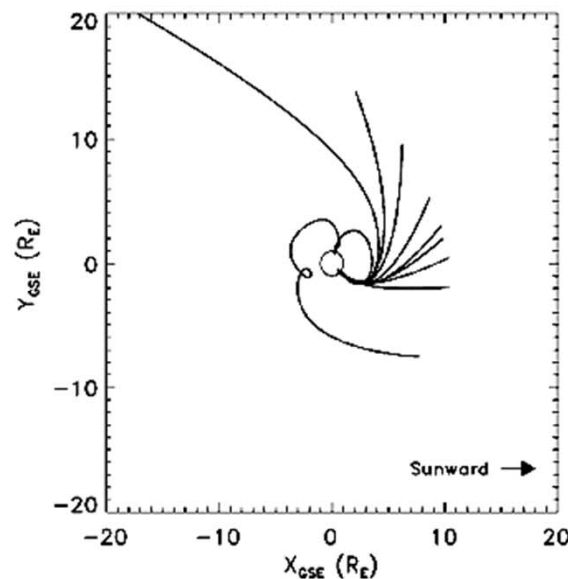
Why are all the stations at high latitude?

Reason 2: Excellent directional sensitivity

Because of the combined effects of Earth's magnetic field and atmosphere, high latitude sites have superior directional sensitivity, relative to low latitude sites. The cosmic rays are "in focus."

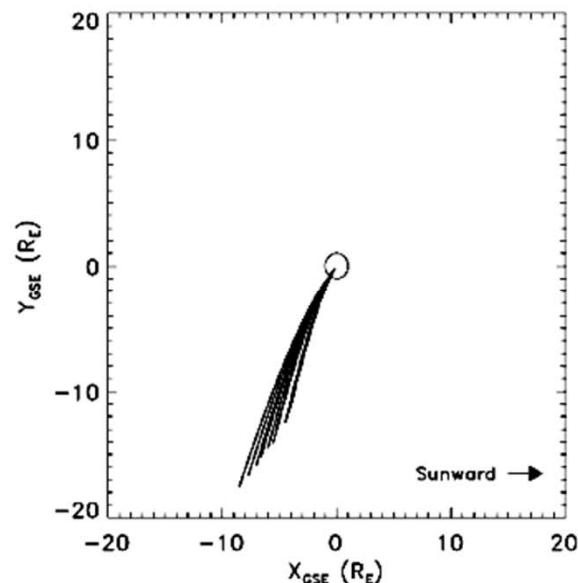
Trajectories are shown for vertically incident primaries corresponding to the 10-, 20-, ... 90-percentile rigidities of a typical solar spectrum

Incoming Protons at Newark



Cosmic rays arriving at low and mid latitude stations (e.g., Newark, Delaware, above) arrive from widely dispersed directions. When the neutron monitor observes something, it can be difficult to determine the source direction.

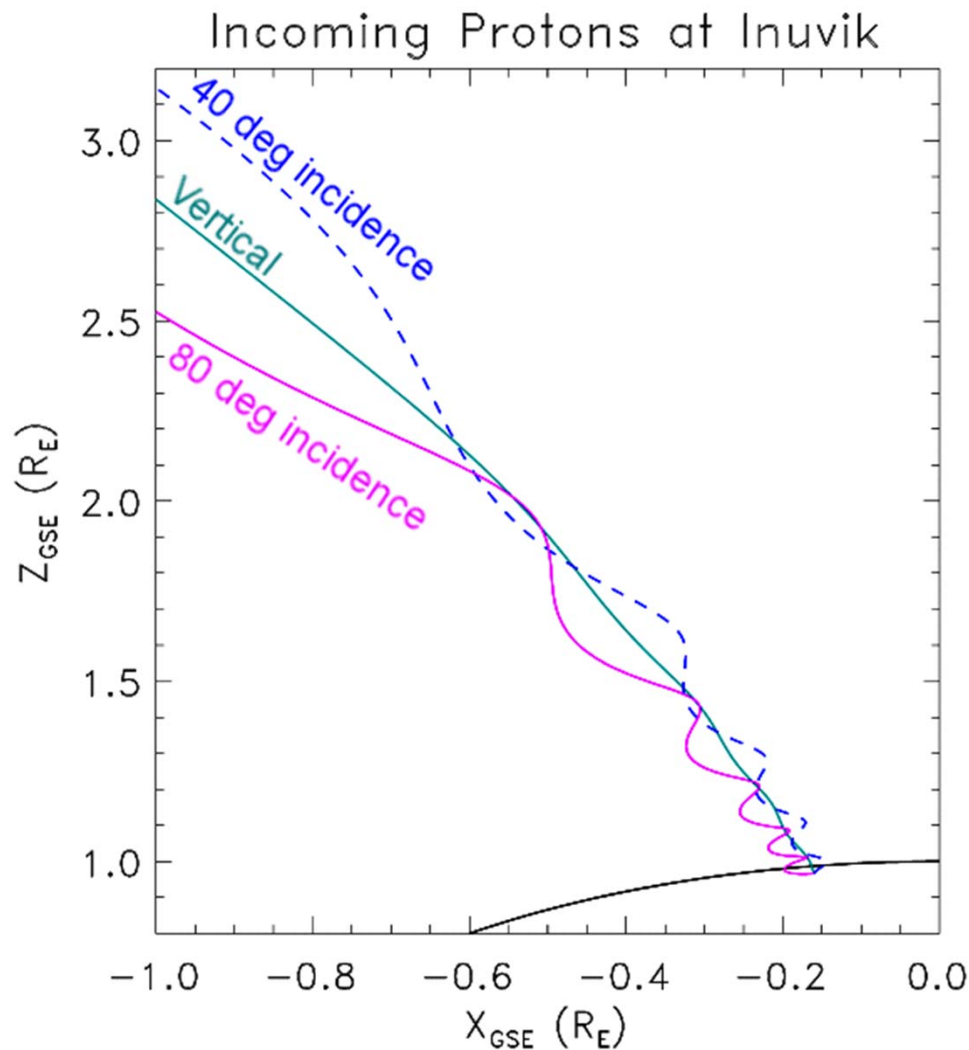
Incoming Protons at Inuvik



Cosmic rays at high latitude sites (e.g., Inuvik, Canada, above) arrive from a narrow range of directions. The source direction is clear.

Why are all the stations at high latitude?

Reason 3: Focusing of obliquely incident primaries

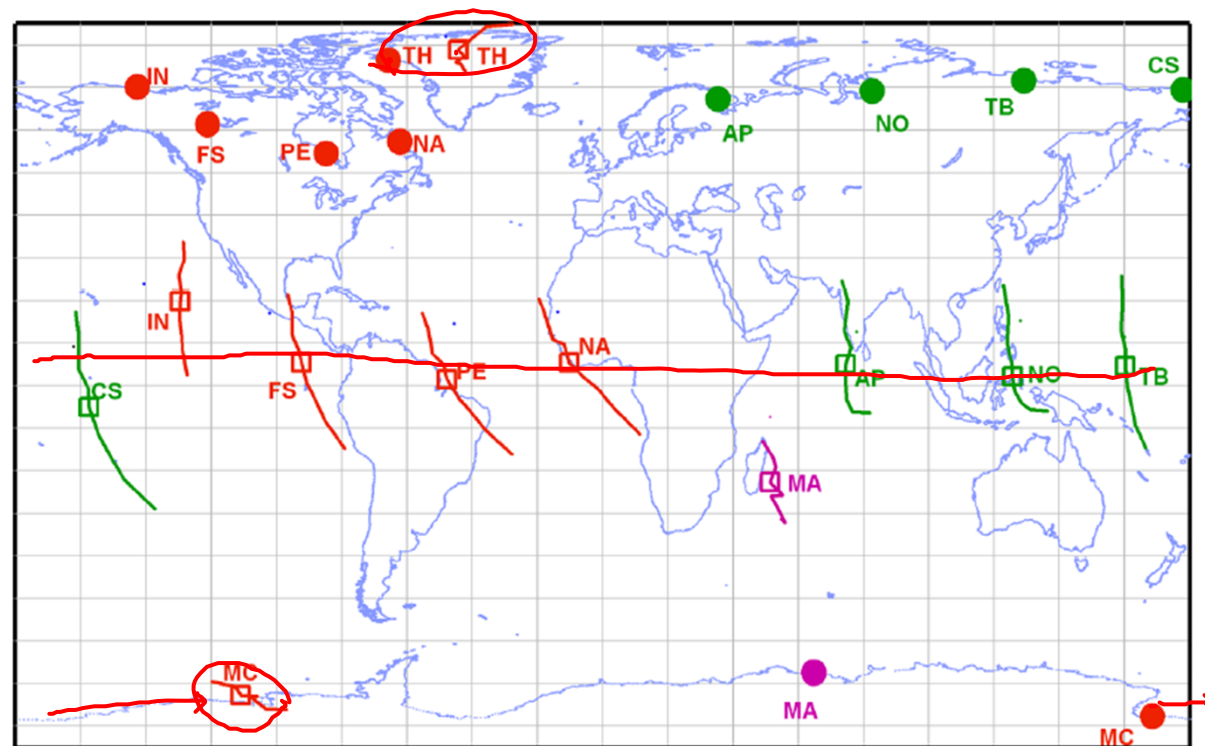


Because of adiabatic focusing in the converging polar magnetic field, primaries with widely divergent angles of incidence have similar asymptotic directions (most easily seen by following the time-reversed trajectory)

SPACESHIP EARTH VIEWING DIRECTIONS

- Optimized for solar cosmic rays
- 9 stations view equatorial plane at 40-degree intervals
- Thule and McMurdo provide crucial 3-dimensional perspective

Circles denote station geographical locations. Average viewing directions (squares) and range (lines) are separated from station geographical locations because particles are deflected by Earth's magnetic field.



