

ATP I *
ATP II : T./S.

Zusammenfassung 2016

Max Stadtkuerner

Dies ist eine Zusammenfassung der
Folien von Prof. Drexler, also eine
Zusammenfassung einer Zusammenfas-
sung, und damit als einziges Lern-
mittel ungeeignet! Jedes Wort hat
hier seine Daseinsberechtigung und
sollte beim gewissenhaften Lernen nicht
überlesen werden.
Keine Haftung für Fehler / Vollständig-
keit / Aktualität / etc...

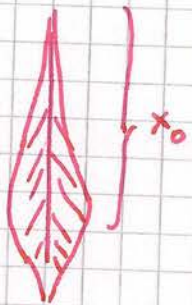
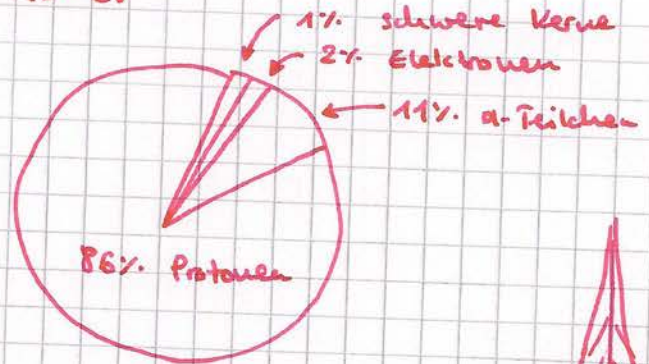
— 30. August 2016

Max

Kosmische Strahlung

- * 1912 Viktor Hess, misst zunehmende Ionisierung
- * 1939 Pierre Auger, Korrelationsmessung auf Berg
=> einzelne Teilchen mit $E \geq 10^{15} \text{ eV}$
- * 1961 John Lindegren, Szintillatoren in Nüste
=> Ereignis mit 10^{20} eV

Kosmische Strahlung
Zusammensetzung
Primärstrahlung
durch γ Strahlung

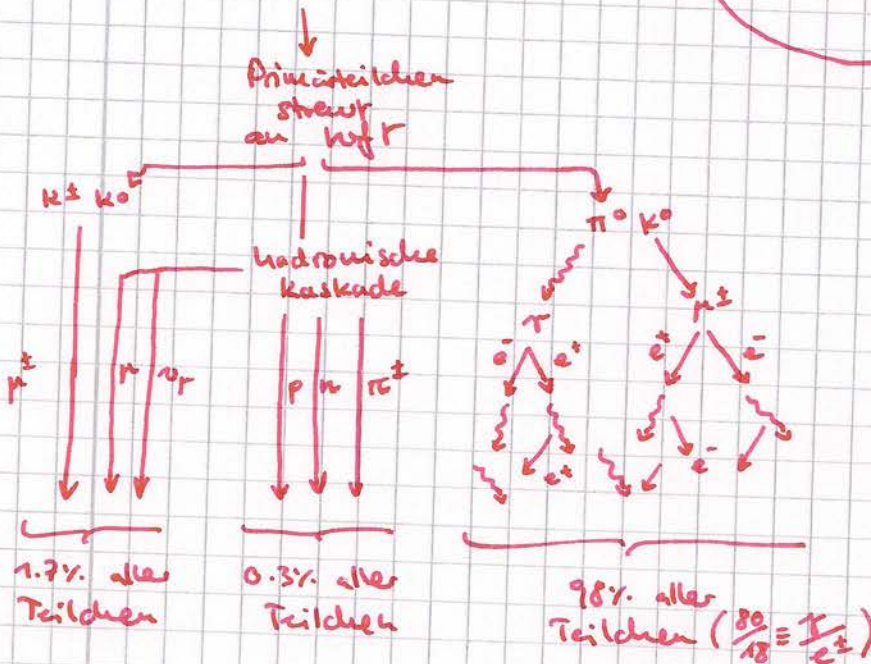


$$X_0 \approx \frac{2}{7} \Lambda_{\text{pion}}$$

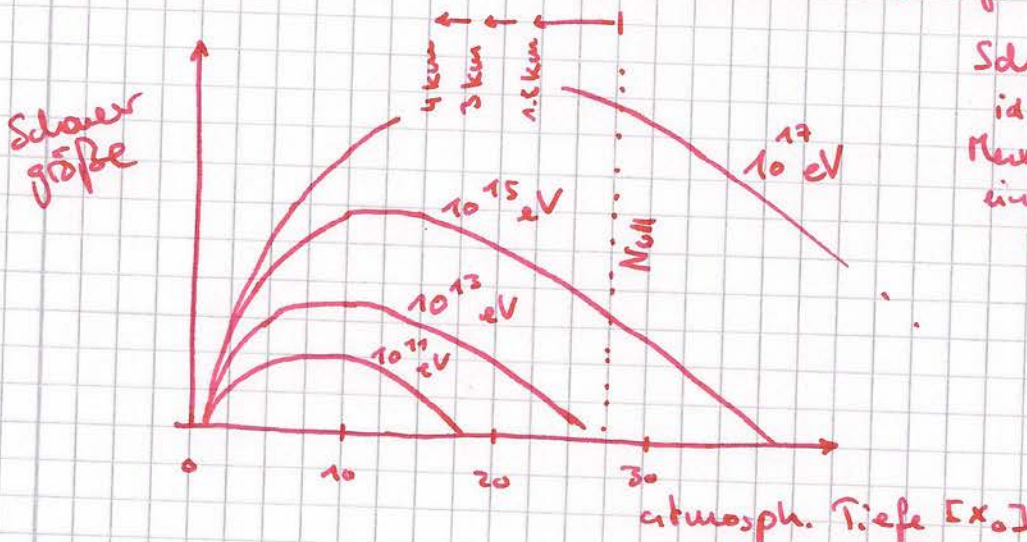
~~... ...~~

nach Strecke X_0 ist Energie durch Emission von Bremsstrahlung auf $\frac{1}{2} E_0$ abgefallen

Λ ... prozessabhängige Wechselwirkungslänge



Atmosphäre hat $\sim 25 X_0$ (nicht konst. wegen Luftdruck!)



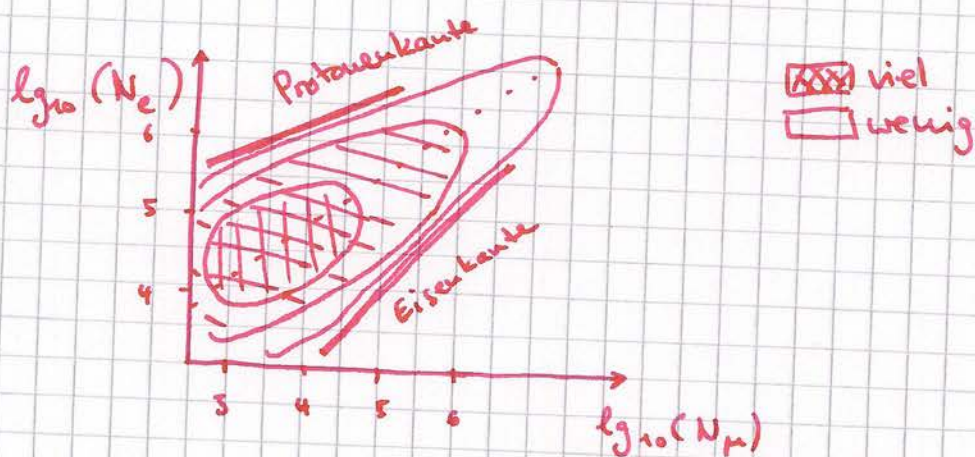
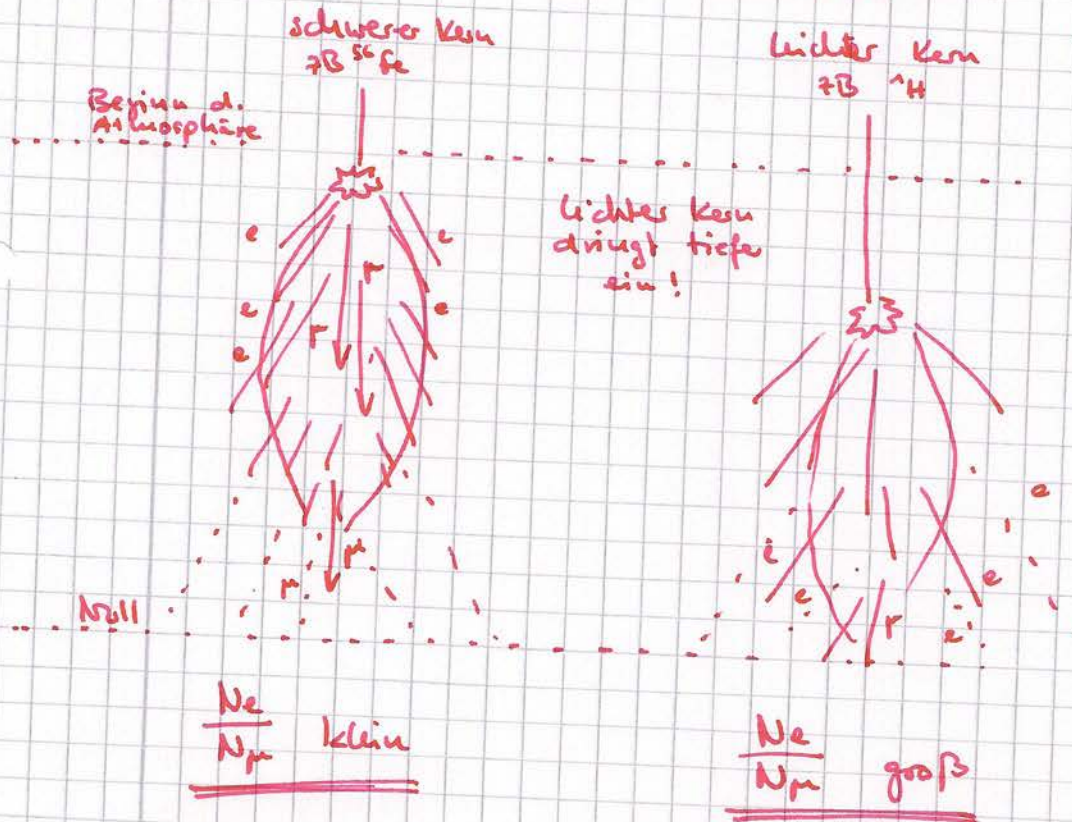
Schauer erreicht idR sein Maximum in einigen km Höhe

Experiment 2B am LHC, Protonen mit $E \approx 10^{12}$ eV (~ 14 TeV ... 8 Größenordnungen kleiner)

Strahlungslänge im Eisen HCAL: $X_0 \approx 2$ cm
 $\Delta_H \approx 17$ cm

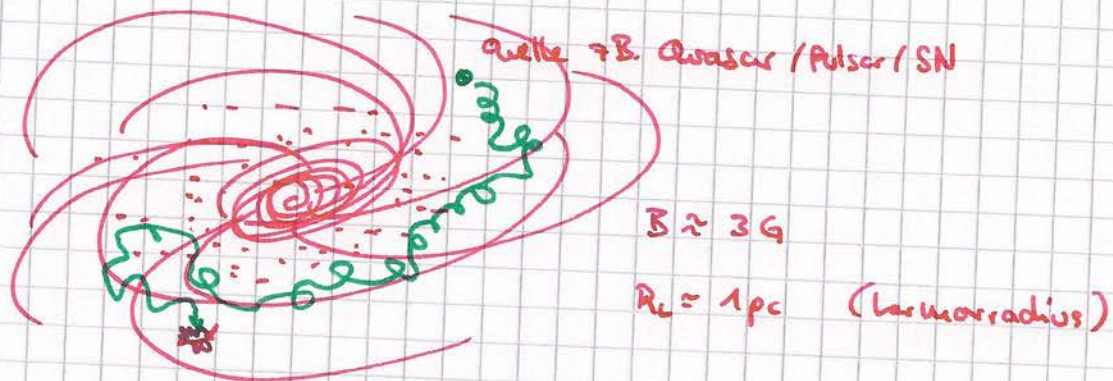
Rekonstruktion des Primärteilchens:

Schwerer Lateralverteilung via NKG-Fit



Experiment dazu: KASCADE - Grande (Campus Nord)

Kosmische schweren Magnetfeld Strahlung in Form von Protonen oder Kernen bis zu 1000000 Jahre im galaktischen gespeichert

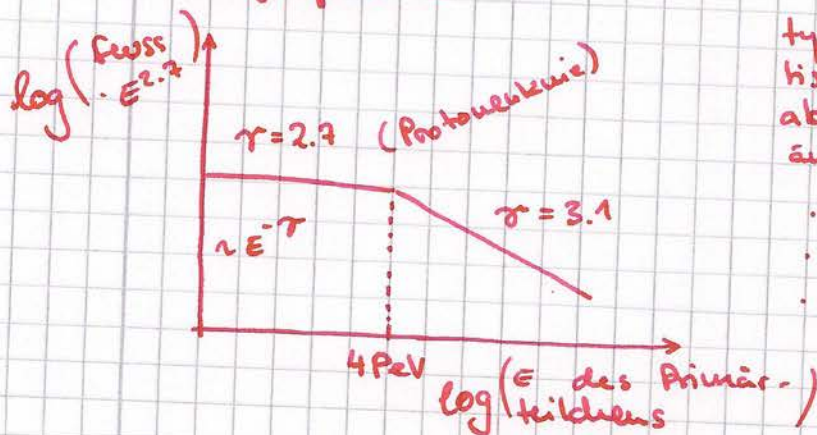


Milchstraße; Energiedichte pro cm^3

kosm. Strahlung $\equiv \text{CR}$	γ -Strahlung (optischer Bereich)	...	0.6 eV
	Magnetfeld	...	0.25 eV
	CMB	...	0.26 eV
	massive kosmische Strahlung	...	1.00 eV
	lokale Materie (WIMPs)	...	0.3 GeV

CR entsteht durch Supernovae, Pulsare, Quasare

Energiespektrum



typisches Potenzgesetz (= statistisches Verhalten)
ab 4 PeV (das „Knie“)
ändert sich das Spektrum

- eher schwere Teilchen
- extragalaktische Beschleuniger
- keine Teilchen aus SN Schocks (Maximum erreicht)

Eisenknie bei $\sim 100 \text{ PeV}$ (^{56}Fe hat 26 Protonen)

Teilchen werden durch Supernova Schockfront beschleunigt. Schockfront kann mehrfach passiert werden $\Rightarrow$ jedesmal lineare Beschleunigung.

jedes mal $\rightarrow E = E_0 (1 + \alpha)^n$ nach n Zyklen
weniger Teilchen nach Besch. Prozess

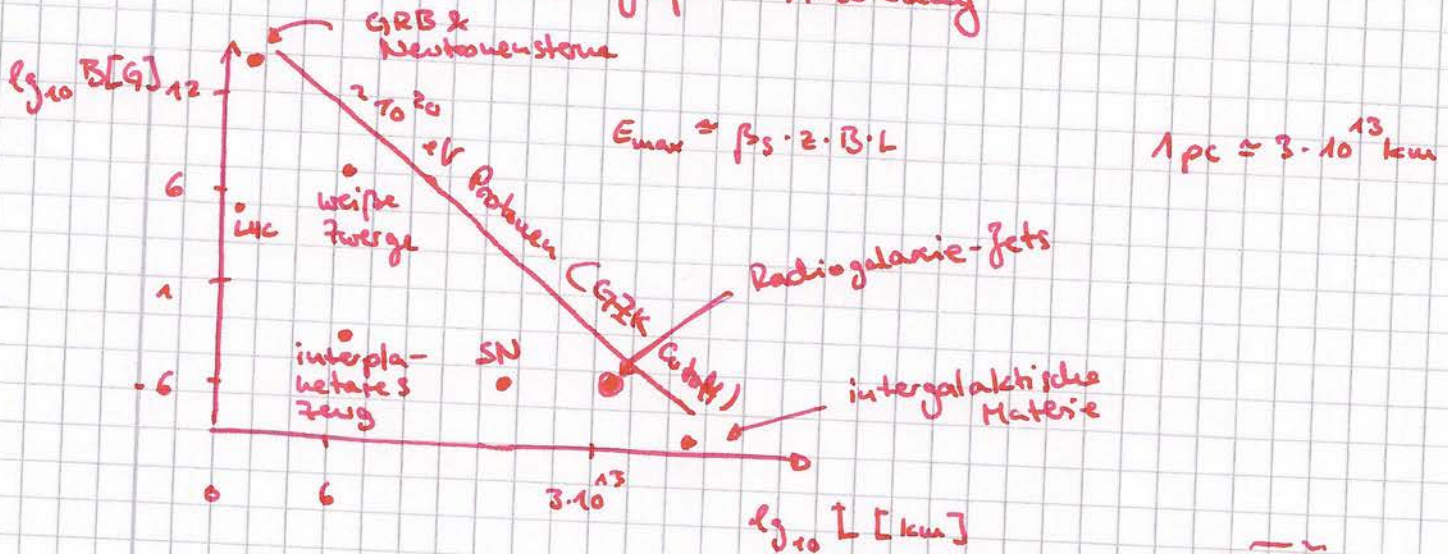
$$\Rightarrow \frac{dN}{dE} \sim E^{-\gamma}$$

Power-law

Hillas Plot: Strahlung im Kosmos

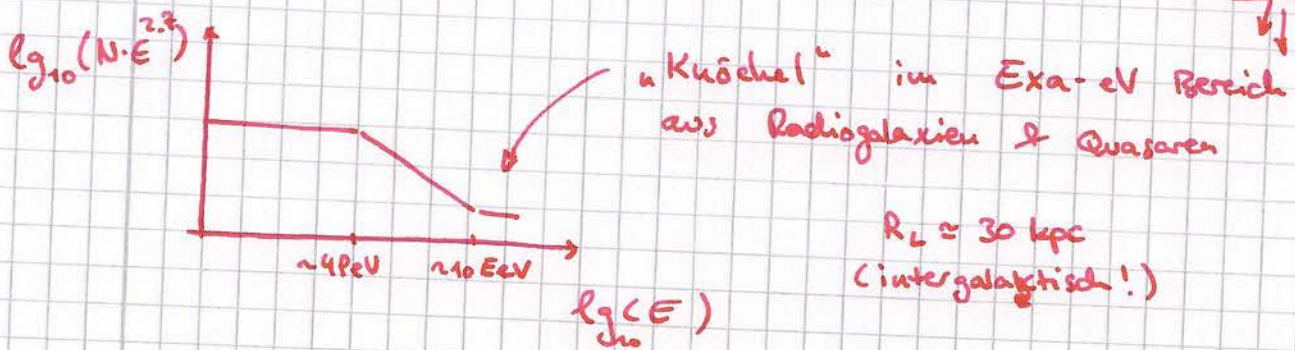
großes B-Feld $\Rightarrow$ kleine Ausdehnung

kleines B-Feld $\Rightarrow$ große Ausdehnung



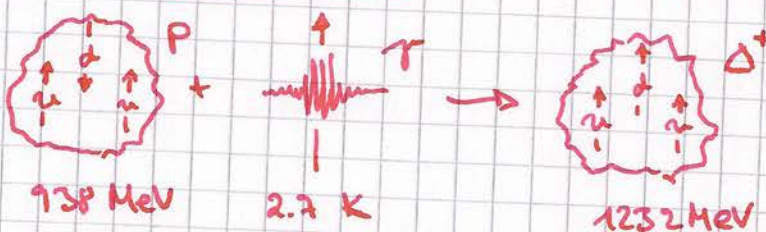
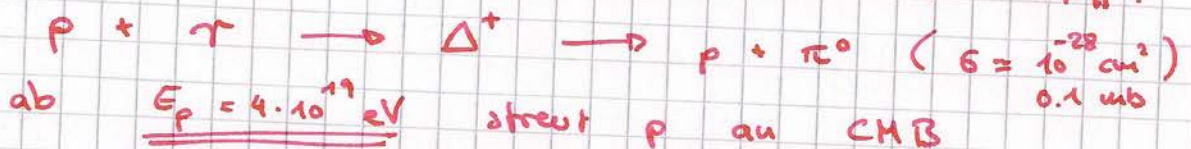
ultrahochenergetische CR $\Rightarrow$ aktive Galaxiekern

Schockfronten von Quasar-Jets ermöglichen $E > 10^{20} eV$



gemessen beim Pierre Auger observatorium in Argentinien (Ereignisse mit $E > 100 EeV$)

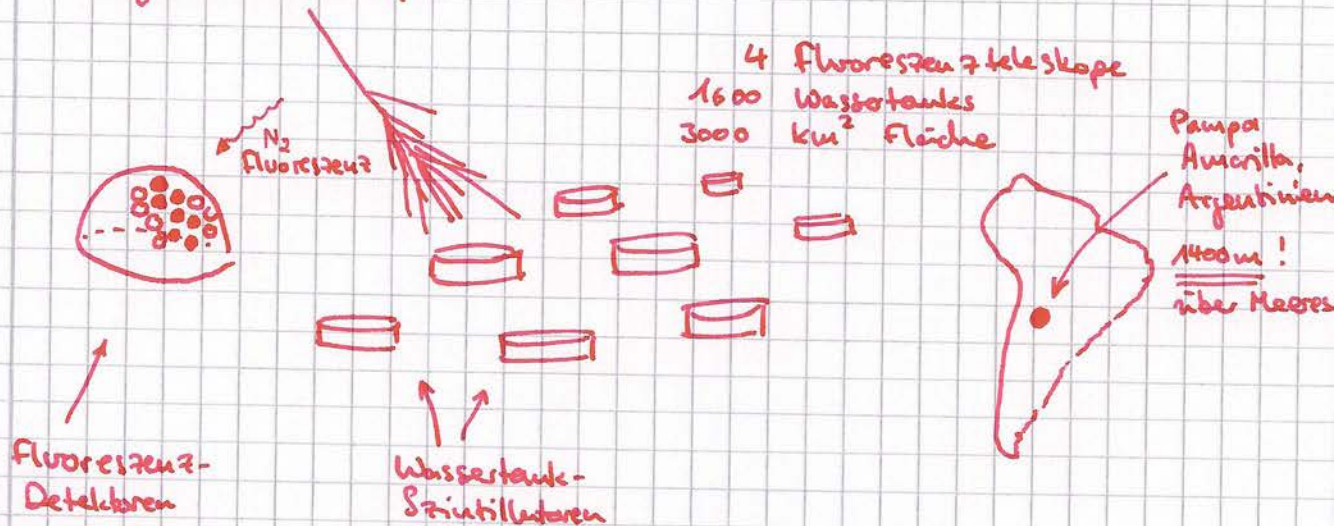
höherenergetische Protonen unterdrückt durch GZK cutoff!