STATION CODES

IN: Inuvik, Canada

FS: Fort Smith, Canada

PE: Peawanuck, Canada

NA: Nain, Canada

MA: Mawson, Antarctica

AP: Apatity, Russia

NO: Norilsk, Russia

TB: Tixie Bay, Russia

CS: Cape Schmidt, Russia

TH: Thule, Greenland

MC: McMurdo, Antarctica

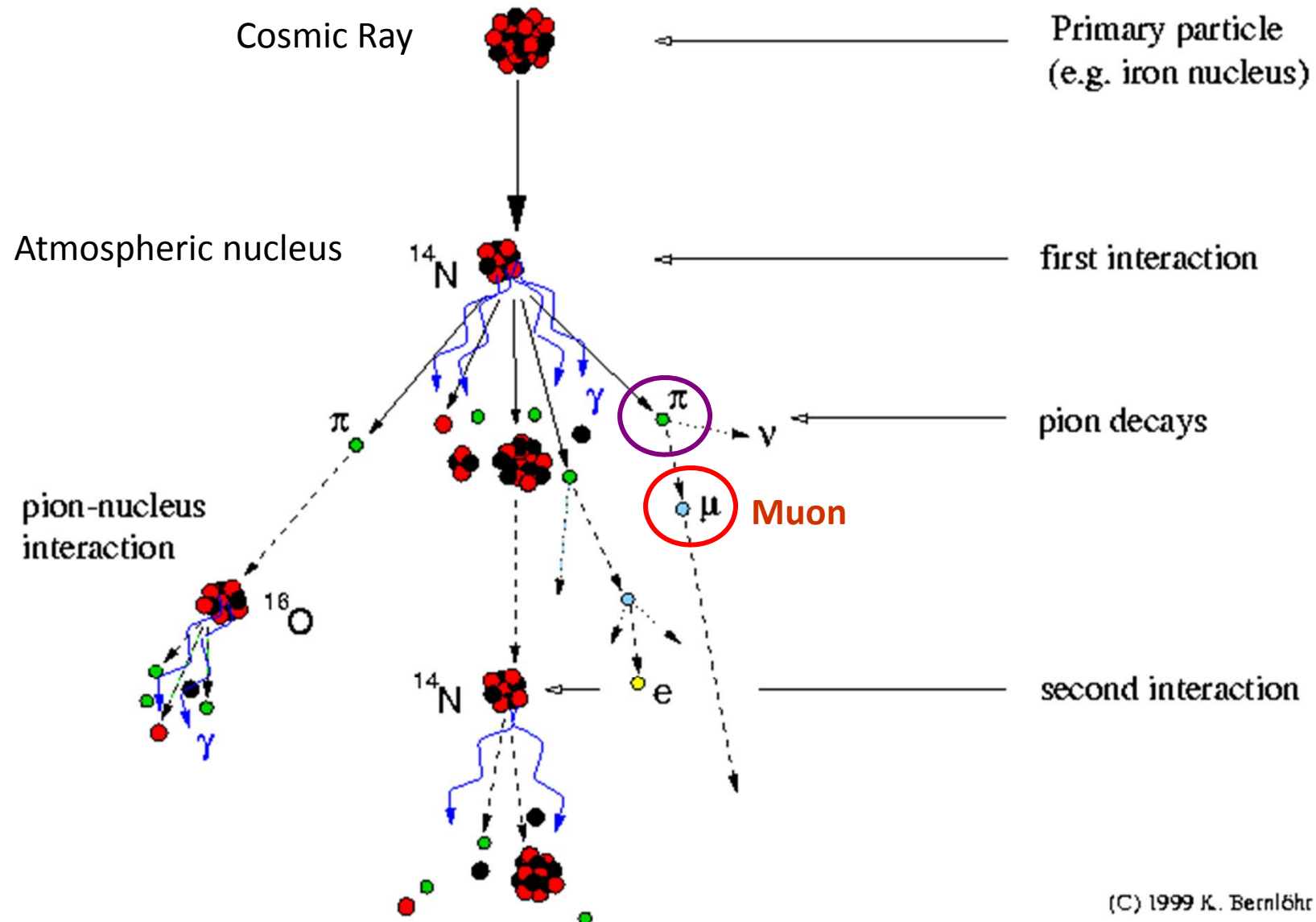
● Bartol Station (NSF Supported)

● Russian Station

● Australian Station

What happens when a cosmic rays strikes the earth ?

Development of cosmic-ray air showers



“Pi Mesons” or “Pions” (Meson: from the Greek “meso”, meaning “middle”)

IF the nucleus of an atom contains many charged protons they should repel each other due to their positive charges. **What is the nature of the force that holds the nucleus together ?**

Mesons exchange between nucleons in the nucleus produces a strong force that overcome Coulomb repulsion, but its range is only about 10^{-15} m.

Pi meson (π) or simply *pion* is an example of a Meson (bound quark-antiquark state).

Pion comes in three varieties corresponding to three charged states: π^+ , π^- and π^0

Pions are not stable particles, but decay:

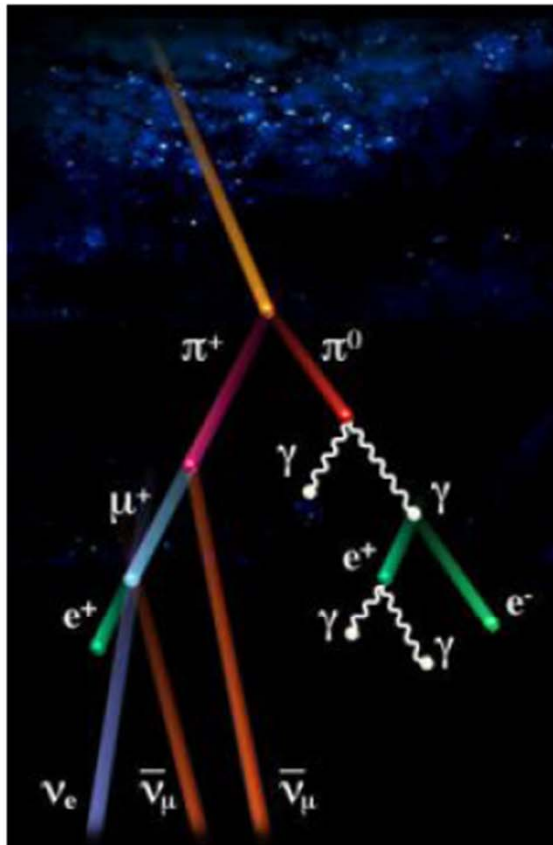
$$M_\pi = 139.6 \text{ MeV}/c^2$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Muons decay, too:

$$\mu^+/- \rightarrow e^+/- + \nu + \bar{\nu} \quad \text{mass} = 207m_e = 106 \text{ MeV}/c^2$$

Atmosphärische Neutrinos



- Teilchen der Kosmischen Strahlung wechselwirken mit der Atmosphäre \Rightarrow Teilchenschauer $\Rightarrow \pi^\pm$ und K^\pm
 $\Rightarrow \pi^\pm, K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu^*$ und $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e^* + \nu_\mu^*$

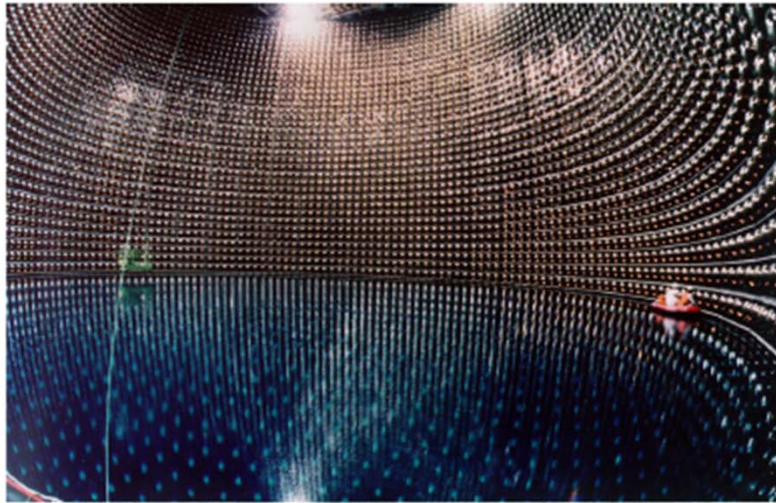
- $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$ -Energiespektren aus Monte-Carlo-Simulationen

- Messung: $\frac{\mu\text{-artig}}{e\text{-artig}} = \frac{\Phi(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{\Phi(\nu_e + \bar{\nu}_e)} \geq 2$

- Vergleich: $R = \frac{(\mu/e)_{\text{Messung}}}{(\mu/e)_{MC}}$

\Rightarrow Im Standardmodell $R \stackrel{!}{=} 1$

Messung der Atmosphärischen Neutrinos



Kamiokande und Superkamiokande

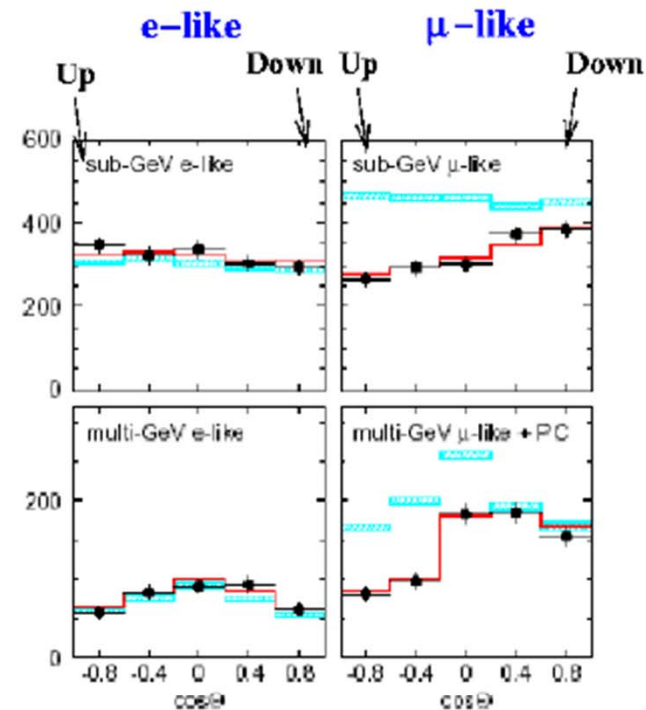
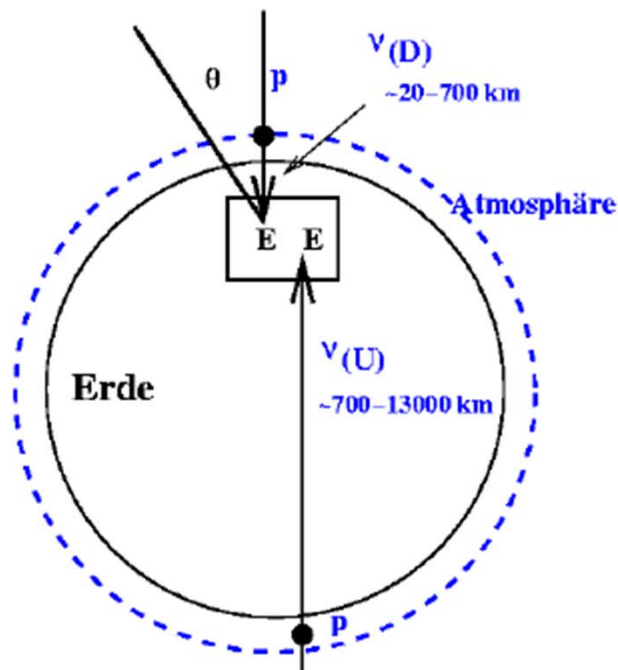
- Detektoren in der Kamioka Mine in 1000 m Tiefe
- mit reinem Wasser (H_2O) gefüllter Zylinder