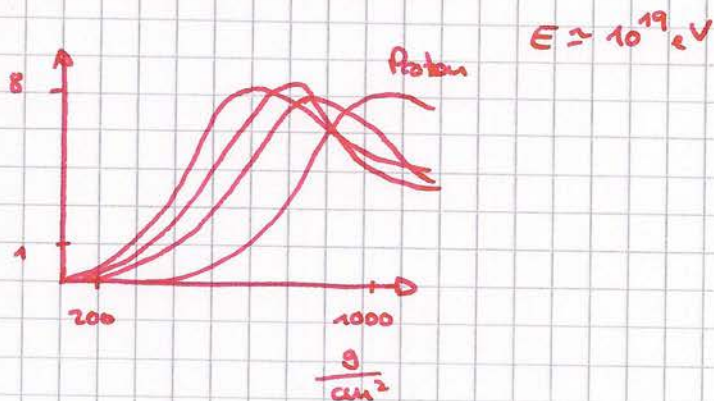
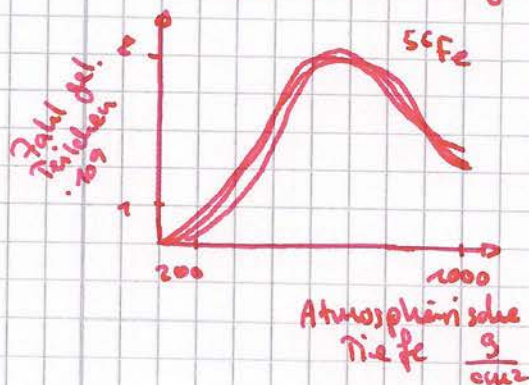
Greisen
Zatsepin
Kuzmin

Reichweite ab ca. 100 Mpc stark unterdrückt

Auger Observatory:



Bestimmung des Teilchenart durch Form der Schauerentwicklung:



Raumunterscheidung von $\text{Jab} = 0.7^\circ$ erlaubt Suche nach Anisotropien der UHECR

- $\Rightarrow$ extrem hochenergetische Ereignisse korrelieren nur schwach mit AGNs
- $\Rightarrow$ γ -Astronomie besser für Ortskorrelationen

γ -Astronomie: (HESS, MAGIC)

Cherenkov-Teleskope werden auf AGNs gerichtet

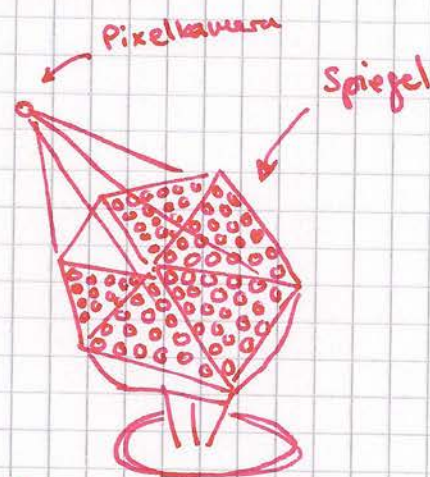
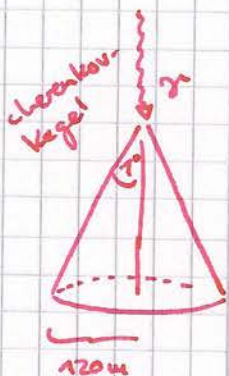
- $\Rightarrow$ Hochenergetische γ -Quanten erzeugen einen Schauer mit sehr engem Koll. $\theta \sim 1^\circ$

obere Atmosphäre: $u \approx 1.0001$

Trennung von geladenen Primärteilchen auf Grund von weniger diffuser Lateralverteilung

Leuchtstärkste γ -Quelle: Krebsnebel

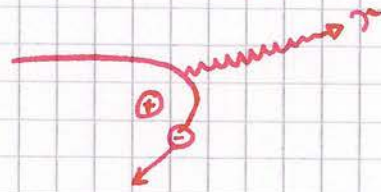
$\Rightarrow$ Flusseinheit: 1 Crab = $1 \frac{\text{N}}{10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}}$



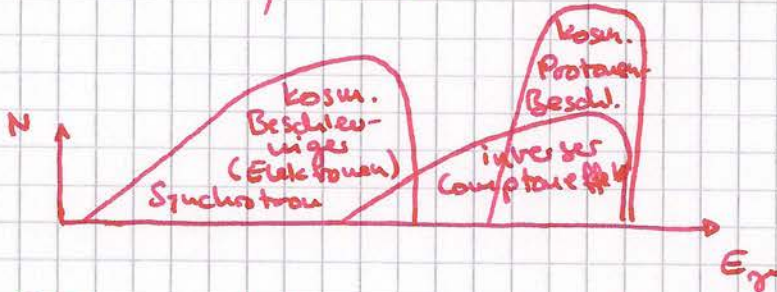
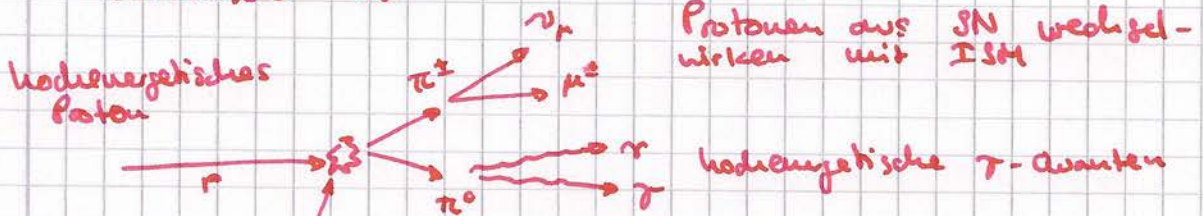
γ -Quellen: entstehen bei Erzeugung von geladenen CR
 • Pulsarwinde
 • AGNs

inverser Comptoneffekt:

Bremsstrahlung:

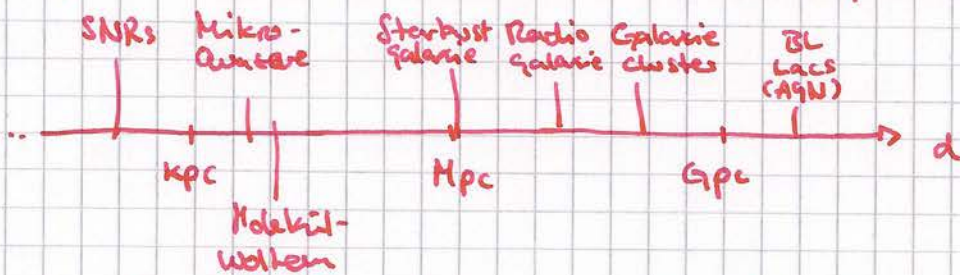


hadronische WW:



TeV- γ : haben wegen Paarbildung mit cmB γ s eine begrenzte Reichweite (~ 1 Gpc)

Bsp.: Abstand Andromeda $\leftrightarrow$ Milchstraße 0.8 Gpc



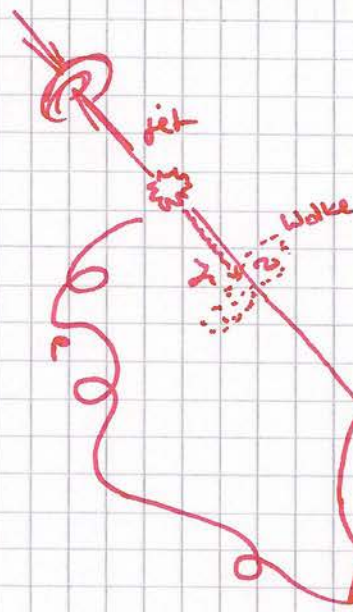
Cherenkov-Teleskop-Astronomie (CTA) als neues Flaggschiffprojekt

Idee: viele Wasser-Cherenkov-Detektoren in großer Höhe (ähnlich Auger) $\rightarrow$ HAWC-Experiment

$\rightarrow$ Brücke zur Neutrino-Astronomie

UHE Neutrinos aus Punktquellen:

- AGNs-Jets
- GRBs
- Quasare



UHE Neutrinos aus hadronischer Zerfallskaskade leicht Richtungskorreliert
 $\Rightarrow \nu$ -Himmelskarte kann rekonstruiert werden, wenn atmosphärische ν s abgeschiedet werden

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$$

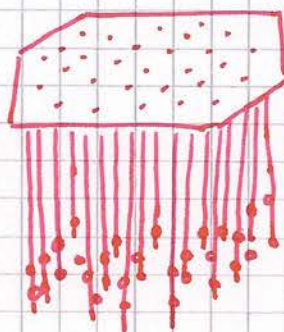
an Quelle:

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$$

nach Propagation:

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$$

Messung bei Ice-Cube nach "unten"; Erde aber ab ca. 100 TeV für ν undurchsichtig.



Ice-Top - Vetodetektoren

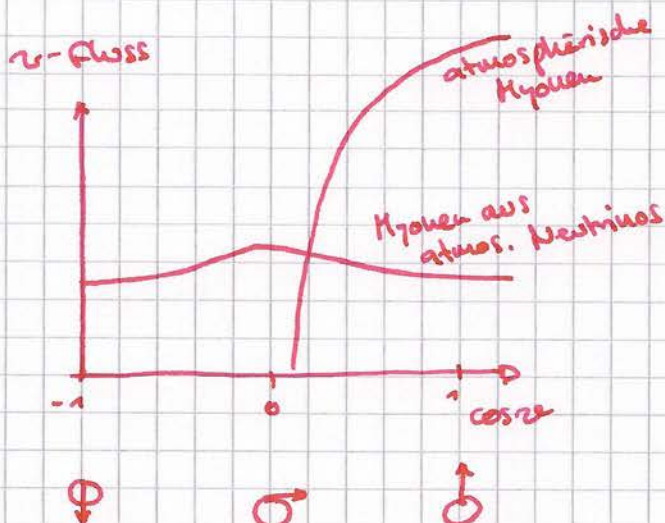
1.5 km

(anderes Experiment: NEMO
 gleiches Prinzip, aber im Mittelmeer)

4800 Photomultiplier : 1 km³ Teleskopraum

2013 werden erste extragalaktische PeV ν s bei Ice-Cube beobachtet (Ernie, Bert, Big Bird)

$\Rightarrow$ 45 Evidenz, inzwischen ~30 Ereignisse



Seltene Ereignisse: (WIMPs / $\alpha\beta\beta$)

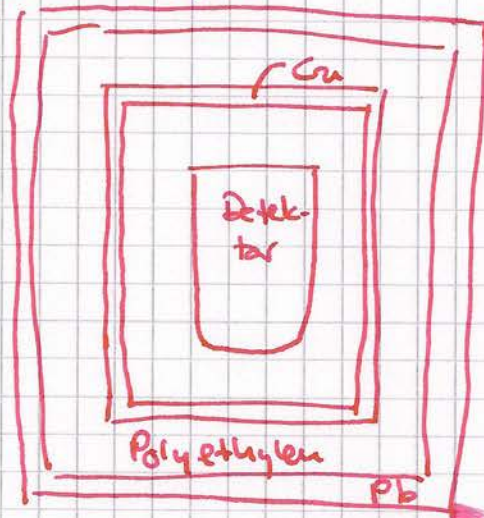
Signal $\sim 1 \frac{N}{100 \text{ kg} \cdot \text{a}}$ Signal durch Kernrückstoß
 $\rightarrow$ extreme Störung durch "Rauschen Lead" an radioaktive Elemente

$$W_r = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Rate}}}{J} \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{WIMP Strom}}}{N} \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Target Kerne}}}{\sigma} \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{WG}}}{G}$$

⚠ Untergrund von $\sim 10000 \text{ Bq}$ pro Mensch

- 4200 Bq ^{40}K (überall)
- 1 Bq ^{226}Ra (Lunge)
- 3800 Bq ^{14}C (Knochen)
- ...

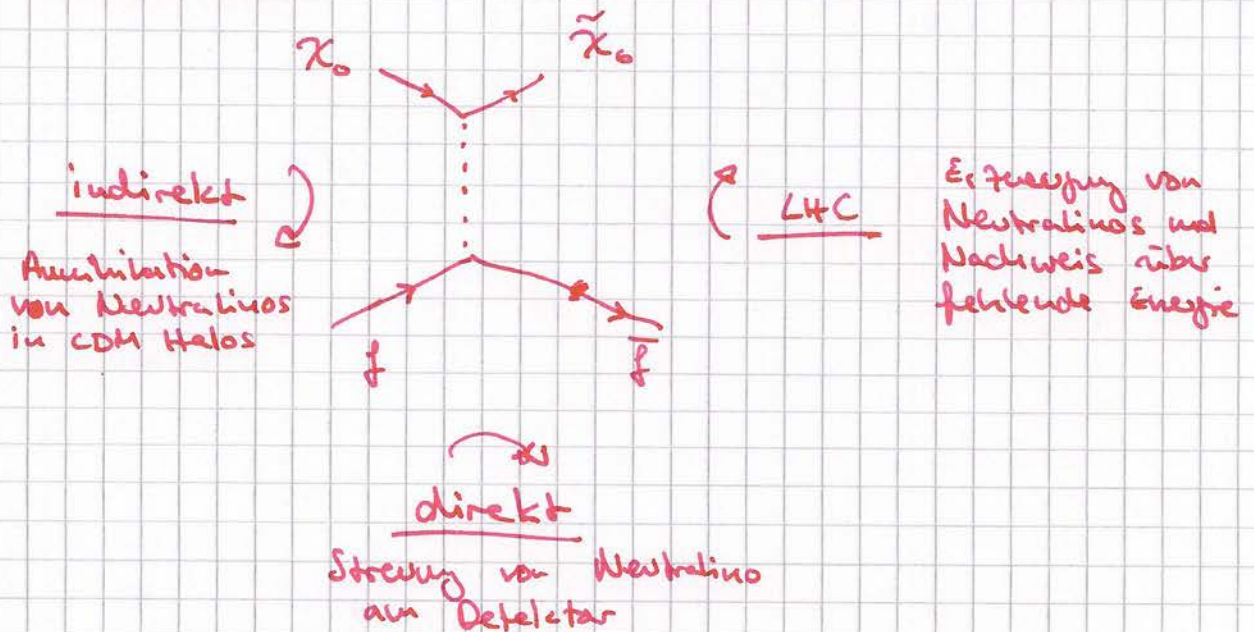
Kühlen aller Apparate zur Unterdrückung thermischen Rauschens
 Abschirmvarianten:



- extrins. Veto gegen Myonen
- Pb gegen γ
- Polyethylen gegen Neutronen
- Cu gegen γ -Aktivität der Pb-Abschirmung

ultimatives Abschirm-Limit: Neutrinos

WIMP Suche:



DM / ωIMP_3 :

WIMPs sind nichtthermische
Relikte des Big Bang, die
nicht relativistisch propagieren

- ⇒ schwach wechselwirkend
- unterliegen Gravitation

WHP-Dichte im Querschnitt
lokal

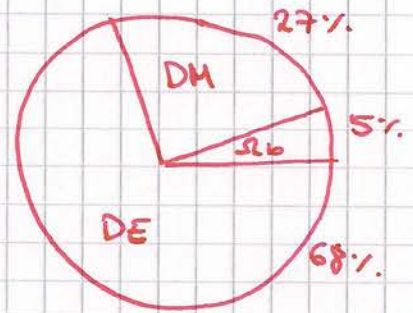
$$\begin{array}{l} \sim 1 \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3} \\ \sim 50 \frac{\text{GeV}}{150 \text{ cm}^3} \end{array}$$



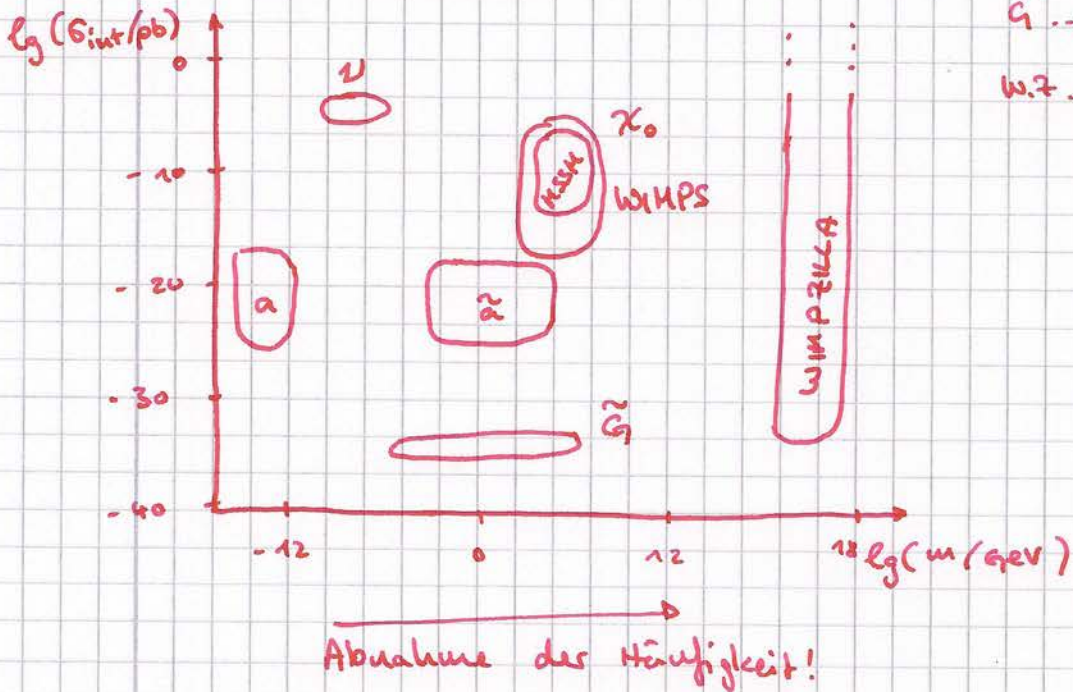
WIMP Halo

$$g(r) \sim \frac{1}{r^2}$$

in 8 kpc Entfernung
von AGN nach
 $v_{rot} = 230 \frac{\text{km}}{\text{s}}$



DM Kandidaten:



a ... Axion, nichtthermisch,
in String-Theorie
und teils QCD
postuliert

$\tilde{a} \dots$ Axino, SUSY Axion

$\tilde{g}$... Gravitino

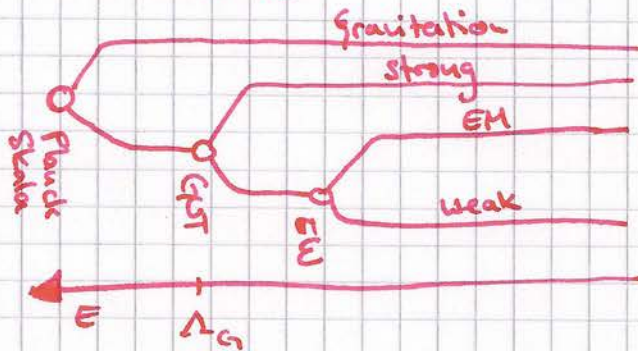
W.7 ... nichtthermisch,
Kühlungseffekte

SUSY:

- Supersymmetrie mit $\Delta S = \frac{1}{2}$ zu SM Teilchen
- Vakuum nicht invariant unter SUSY-Transformation
Symmetriebrechung bei $\sim 1\text{TeV}$
- Lösung des Natürlichkeitsproblems
~~DM~~ DM Kandidaten
Lösung des Hierarchie-Problems
- indirekte Hinweise auf SUSY
durch Vereinheitlichung der
Eichkopplungen

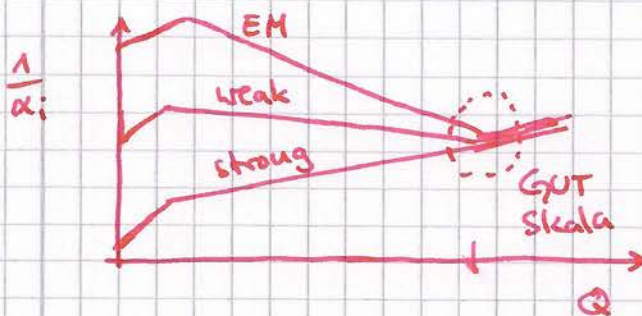


untere Schleife hebt
Divergenz mit relativem
Hinzuschieben weg



$$\Lambda_G < M_{\text{Planck}}$$

Wechselwirkungen ent-
koppeln bei "kleinen"
Energiedichten



MSSM vereinigt Eichkopplungen
bei $\sim 10^{16}$ GeV

$\Rightarrow$ 105 neue Parameter
(Massen, CP-Phasen, etc.)

SUSY-Teilchen mit gleichen Quantenzahlen bilden
Mischzustände

4 EW Gauginos / 4 Higgsinos $\Rightarrow$ 4 Neutralinos / 4 Charginos

Charginos
Flavourbasis
 $\tilde{W}^+ \tilde{W}^- \tilde{H}_u^+ \tilde{H}_d^- \Rightarrow$

Massenbasis
 $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^\pm$

Neutralinos
 $\tilde{\gamma}^0 \tilde{Z}^0 \tilde{H}_u^0 \tilde{H}_d^0 \Rightarrow$

$\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_3^0 \tilde{\chi}_4^0$

Einführung der R-Parität

$$R_p = (-1)^{3B+L+2S}$$

~~leichtestes~~

$\tilde{\chi}_1^0$

leichtestes Neutralino
bleibt stabil!

WIMP Annihilation liefert Teilchenfluss aus galaktischem Zentrum

$$\chi_1^0 + \chi_1^0 \rightarrow \bar{p}, e^+, \gamma,$$

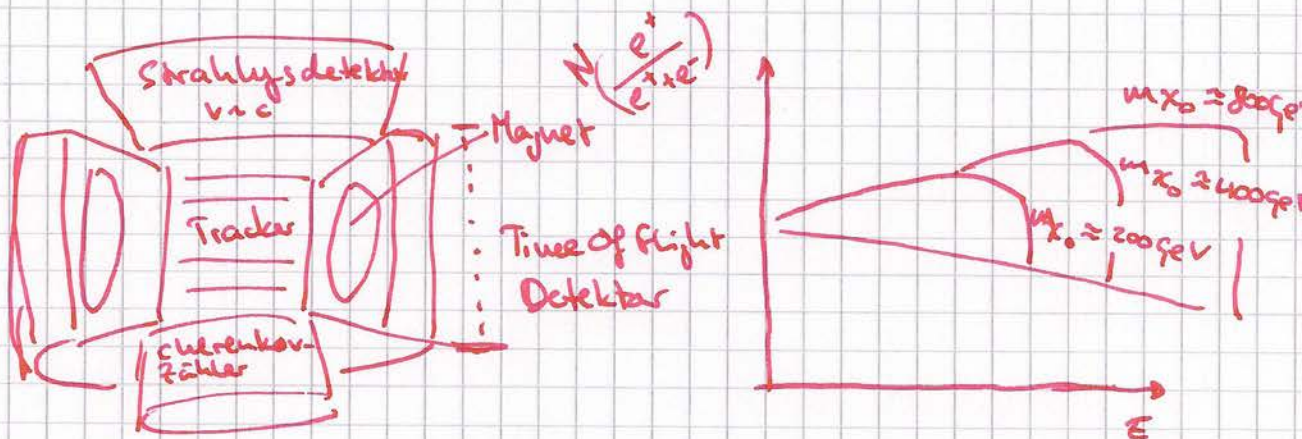
Rate allerdings sehr gering! Zerfallskanal abhängig von χ_1^0 -Massen und Flavorauswahl

Suche nach "goldenem WIMP-Signal"

=> γ Linie aus Prozess 2. Ordnung bei $M(\gamma) = M(\tilde{\chi}_0^0)$

bisher kein Signal

Suche nach $\bar{p}, e^+$ Überschuss bei AMS



Direkter Nachweis via Kernrückstoß am Detektor

=> $v_{\chi_0} \approx 270 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ => nichtrelativistische Kinematik

$$R = N_{\text{kern}} \langle \phi \rangle \langle G_{SI/SD} \rangle$$

Rate $\nearrow$

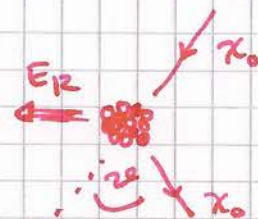
$\nwarrow$ QM Effekt $\nearrow$ Fluss der WIMs $\nearrow$ axialer (SD) / skalärer (SI) WQ

"thermalisierte" WIMPs folgen Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung

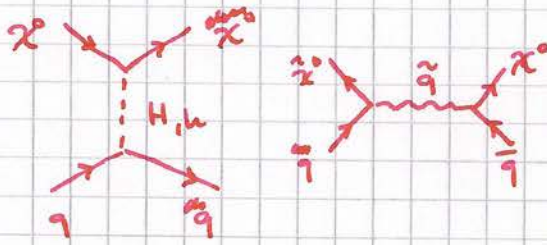
$M \dots$ reduzierte Masse

$$E_R = 2 \frac{M}{m_{\chi} + m_N} E_{\text{kin}} (1 - \cos \vartheta)$$

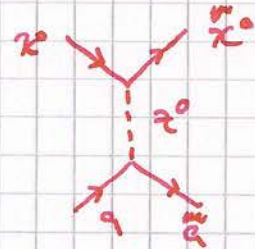
auch möglich: Streuung an Nukleonen und Protonen



Spin independent



Spin dependent



(dominant in vielen SUSY Modellen)