- $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightarrow e^- + e^+$ und $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu \rightarrow \mu^- + \mu^+$
- Elastische ν_x -Streuung (ES):
 $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$, $x = e, \mu, \tau$
- Energieschwelle $E_s = 7.5/5 \text{ MeV}$

Experiment	$E_\nu \text{ (GeV)}$	$R = \frac{(\mu/e)_{\text{Mess.}}}{(\mu/e)_{\text{MC}}}$
K	≤ 1.33	0.60 ± 0.08
	> 1.33	0.58 ± 0.11
SK	≤ 1.33	0.65 ± 0.05
	> 1.33	0.66 ± 0.08
Soudan 2		0.68 ± 0.12

- $R < 1 \Rightarrow$ Atmosphärische Neutrino-Anomalie

Neutrino Anomalie



- Untersuchung der Richtungsverteilung
- Für ν_e wie vorhergesagt
- ν_μ : Fluss aufwärts bewegender Neutrinos stärker unterdrückt als der der abwärtigen.

⇒ Neutrino-Anomalie beruht auf ν_μ -Abnahme

Vertiefung in die Extraterrestrische Physik

Detektoren

Bernd Heber

15 December, 2010



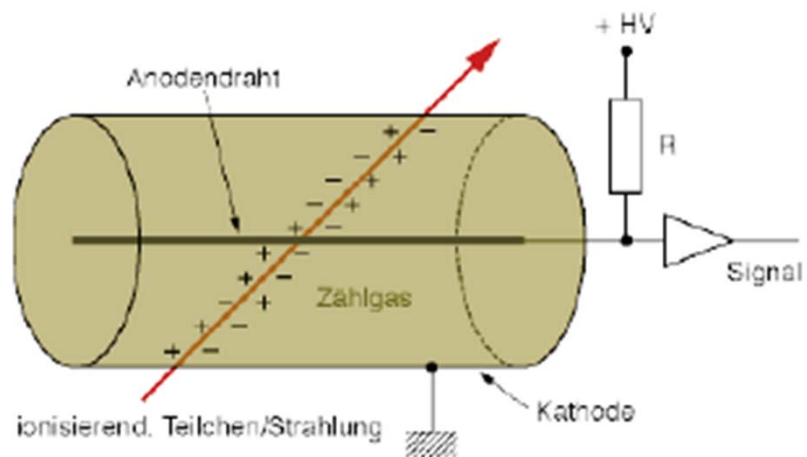
Detektoren

Gasdetektoren

Detektoren

Gasdetektoren

Funktionsprinzip



Kenngroßen

Kenngroßen

Ionisation in Gasen - allgemeines

Ionisation in Gasen - allgemeines

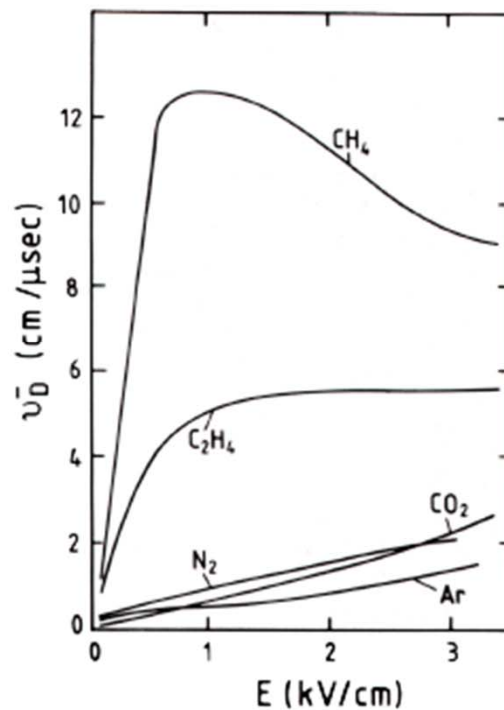
Diffusion von Elektronen und Ionen

Driftbewegung im elektrischen Feld

Driftbewegung im elektrischen Feld

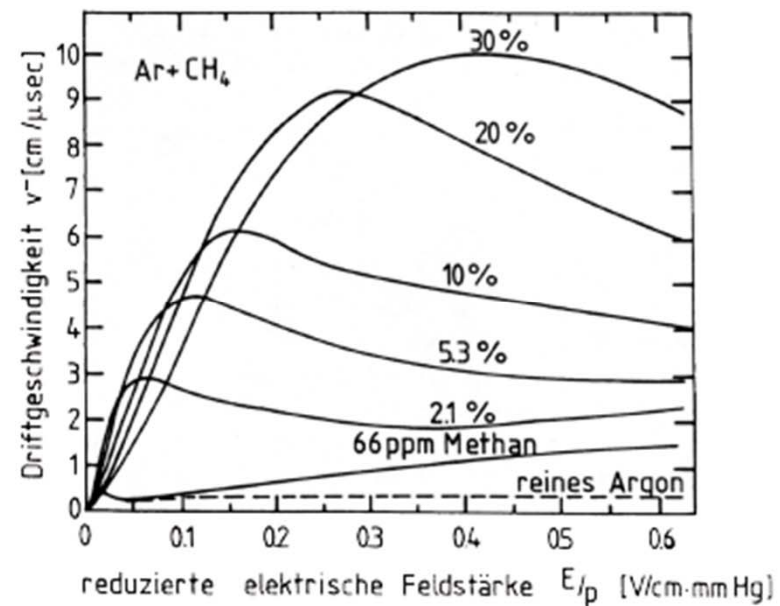
Driftgeschwindigkeiten

Driftgeschwindigkeit von Elektronen
in verschiedenen Gasen bei STP



Quelle: K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, B.G. Teubner, 1992

Driftgeschwindigkeit von Elektronen
in Argon-Methan-Gemischen



Quelle: C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993

Gasverstärkung

Gasverstärkung

Gasverstärkung
Townsend Koeffizient α

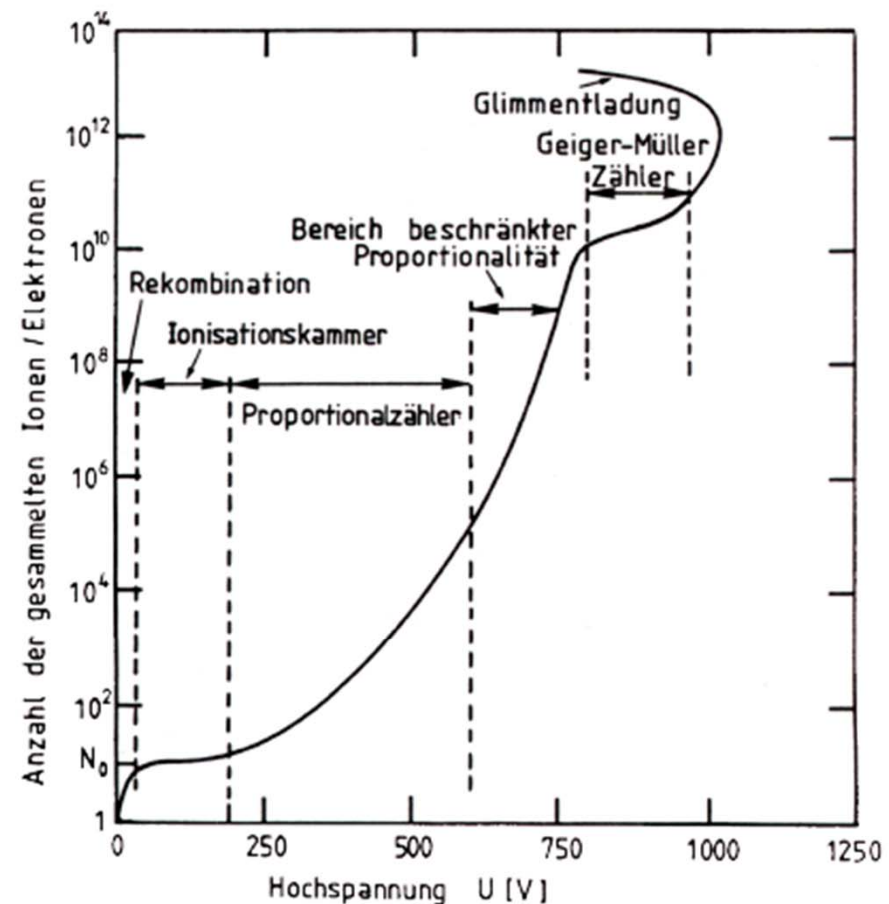
**Gasverstärkung
Townsend Koeffizient α**

Gasverstärkung, Berücksichtigung von Photonen Townsendkoeffizient γ

Gasverstärkung, Berücksichtigung von Photonen Townsendkoeffizient γ

Gas-Ionisationszähler

Neben der Detektorgeometrie und der Wahl des Zählgas bestimmt die angelegte Hochspannung wesentlich den Betriebsmodus eines Gasdetektors. Für eine gegebene Geometrie, z.B. ein zylindrisches Design mit zentralem Anodendraht, und ein bestimmtes Zählgas kann man in Abhängigkeit von der externen Hochspannung bestimmte Arbeitsbereiche angeben (siehe Abb. rechts: Zahl der e^- -Ion-Paare für Elektronen als primär ionisierende Teilchen).



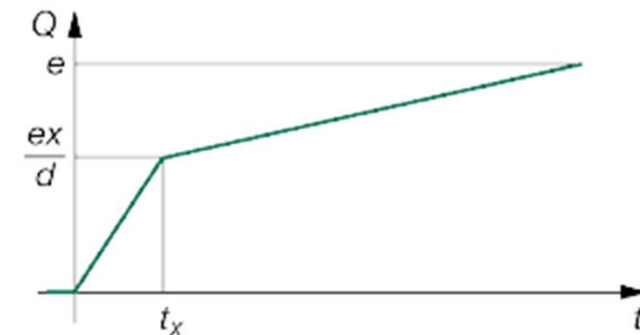
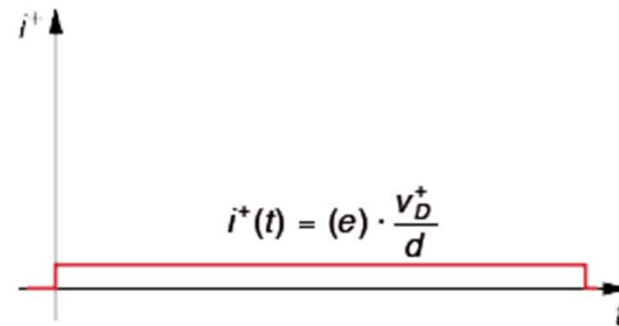
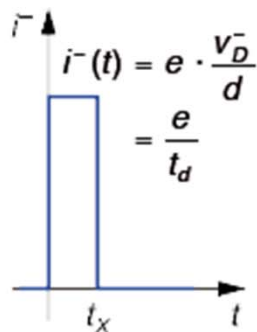
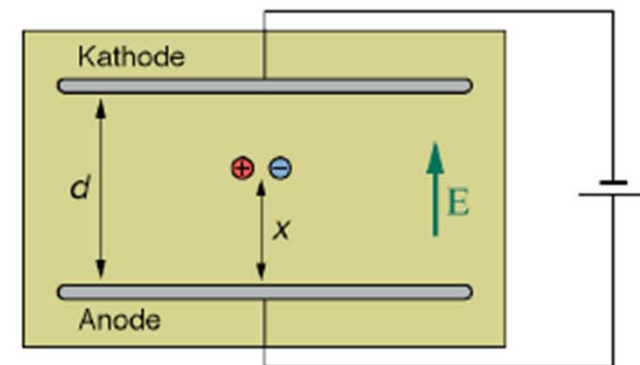
Quelle: C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993
(Original: W. Price, *Nuclear Radiation Detection*, McGraw-Hill, 1958)

Funktionsprinzip einer Ionisationskammer

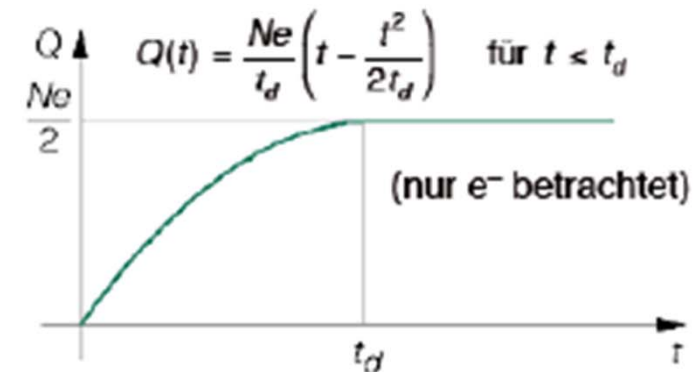
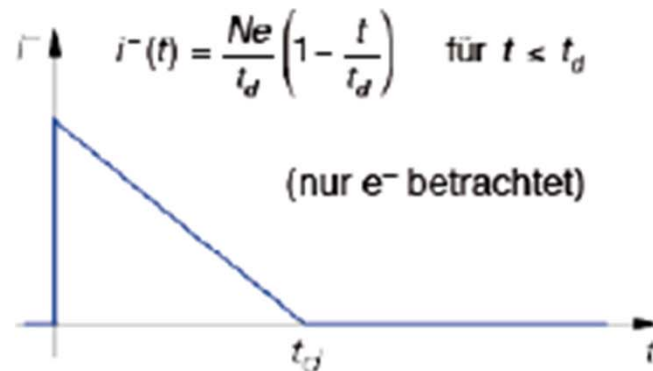
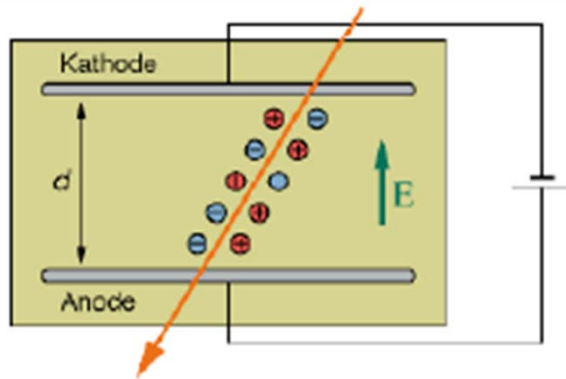
Eine ideale Ionisationskammer wird in dem Spannungsbereich betrieben, in welchem einerseits die erzeugte Ladung vollständig gesammelt wird, andererseits aber noch **keine Sekundärionisation** stattfindet (also **keine Gasverstärkung**).

Für elektr. Feldstärken von 500 V/cm und für typische Driftgeschwindigkeiten erhält man bei 10 cm Driftstrecke Sammelzeiten für e^- von 2 μ s und für Ionen von etwa 2 ms.

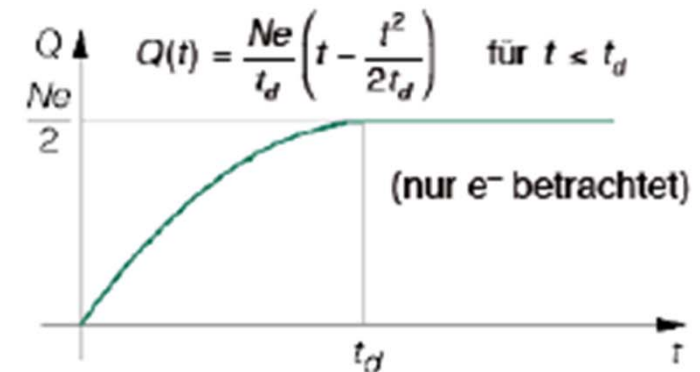
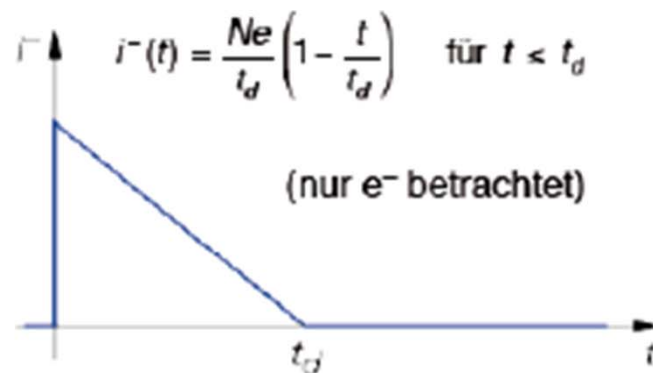
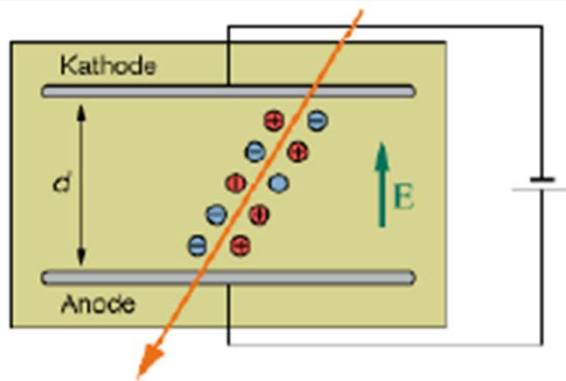
Bilderfolge:
Signal für ein e^- -Ion-Paar in einer planaren Ionisationskammer



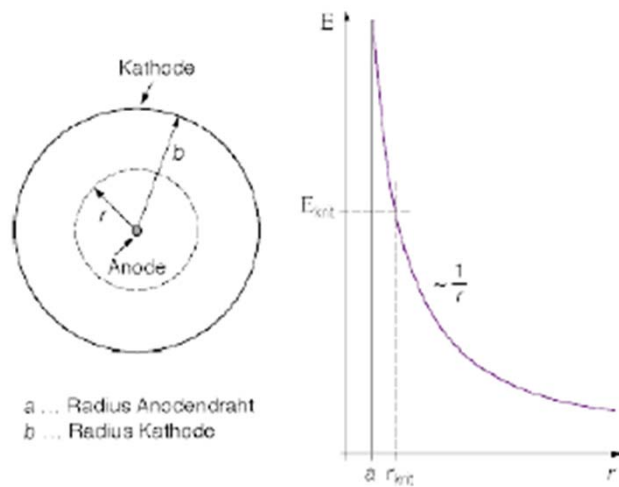
Signale einer Ionisationskammer



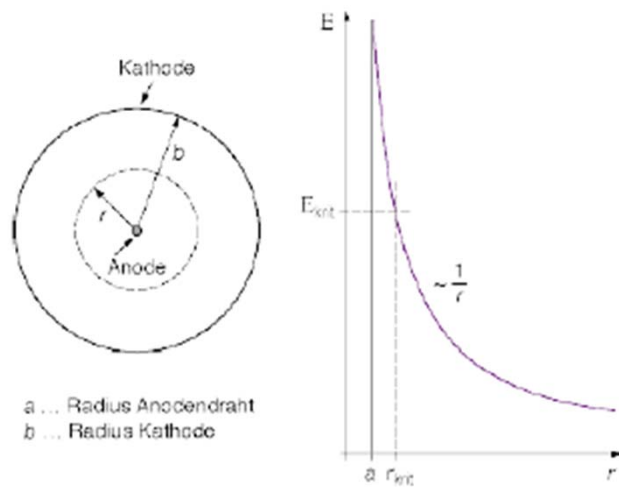
Signale einer Ionisationskammer



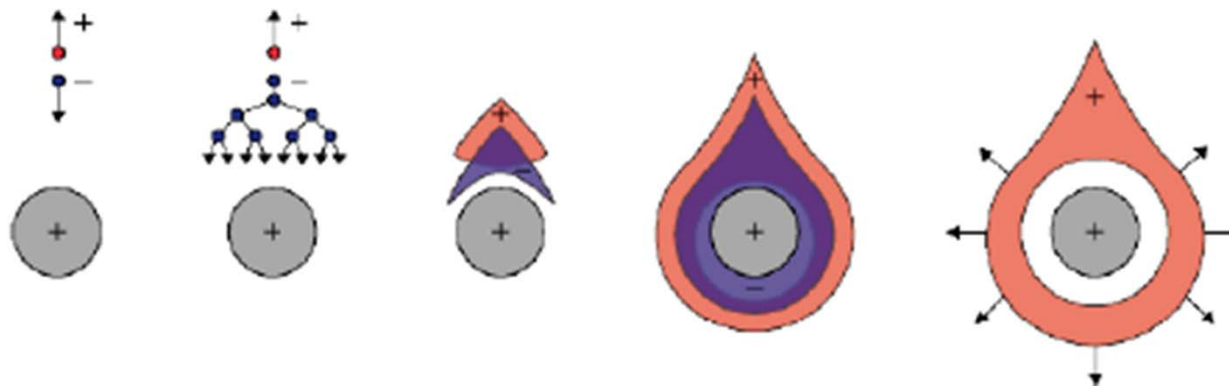
Proportionalitätszähler (Gasverstärkung)