Bei skalares WIMP - Streuung trägt Nukleonenzahl Kohärenz zur Streuung bei (QM-Prinzip)
(Effekt verschwindet, wenn Energie zu hoch $\Rightarrow$ de Broglie - Wellenlänge klein $\Rightarrow$ Kernstruktur "sichtbar")

Für Nachweis gut geeignet: schwere Kerne
(Germanium, Xenon, Silizium)

⚠️ Targets brauchen $J \neq 0$ um auf SD - WIMP - Streuung sensitiv zu sein

teilweise relativer Isotopenanteil bei $\sim 20\% / 10\%$ mit $J \neq 0$

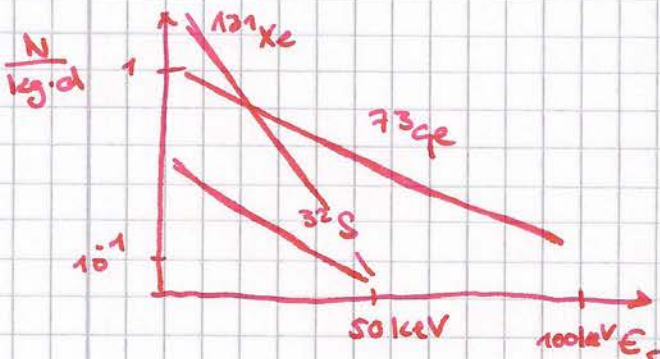
Bsp.:

^{73}Ge	41	$3/2$
^{129}Xe	75	$1/2$
^{131}Xe	77	$3/2$

$$R \approx 4 \cdot 0.0001 \frac{1}{\text{kg} \cdot \text{d}}$$

$\Rightarrow$ Targetmasse von $> 100\text{kg}$ notwendig

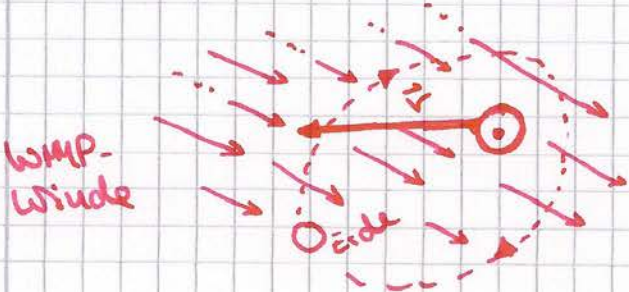
Rückstoßspektren (Voraussage)



Spektrum abhängig vom jeweiligen WIMP Halomodell
(mehr $m_{\chi_0} \Rightarrow$ weniger Rate)

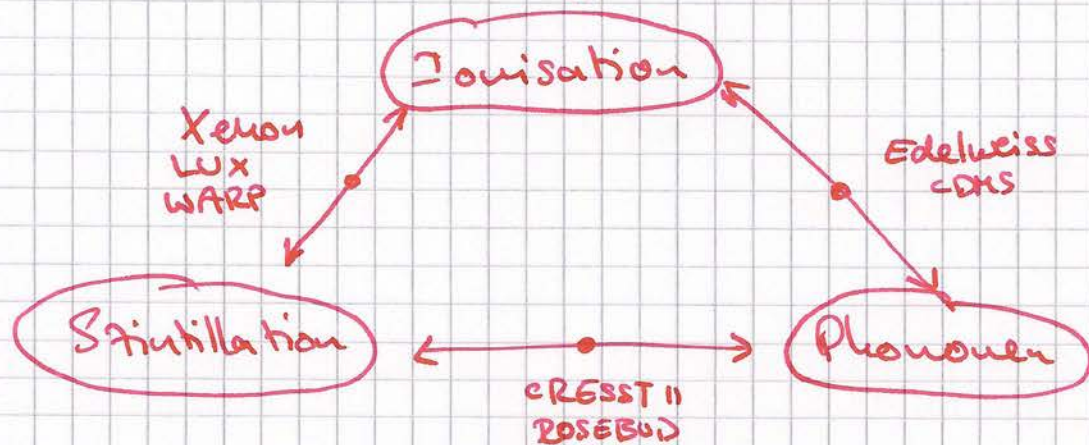
Detektor muss ggf. auf sehr niedrigen Rückstoß ausprechen

Rate oszilliert über das Jahr

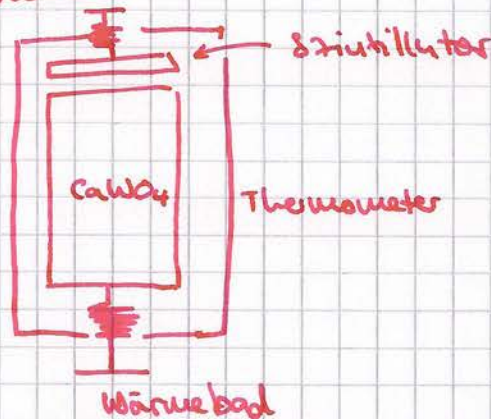


in Gasdetektoren führt χ_0 -Streuung zu kleiner aber messbarer Temperaturschwankung

WIMP Nachweis über je 2 Parameter



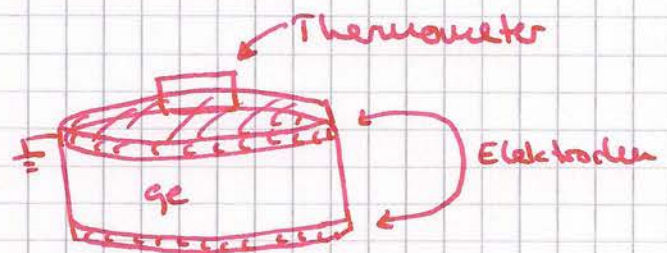
CRESST II:



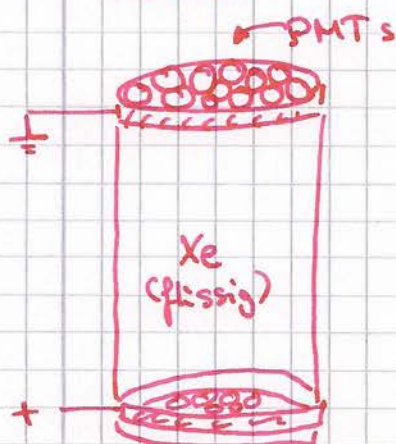
- 1% der Energie landet als Licht im Scintillator
- Detektor aus CaWO_4
- Experiment in Wärmebad gelagert
- Phononen werden von Thermopile erfasst

Edelweiss / CDMS:

- Thermometer / Elektroden messen ~~alle~~ Phononen und Ionisation
- Kaltgelagerter Germaniumdetektor
- bis zu 20% der Energie als Ionisation messbar
- Kernrückstoß erzeugt hohe spezifische Ionisationsdichte

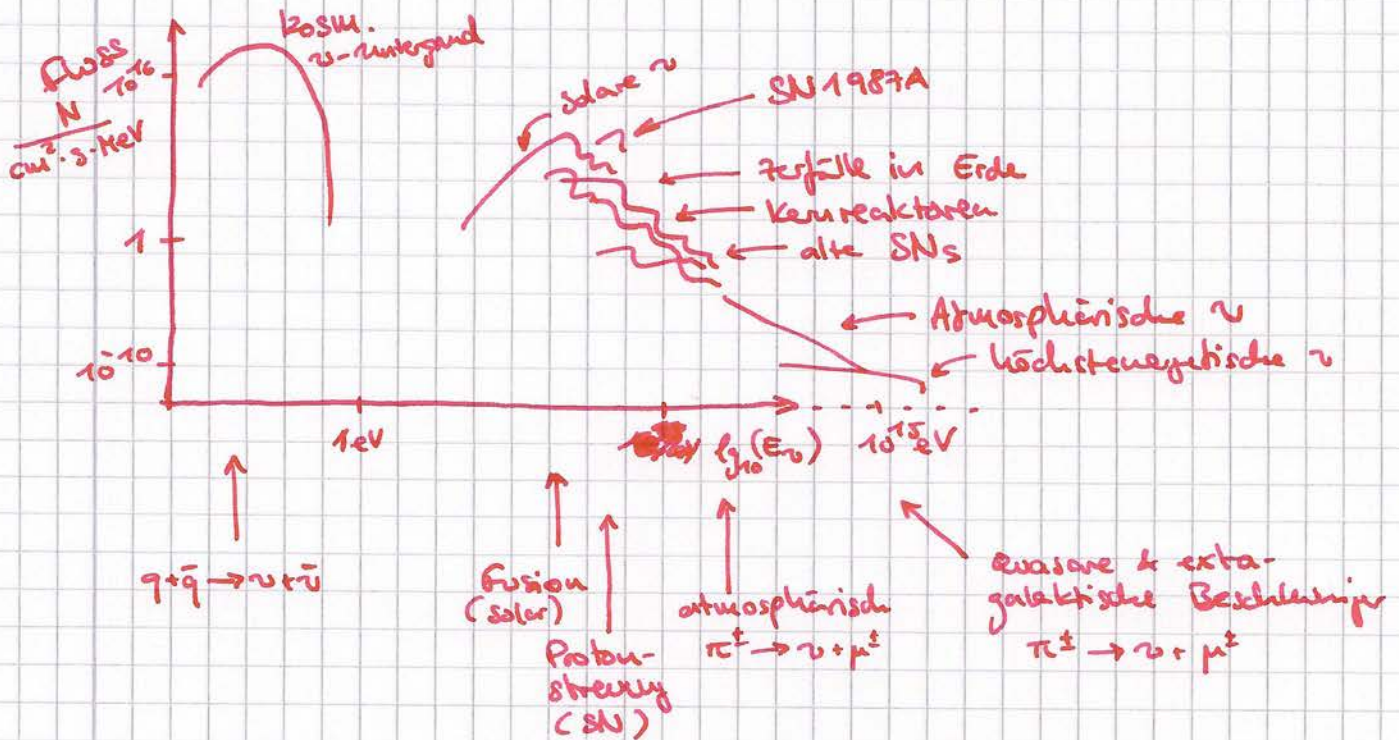


XENON



- flüssiges Xe wegen hoher Dichte (3 g/cm^3) und hoher Ordnungszahl
- in zwischen 3.5t Xe
- $2 \cdot 10^{-23}$ bu bei $m_{\tilde{\chi}_0} \approx 100 \text{ GeV}$

Neutrinos



terrestrische Quellen (rel. hoher Fluss)

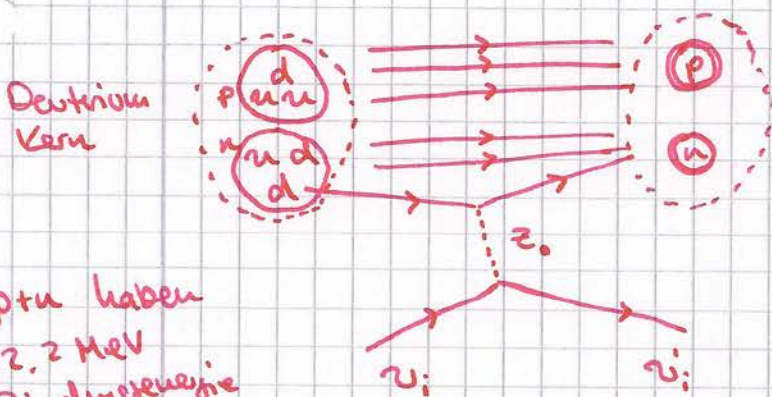
- Geoneutrinos (^{238}U , ^{232}Th) $\sim 5 \text{ MeV}$
- Kernreaktoren (β , α , P) $\sim 5 \text{ MeV}$

10-50 Reaktionen pro 10 kT Strahlungsleistung

Nachweis (schweres Wasser):

ν reagiert mit n
 $\bar{\nu}$ reagiert mit p

NC:



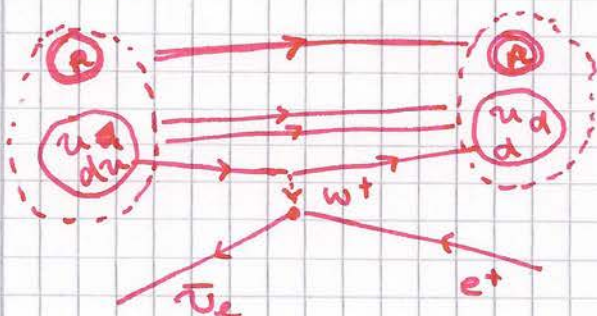
$p+n$ haben
 $\sim 2.2 \text{ MeV}$
 Bindungsenergie

$$6 \times 10^{17} \text{ bn}$$



verzögerte Koinzidenz-Signatur!