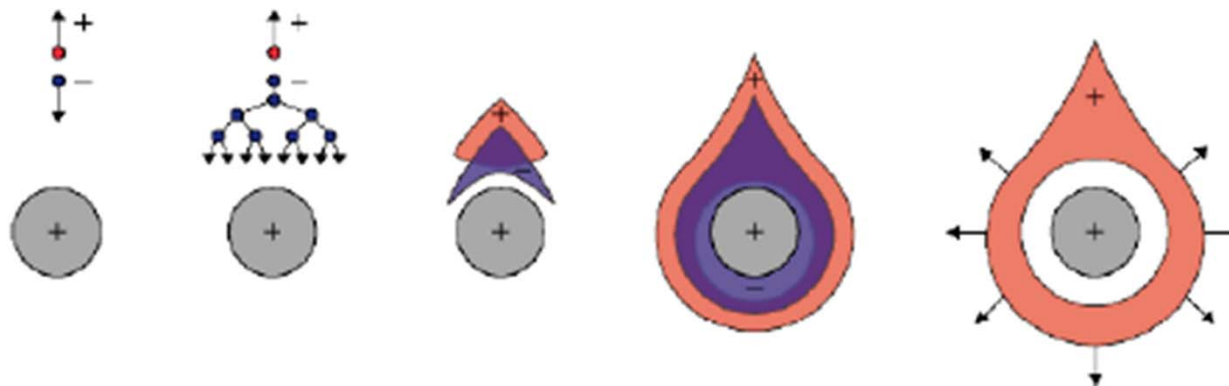
Proportionalitätszähler (Gasverstärkung)



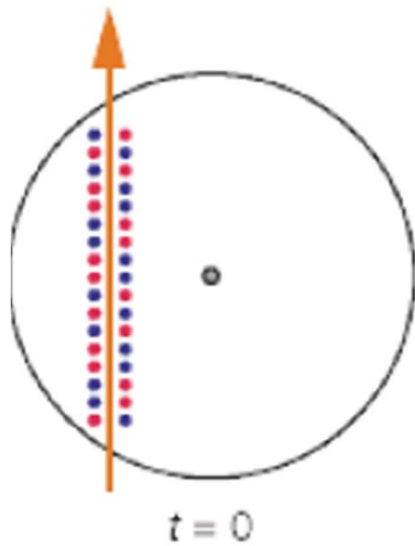
Gasverstärkung



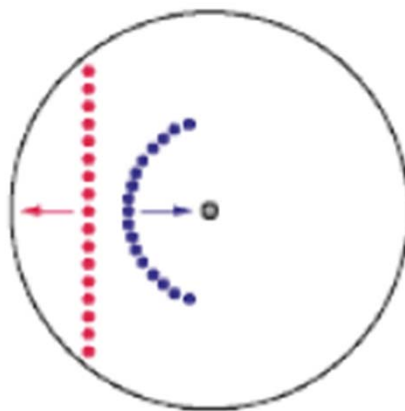
Gasverstärkung



Proportionalitätszähler (Ablauf)



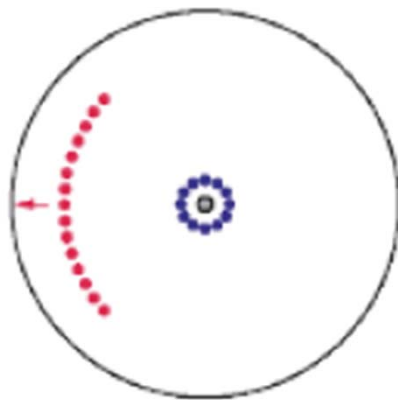
Proportionalitätszähler (Ablauf)



$t = 50 \text{ ns}$

Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

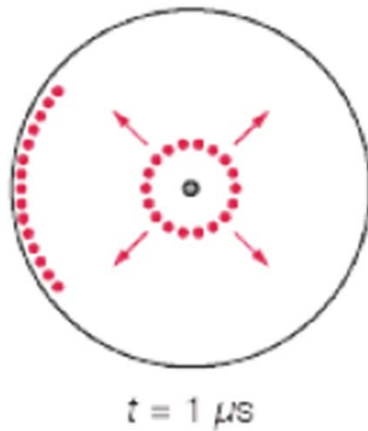
Proportionalitätszähler (Ablauf)



$t = 100 \text{ ns}$

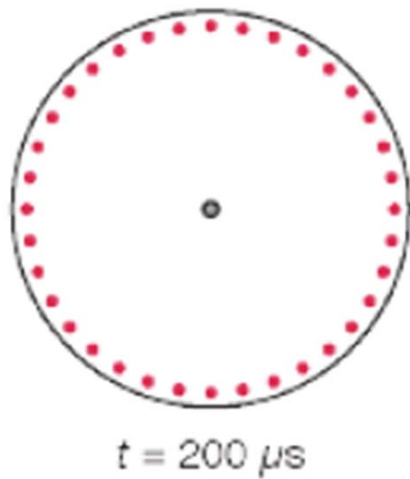
Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

Proportionalitätszähler (Ablauf)



Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

Proportionalitätszähler (Ablauf)

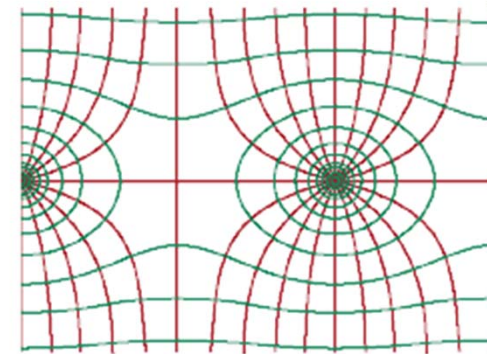
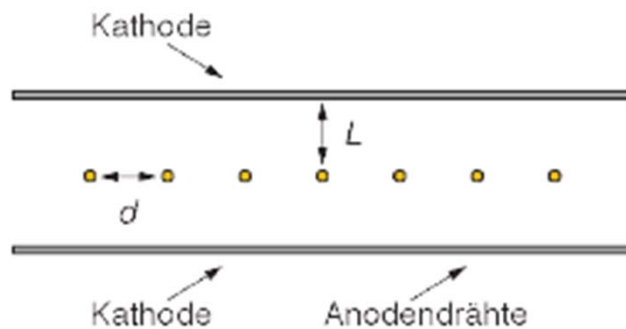


Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

Geiger-Müller-Bereich

Geiger-Müller-Bereich

Ortsbestimmung: Multi Wire Proportional Chamber



- ★ 1992 erhielt Georges Charpak den **Nobelpreis für Physik** für “die Erfindung und Entwicklung von Teilchendetektoren, insbesondere der Vieldraht-Proportionalkammer”.