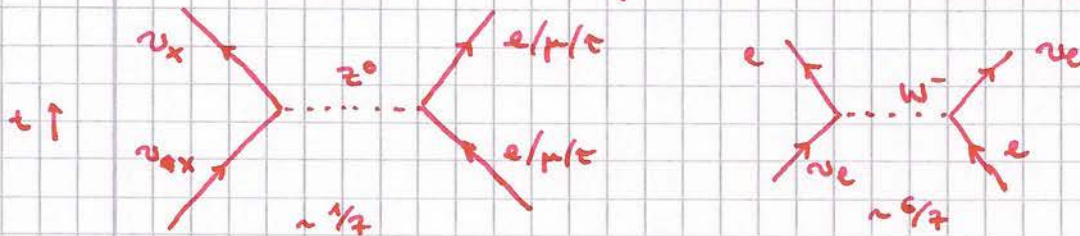
CC:



(inverse β -Zerfall)

erster Nachweis 1954

Nachweis: elastische Streuung $\rightarrow$ Cherenkov-Strahlung



ν -Nachweis an Cherenkov Detektoren ergibt für ν_e einen Sensitivitätsüberschuss wegen charged current Anteil an Streuamplitude

$$\epsilon(\nu_e) : \epsilon(\nu_\mu/\nu_\tau) = 7:1$$

Nachweis von Neutrinos $\rightarrow$

- solares Neutrino problem
- Neutrinooszillation
- UHE ν_s

Neutrinooszillation* NP 2015: McDonald / Kajita

*nicht wirklich OZ, eigentlich nur disappearance Kanal entdeckt

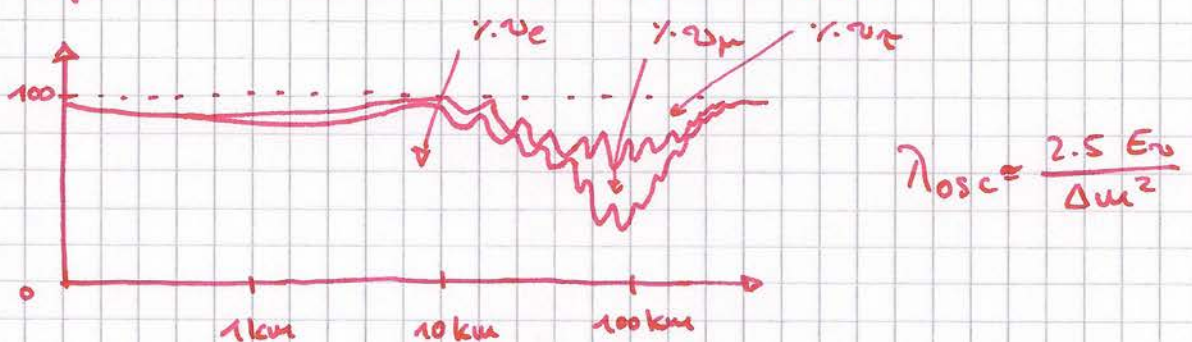
$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \cdot \frac{L}{E_{\nu_i}}\right)$$

$\uparrow$ Mischungswinkel $\uparrow$ Massendifferenz $\nwarrow$ Abstand / Energie

$$= |\cos\theta \sin\theta (1 - e^{i\Delta m^2 L / 2E_{\nu}})|^2$$

$\Rightarrow$ Neutrinos haben Masse
 $\Rightarrow$ Oszillationslänge abh. von Massendifferenz und Energie!

Bsp.: Reaktor-neutrinos ($E_{\nu} \approx 1 \text{ MeV}$)



Bei großer Distanz ($\sim 10000 \text{ km}$) trennen sich Wellenpakete: Propagation in Massen EZ $\neq$ Flavour EZ

$$|\nu_e\rangle = (\alpha|\nu_1\rangle + \beta|\nu_2\rangle + \gamma|\nu_3\rangle)$$

PonteCorvo Maki Nagakawa Sakata - Matrix :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta_{23} & \sin \vartheta_{23} \\ 0 & -\sin \vartheta_{23} & \cos \vartheta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta_{13} & 0 & -e^{-i\delta} \\ 0 & e^{-i\delta} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta_{12} & \sin \vartheta_{12} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Mischung

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$$

$$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$$

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$$

Winkel

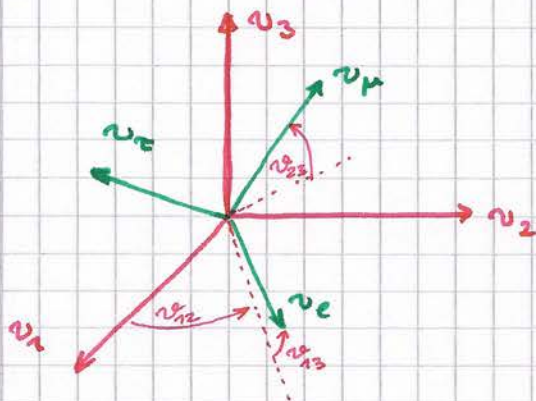
$$\sin^2 2\vartheta_{12} \approx 0.86$$

$$\sin^2 2\vartheta_{23} \approx 0.98$$

$$\sin^2 2\vartheta_{13} \approx 0.1$$

CP - Phase

δ bisher nicht eindeutig bekannt
($\delta \approx 300^{+66}_{-138}$)



bei Propagation

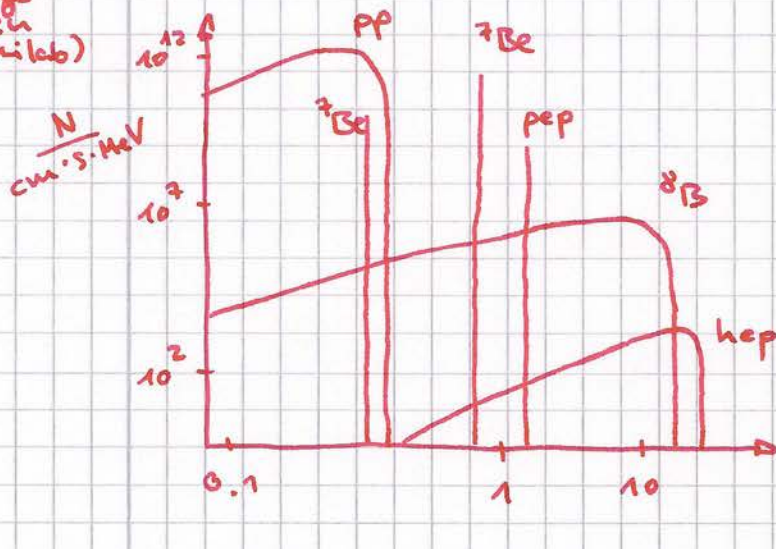
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta(0) | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 = \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 c^4}{4E} \frac{L}{\hbar c} \right) \sin^2(2\vartheta_{\alpha\beta})$$

Fun Fact:

bisher wurden 12 τ -Neutrinos direkt nachgewiesen (Fermilab)

$\Rightarrow$ Lösung des solaren Neutrinoproblems

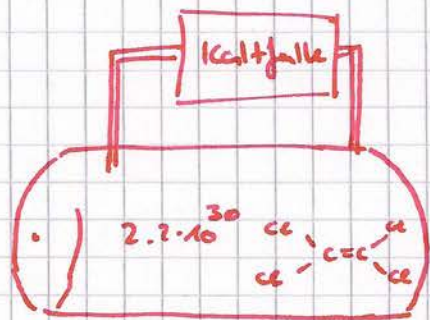
Solarer Neutrinofluss:



Häufigkeit



Nachweis Solare Neutrinos:
Bsp.: radiochemisches Experiment: HOMESTAKE



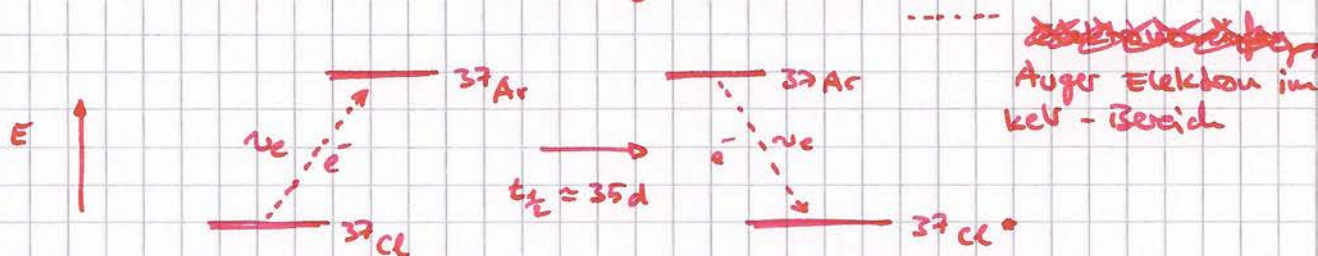
• großer Behälter mit flüssigem Targetmaterial

• 380000 l Tetrachlorethen

• Exposition für mehrere Wochen des Targetkerns ${}^Z A$



• ${}^{Z+1} A$ -Kerne werden radiochemisch extrahiert und gezählt



ΔEinfanglimit $\Delta E = 814 \text{ keV}$ ($\Rightarrow {}^7 \text{Be}, {}^8 \text{B}, \text{hep Neutrinos}$)

NP für Ray Davis 2002

• insgesamt 108 ${}^{37} \text{Ar}$ Extraktionen (1970-1993) $\sqrt{1 \text{ SNU}} = 1 \frac{\text{Reaktion}}{\text{Sekunde} \cdot 10^{36} \text{ Targetatome}}$
(~ 0.48 Ereignisse pro Tag)

• etwa $\frac{1}{3}$ des erwarteten Wertes ($\Rightarrow$ solares ν -Problem)

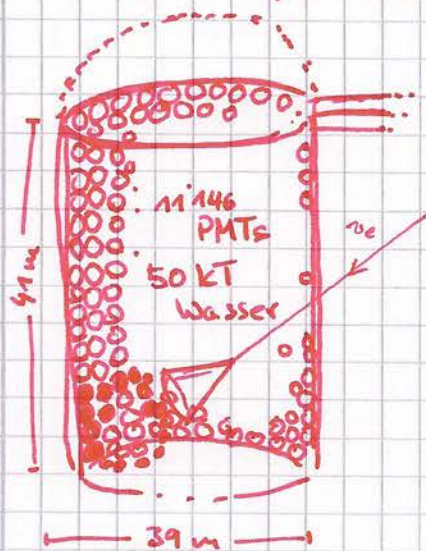
ähnliches Experiment: GALLEX (GaCl_3 -Lösung)



• GeCl_4 wird mit Stickstoff aus Salzsäurelösung gespült und „gezählt“.

Nachweis über Cherenkov-Detektoren

Bsp.: Superkamiokande

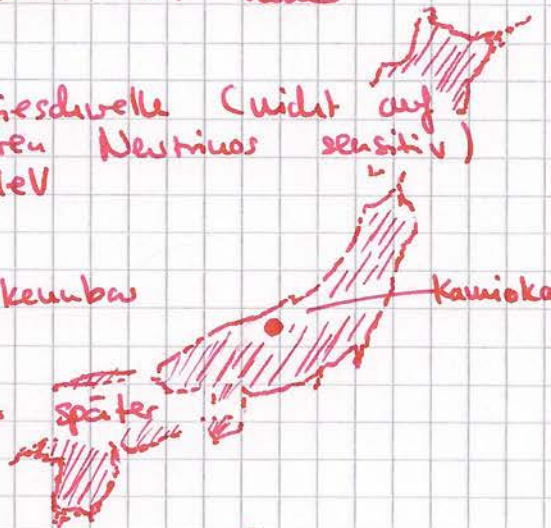


• Echtzeitdetektor mit hoher Statistik

• hohe Energieschwelle (nicht auf alle solaren Neutrinos sensitiv)
 $E_{\text{Thresh.}} = 5 \text{ MeV}$

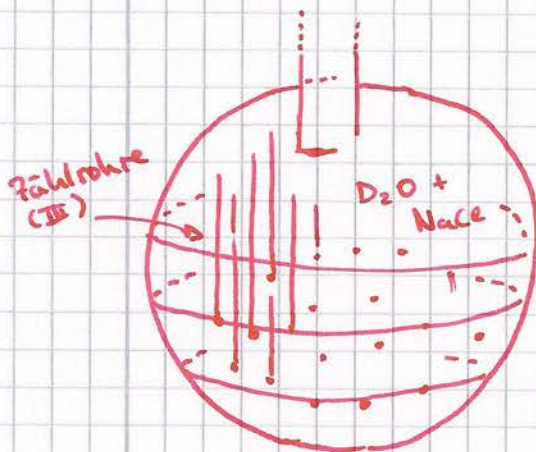
• Richtung erkennbar

näheres dazu



Bsp.: SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

nuclear Deuterium-Cherenkov-Detektor



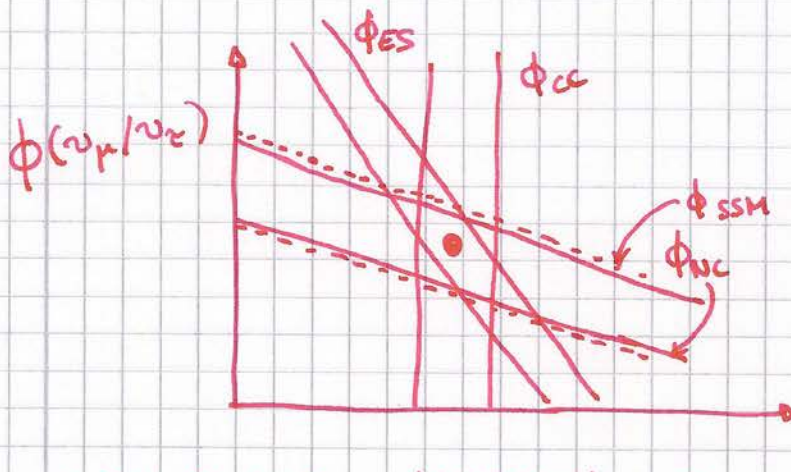
Trick 17: 3 phasiges Experiment

I: reines D_2O

II: + NaCl (Salz)

III: + NCD-Zählrohre

⇒ separater Nachweis von CC & NC & ES
 ⇒ Ereignisse nicht auf γ 's sensitiv



SNO löst solares Neutrino-problem durch Flavourmischung
 NP 2015 McDonald (Kajita)

• CC-Reaktion bevorzugt ν_e

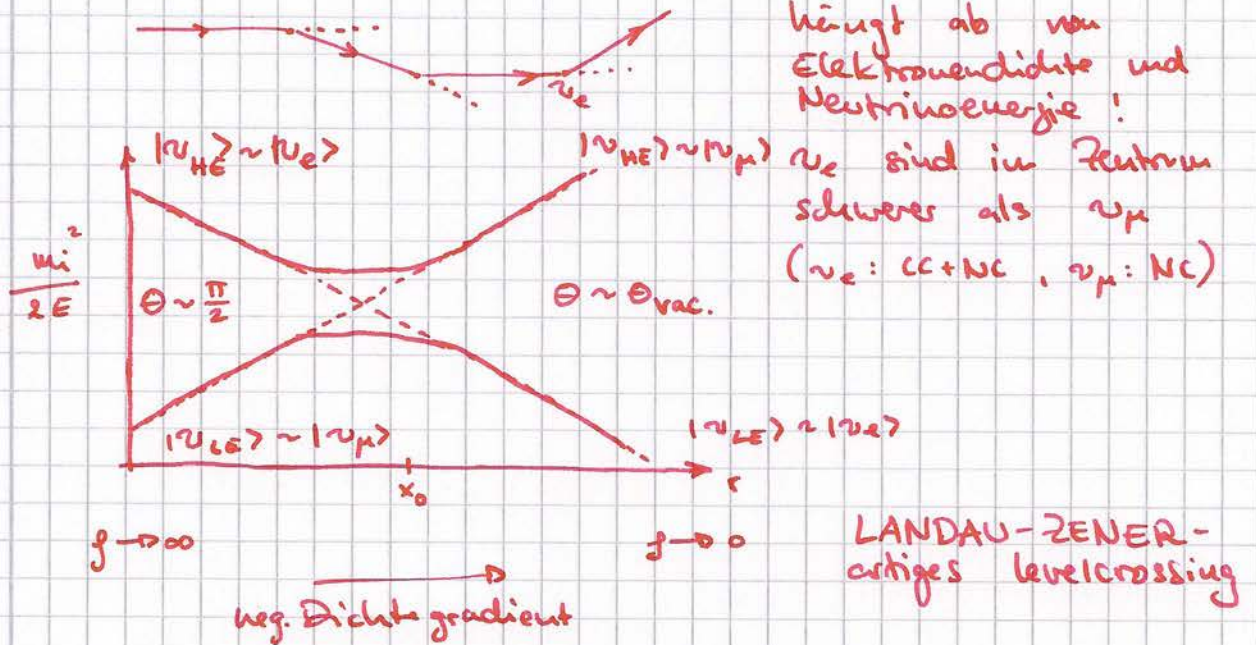
• NC/ES-Reaktion gleichmäßig auf Flavour verteilt

Vakuumoszillation (Distanz Erde $\leftrightarrow$ Sonne)
kann sol. Neutrinoproblem nicht alleine
erklären:

MSW - Effekt:

Mikheyev
Smirnov
Wolfenstein

durch WW mit Materie (e^-)
in Form von kohärenter
elastischer ~~Elektronen~~ Vorwärtsstreuung
erhalten ν_e -s eine effektive Masse



⇒ Oszillation wird verstärkt

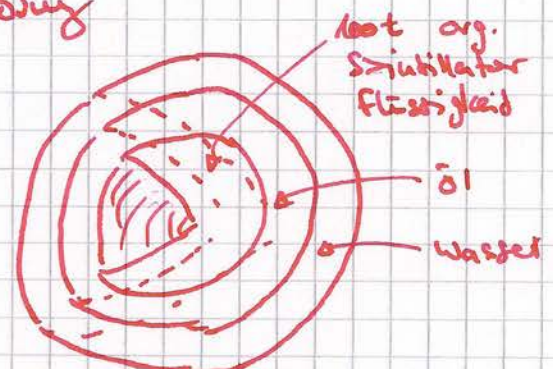
Experimenteller Nachweis und Bestätigung der
LMA Hypothese: BOREXINO

^7Be - Linie wird in Echtzeit untersucht

Problem: ν -Untergrund aus ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K

⇒ Russian-Poll Prinzip zur Abschirmung

Borexino bestätigt LMA Lösung



Solare Metallizität Z ($\equiv$ Anteil Elemente schwerer als He)

Kern Temperatur T_c hängt mit Z zusammen, außerdem:

$$\phi(^7\text{Be}) \sim T_c^8 ; \phi(^8\text{B}) \sim T_c^{25}$$

$$Z = 2\% - 4\%$$

(100% Fehler $\frac{1}{2}$) $\Rightarrow$ Fluss / Bestimmung der $^7\text{Be} / ^8\text{B}$ ν -Linie liefert T_c und Z (Borexino)

Erwartung ($^7\text{Be} - \nu$ $\frac{N}{d \cdot 100t}$):

Resultat:

LMA, low Z

LMA, high Z

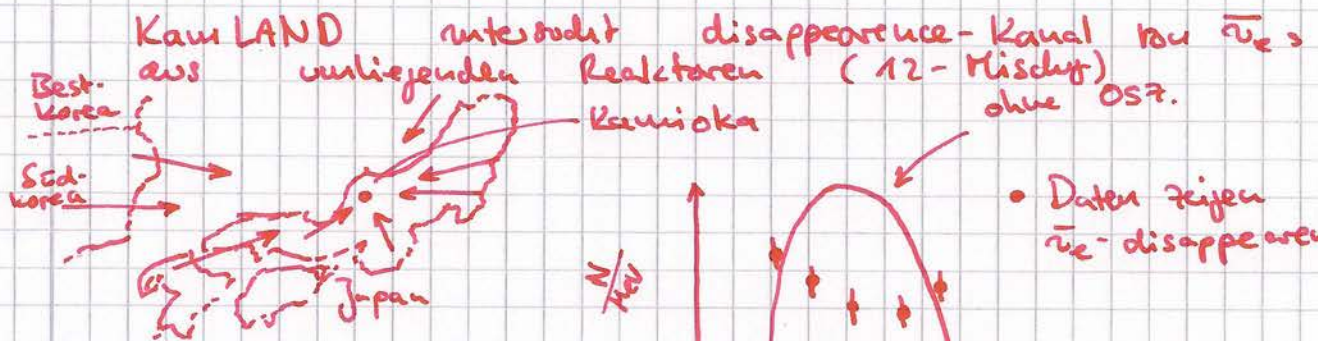
$$44 \pm 4$$

$$48 \pm 4$$

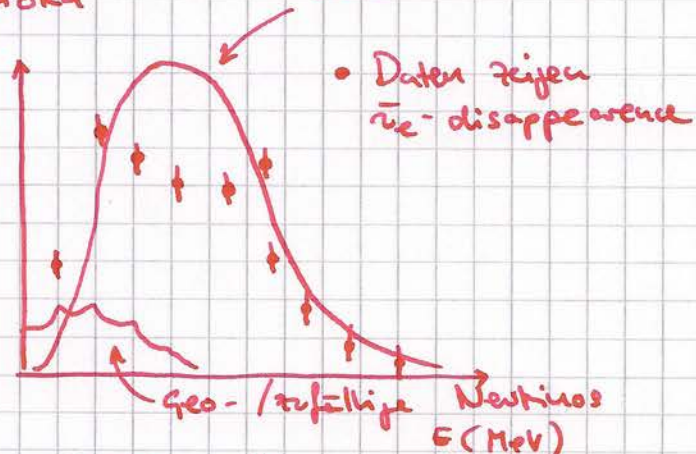
$$46 \pm 2$$

$\Rightarrow$ keine neuen Erkenntnisse innerhalb SM

Prüfen der LMA Hypothese mit Reaktorneutrinos (Oszillationslänge einige km)



Abstand der Erzeugung nicht direkt messbar, allerdings L/E_ν !

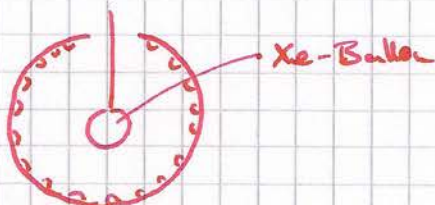


$\Rightarrow$ KamLAND beobachtet zwei volle Oszillationszyklen durch Analyse von $\frac{\langle L \nu \rangle}{E_\nu}$.

Erster echter Nachweis von Oszillation & LMA.