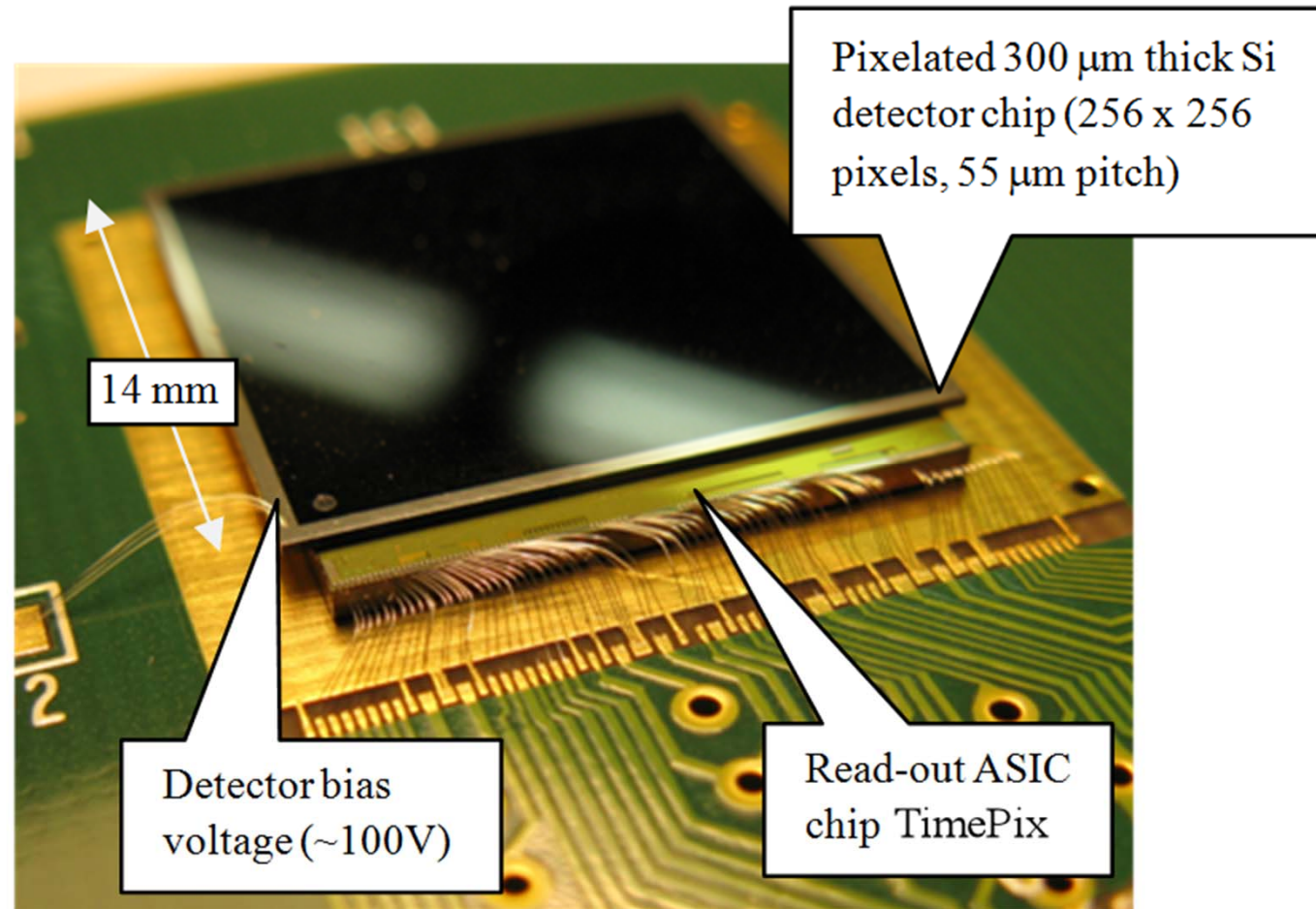
Georges Charpak

Quelle: Nobelprize.org

<http://nobelprize.org/physics/laureates/1992/>



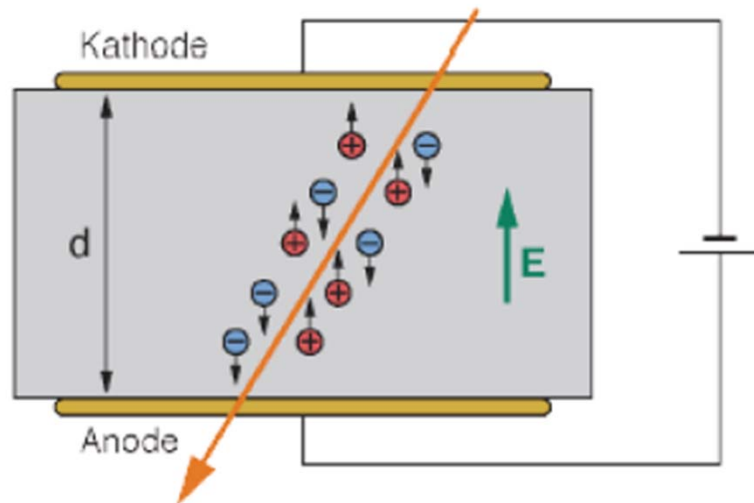
Halbleiterdetektoren



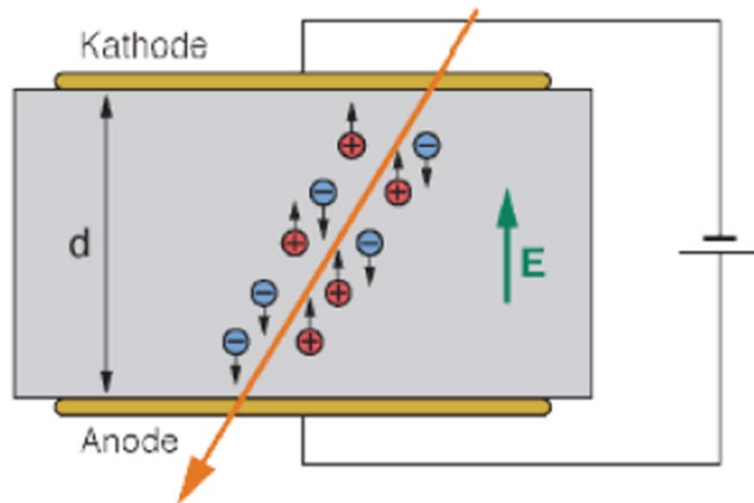
Halbleiterdetektoren

Halbleiterdetektoren

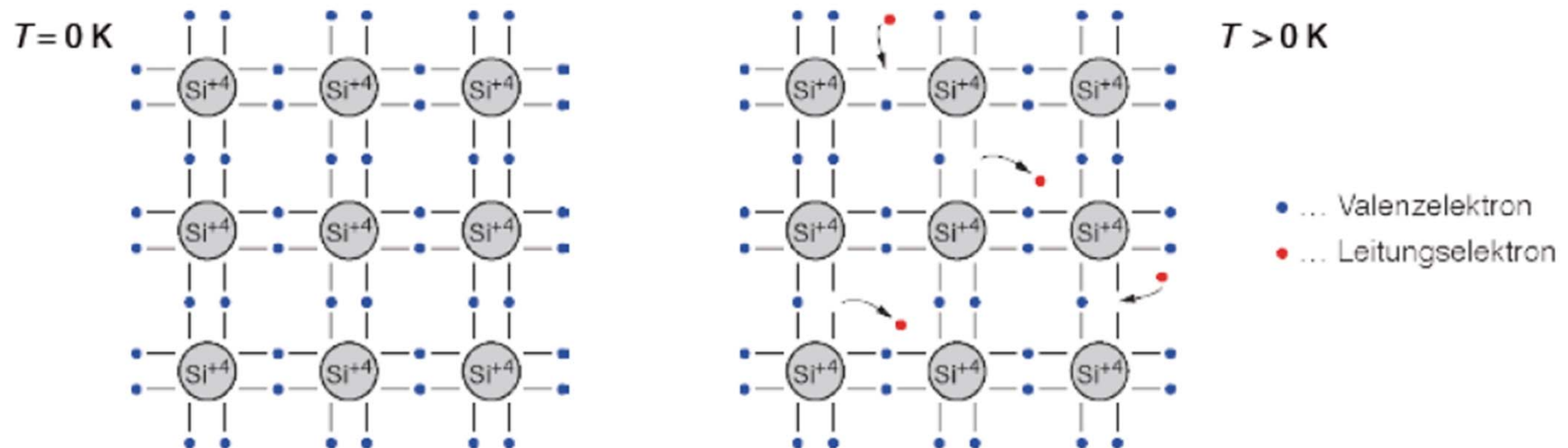
Halbleiterdetektoren (Detektionsprinzip)



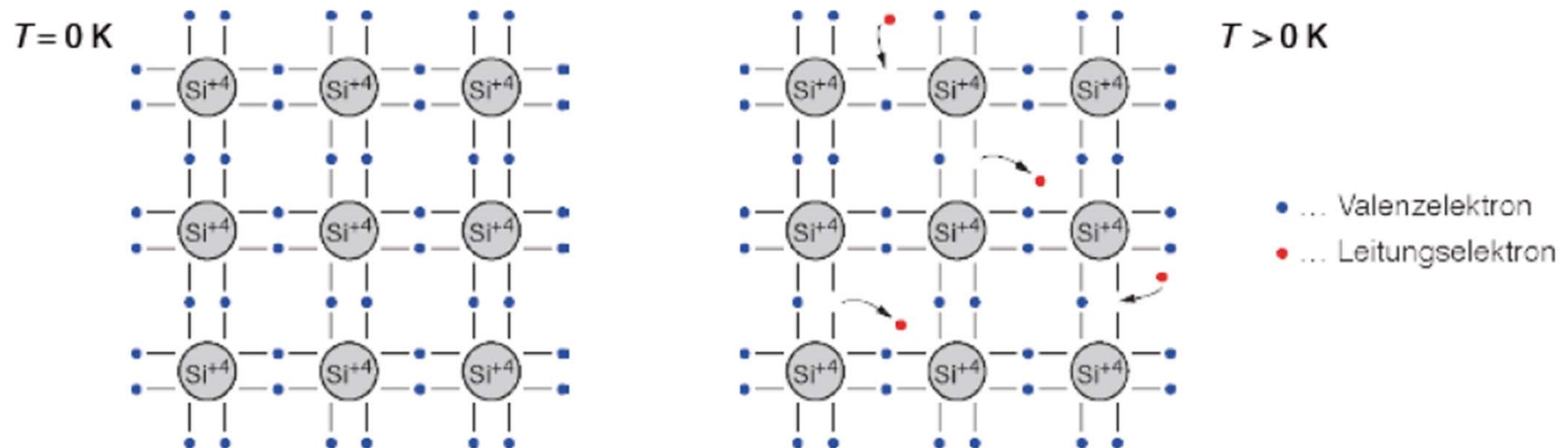
Halbleiterdetektoren (Detektionsprinzip)



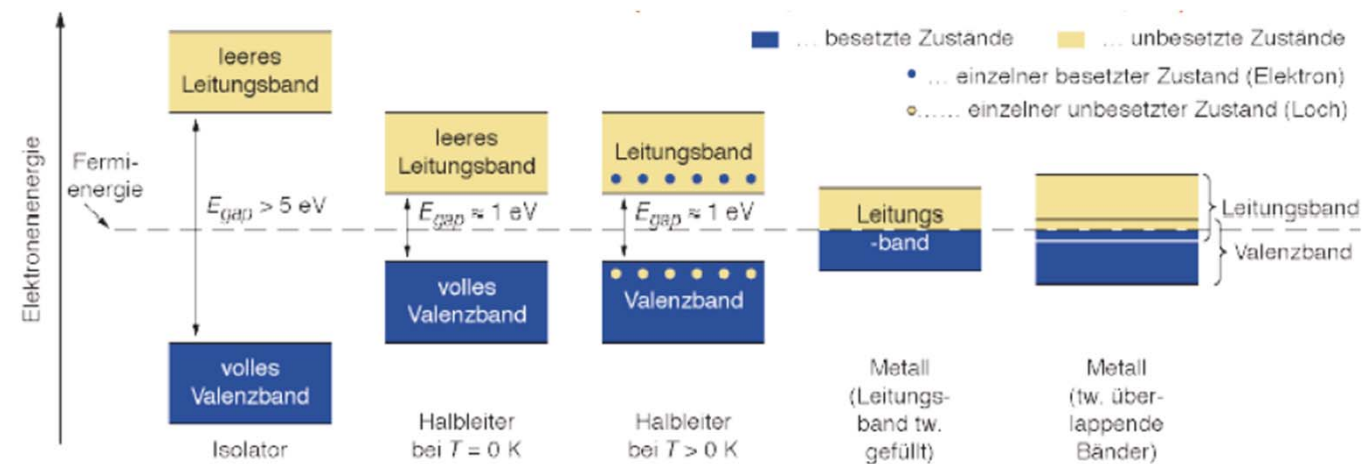
Bindungsmodell eines Halbleiters



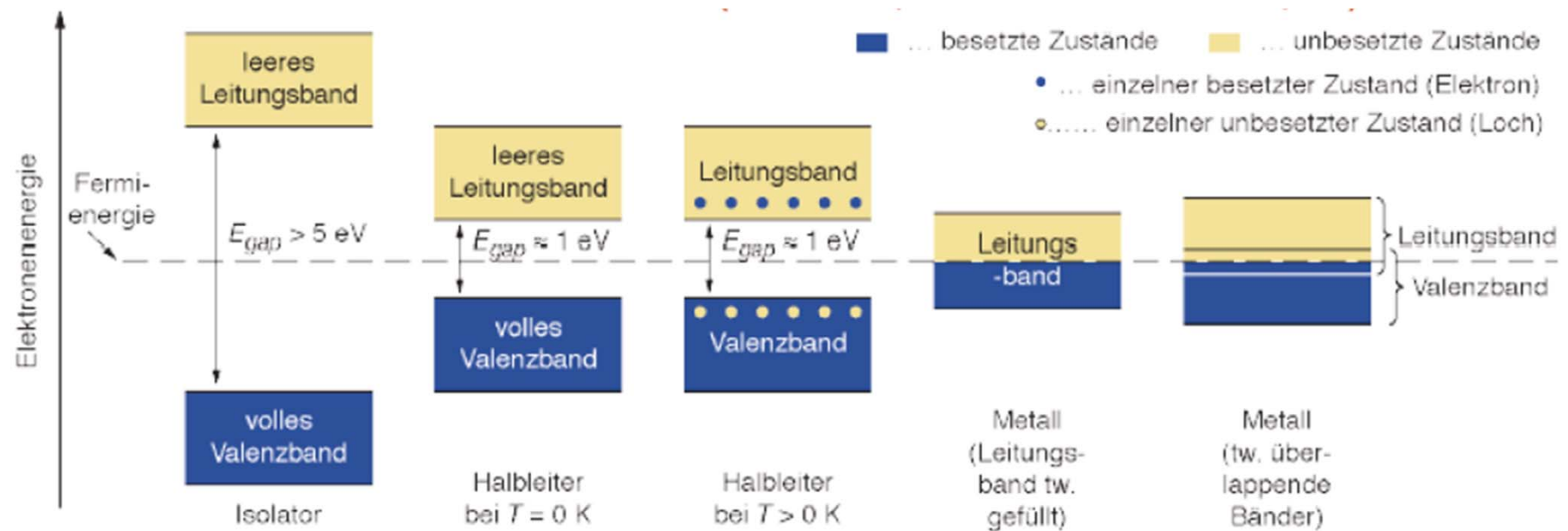
Bindungsmodell eines Halbleiters



Bändermodell



Bändermodell

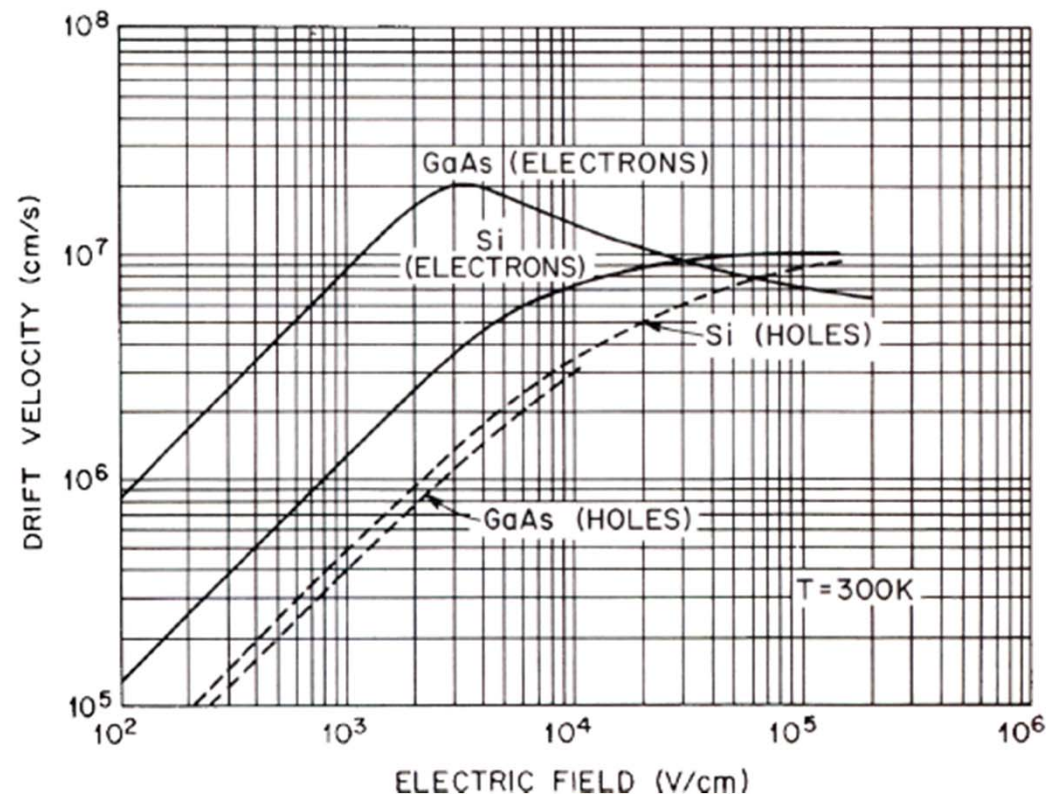


Intrinsische Ladungsträgerdichte

Intrinsische Ladungsträgerdichte

Driftgeschwindigkeiten in Halbleitern

Driftgeschwindigkeiten für Elektronen und Löcher in Silizium und GaAs bei Raumtemperatur. Man beachte den Bereich negativer differentieller Mobilität bei GaAs.



Quelle: S.M. Sze, *Semiconductor Devices*, J. Wiley & Sons, 1985

Materialeigenschaften einiger Halbleiter

Material	Si	Ge	GaAs	GaP	CdTe	Diamant [*]
Ordnungszahl Z	14	32	31+33	31+15	48+52	6
Atomgewicht A (amu)	28.086	72.61	69.72+74.92	69.72+30.97	112.4+127.6	12.011
Gitterkonstante a (Å)	5.431	5.646	5.653	5.451	6.482	3.567
ρ (g/cm ³)	2.328	5.326	5.32	4.13	5.86	3.52
E_g (eV) bei 300 K	1.11	0.66	1.42	2.26	1.44	5.47–5.6
E_g (eV) bei 0 K	1.17	0.74	1.52	2.34	1.56	≈ 6
rel. Dielektrizität $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$	11.9	16.0	12.8	11.1	10.9	5.7
Schmelzpunkt (°C)	1415	938	1237	1477	1040	3527
eff. e ⁻ -Masse (m_n/m_e)	0.98, 0.19 ⁺⁺	1.64, 0.08 ⁺⁺	0.067	0.82	0.11	0.2
eff. Loch-Masse ⁺ (m_h/m_e)	0.16	0.044	0.082	0.14	0.35	0.25

†für "leichte" Löcher
++ Oberflächen gleicher Energie sind Ellipsoide

*zählt eigentlich als Isolator

Quellen, u.a.: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>; S.M.Sze, *Physics of Semicon. Devices*, J. Wiley & Sons, 1981,
J. Singh, *Electronic & Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures*, Cambridge University Press, 2003

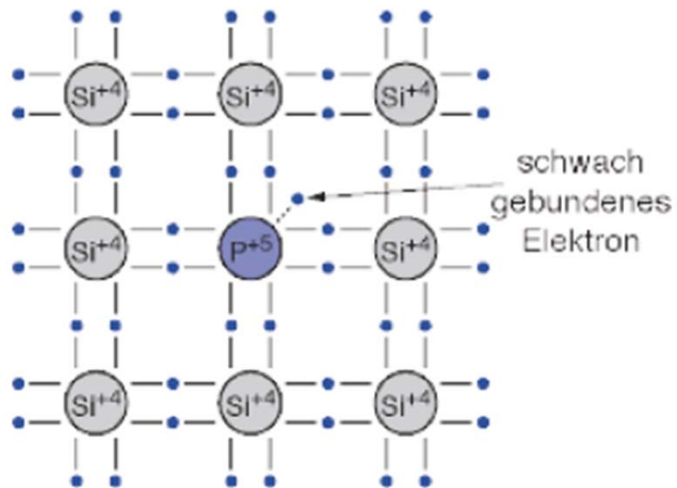
Optimales Material

Optimales Material

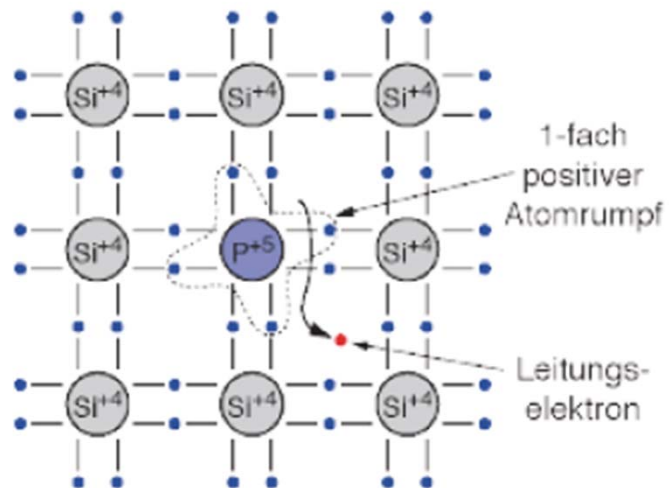
Thermische Anregung

Thermische Anregung

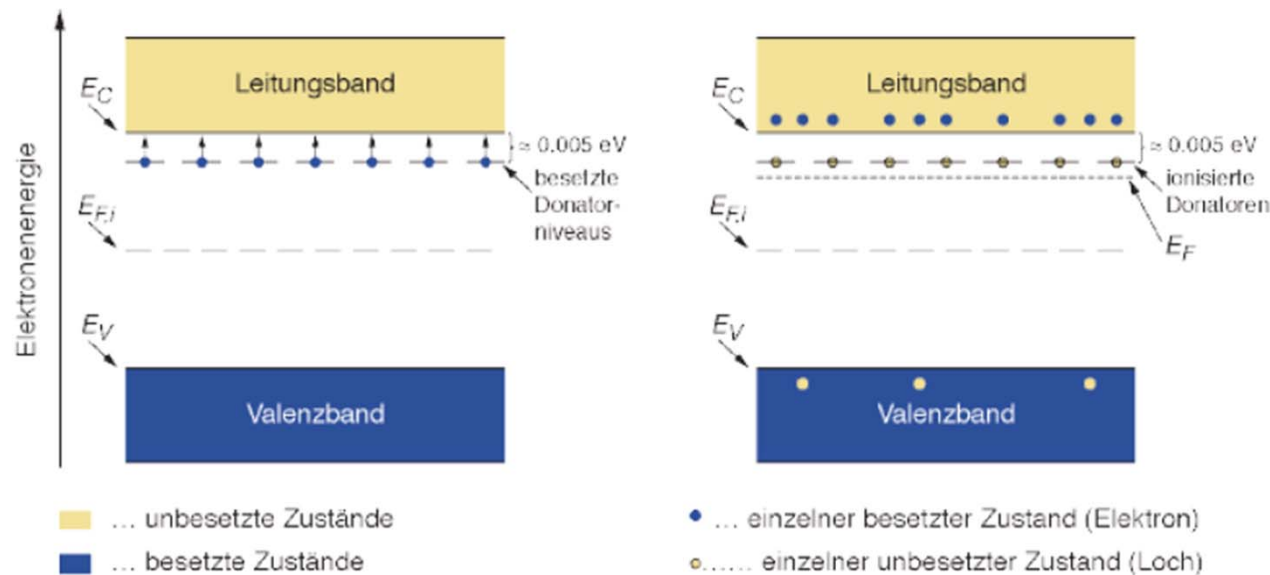
Abhilfe: Dotierung eines Halbleiters



Abhilfe: Dotierung eines Halbleiters

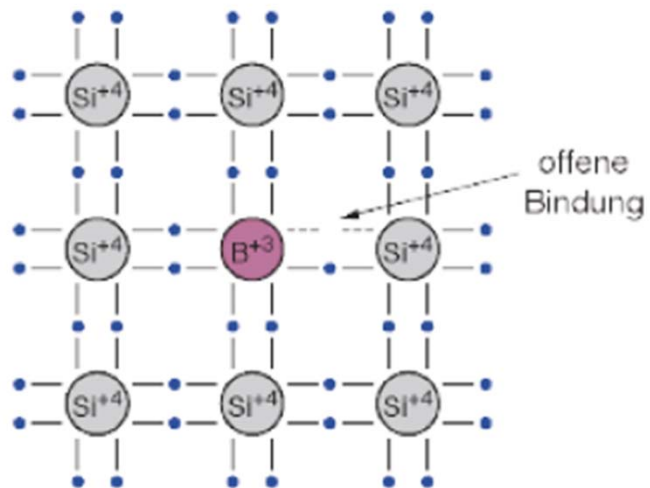


N-Dotierung eines Halbleiters

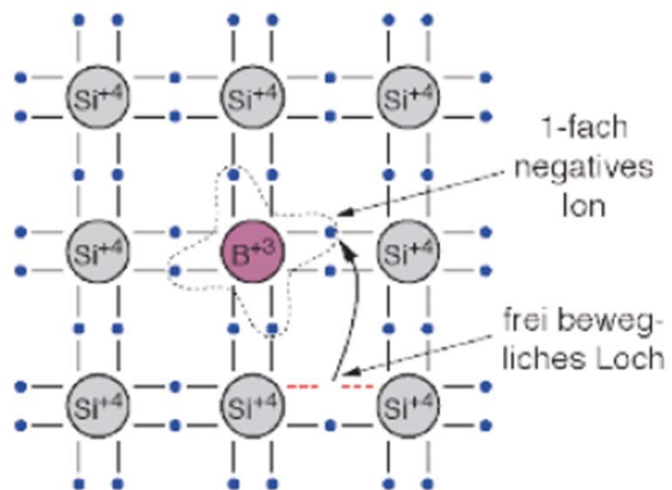


(Energieabstände nicht maßstabgetreu)

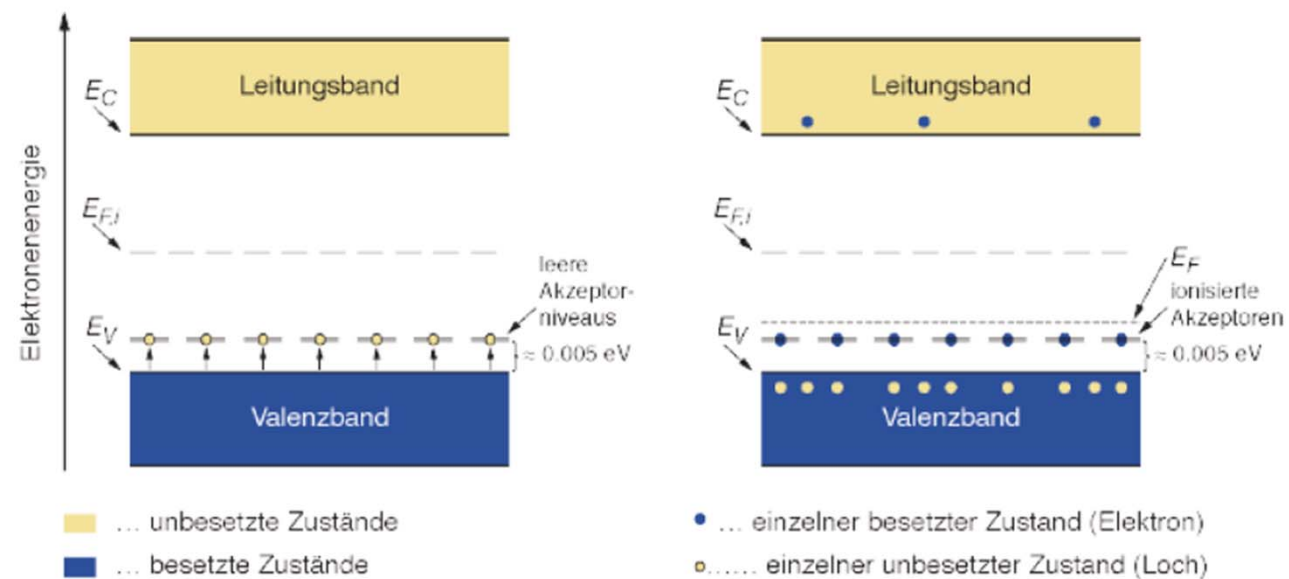
P-Dotierung



P-Dotierung

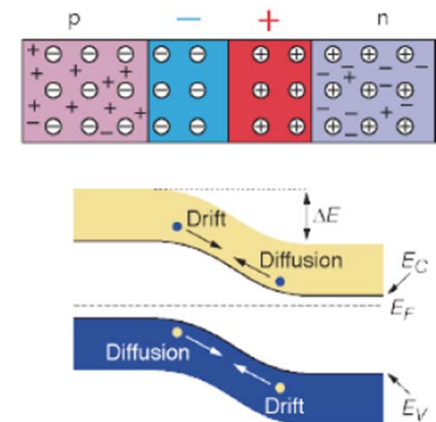
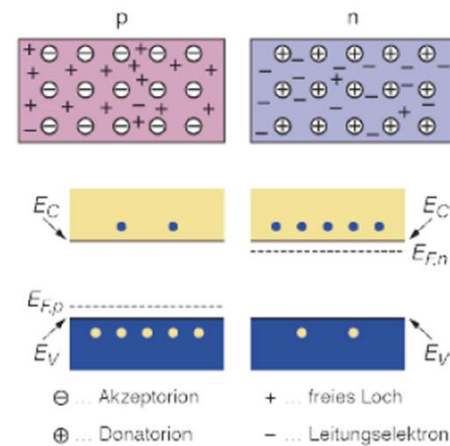


P-Dotierung



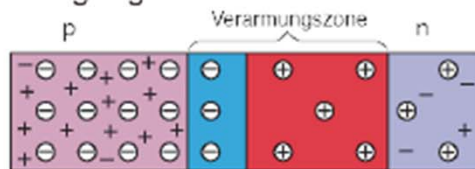
(Energieabstände nicht maßstabgetreu)

P-N-Übergänge



Elektrische Eigenschaften eines P-N-Übergang

pn-Übergang Schema



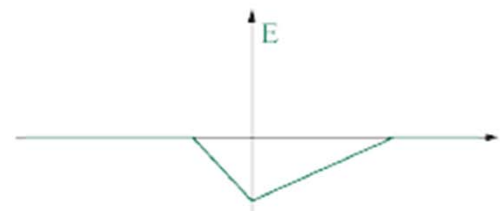
Konzentration der freien Ladungsträger



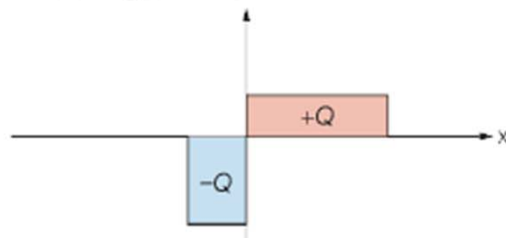
Akzeptor- und Donatorkonzentration



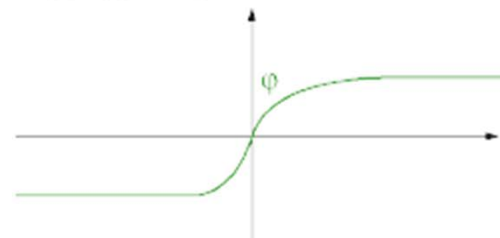
elektrisches Feld



Raumladungsdichte



elektrisches Potential



⊖ ... Akzeptorion

⊕ ... Donatorion

+ ... freies Loch

- ... Leitungselektron