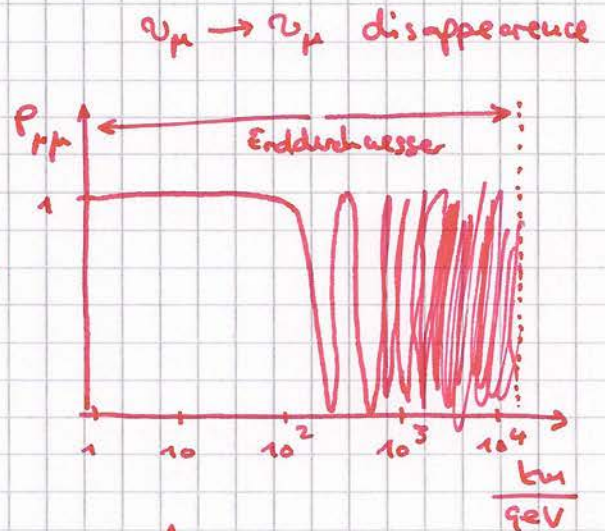
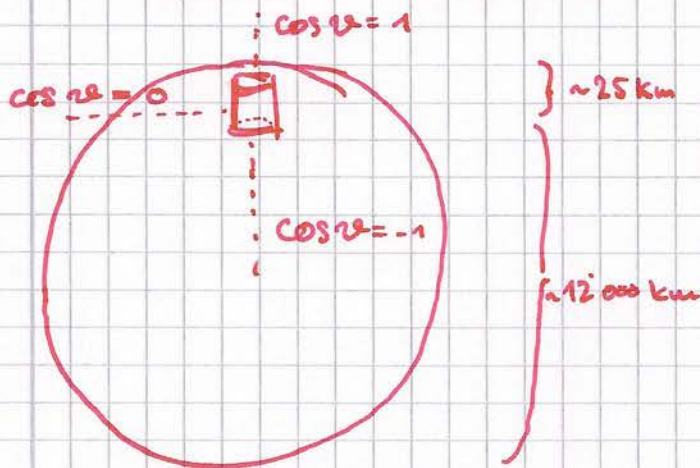
$\Rightarrow$ Breakthrough-Preis an Atsuto Suzuki

Heute: Suche nach Aufriss von ^{136}Xe

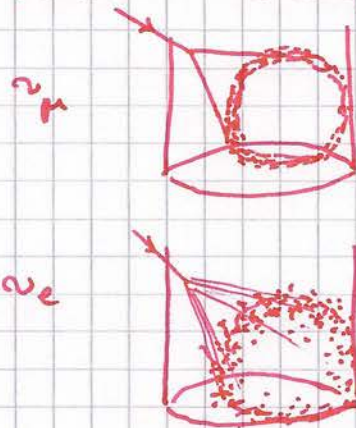


Siehe auch 23 - Mischungswinkel bei Superkaonikande durch ν_μ -disappearance in Atmosphäre
 atmosph. Neutrinos werden in π -Zerfallskette mit Verhältnis $\nu_\mu : \nu_e = 2:1$ erzeugt.

Superkaonikande kann Richtung auflösen
 (Cherenkov-Technik)



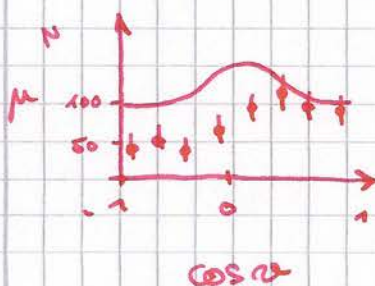
Art des Cherenkov-kegels lässt auf Neutrino-Flavour schließen



gerade Spur, definierte Kegel

elektr. magn. Schauer, diffuser Kegel

Zuirkorrelation multi-GeV ν



— MC ohne Oszillation
 • Daten

μ -Ereignisse zeigen $\frac{\mu_p}{\text{down}}$ -Verh. von ~ 0.54

$\Rightarrow$ 6.26 - Effekt im disapp.-Kanal

Evidenz für ~~atmosph.~~ Oszillation atmosphärischer Neutrinos

$\Rightarrow$ erste Physik "beyond SM"
 NP 1998 Takaaki Kajita

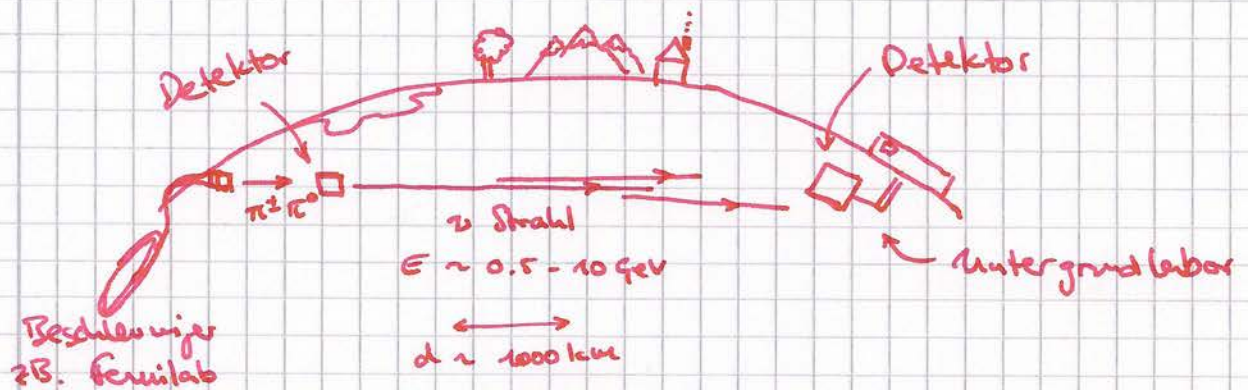
Long Baseline Oszillationsexperimente

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ disappearance $\rightarrow \theta_{23}$
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance $\rightarrow \theta_{13}$, CP-Phase
- $\bar{\nu}_\mu / \nu_\mu$ vs. $\bar{\nu}_e / \nu_e$ $\rightarrow$ CPT-Verletzung

Wie erzeugt man einen Neutrinostrahl?

$\Rightarrow$ Protonen auf ^{12}C Target $\rightarrow$ erzeugt Pionen

$\Rightarrow$ Bremsung / Zerfall liefert ν_μ und $\bar{\nu}_\mu$



naher Detektor / ferner Detektor liefern disapp. / app. Verhältnisse

Reaktoren als $\bar{\nu}$ Quelle $\Rightarrow \theta_{13}$ -Messung

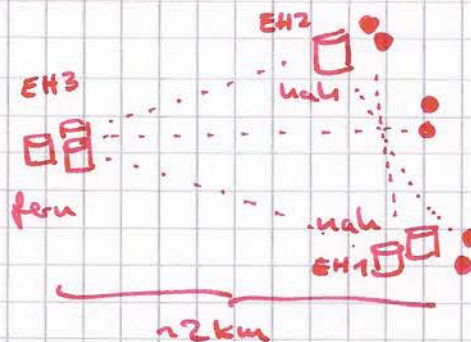
Wettrennen dreier Experimente:

- Double (Frankr.) (3)
- RENO (Südkorea) (2)
- Day Bay (China) (1)

original aus Frankreich
Gewinner waren die Chinesen

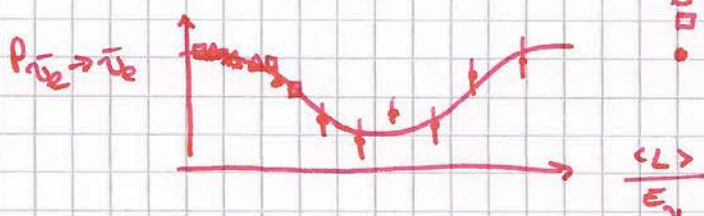
$$\rightarrow \sin^2(2\theta_{13}) = 0.092 \pm 0.016 \quad (5.2 \sigma)$$

6 Reaktoren, 6 Detektoren



• Reaktor
• Detektor

- ultimative Aufbau
- regelrecht aus dem Boden gestampft
- nur 55 Tage Messzeit



Δ EH1
□ EH2
• EH3

es verbleibt ν nach ν -CP-Phase

$\rightarrow \nu$ sind HDM Kandidat (anteilig!)

Sacharow - Kriterien für DM:

- I CP- & C- Verletzung
- II kein therm. dyn. Gleichgewicht
- III Baryonenzahlverletzung (in GUT bleibt (B-L) erhalten)
 $\Rightarrow L$ auch verletzt

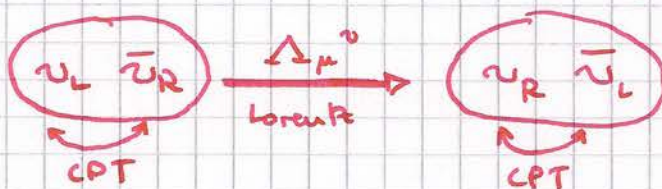
Majorana ν 's würden in gewissen Prozessen die Leptonenzahl verletzen.

Mehr Forschung an ν 's $\Rightarrow$ Tor zu Physik BSM

- Massen (m_i)
 - genauer Mischungswinkel (θ_{ij})
 - Majorana-Phasen (α_2, α_3)
 - Dirac / CP-Phase (δ)
 - Lebensdauer (τ_i)
 - ...
 - ...
 - Kopplung an Higgs? sterile Neutrinos?
- komplex!
reell!

bisher unbekannt: Teilchen- / Antiteilchensymmetrie

Dirac:



extrem unterdrückt
wegen $v \approx c$

$$\Delta L = 0$$

Majorana (Drexlin's Präferenz!!!):

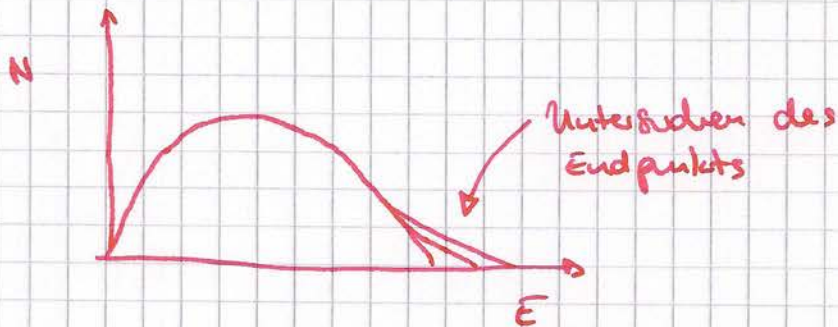


$$\Delta L = 2 \quad (\frac{1}{2})$$

Bestimmung der Neutrinomasse:
Beste Möglichkeit β -Zerfall

e^- -Spektrum:

$$\frac{d\Gamma}{dE} \sim \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2}$$

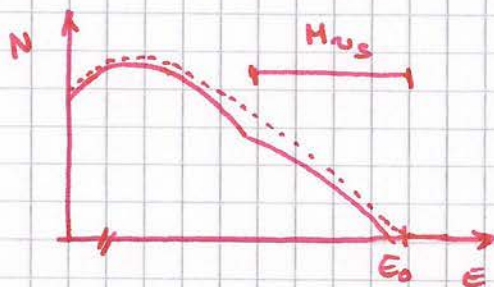


Bsp.: KATRIN



außerdem: Suche bei KATRIN nach WDM
(sterile ν 's!)

Knick im β -Spektrum - falls vorhanden - gibt
Masse im sterilen Neutrinos an



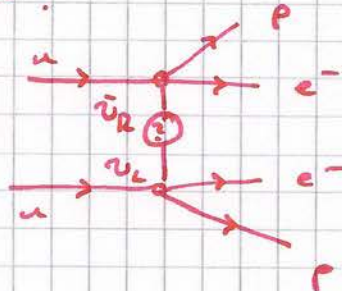
ν_s werden über An-
kopplung an aktive
Flavour ν 's erzeugt.

ebenfalls wird im e^- Spektrum nach $0\nu\beta\beta$ gesucht

$\Rightarrow \Delta L \neq 0 \Rightarrow$ Majorana ν 's

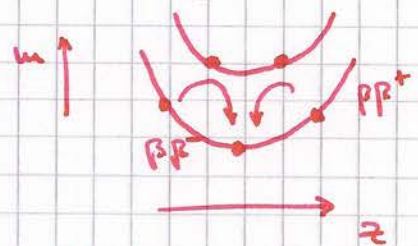
Neutrino annihiliert im
Kern!

Austausch-
teilchen (ν)
muss wegen
Unschärfe-
relation
virtuell sein.



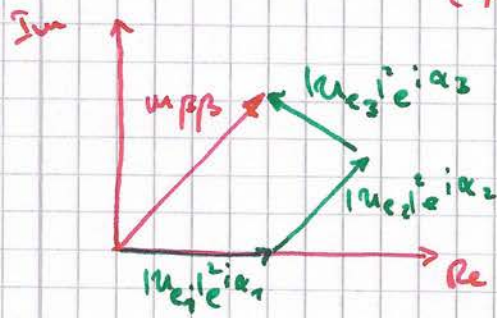
Majoranamassenterm
zur Beschreibung notwendig

nur bei gg -Kernen
möglich!



Erttore Majorana verschwindet 1938 im
Alter von 32 Jahren unter mysteriösen
Umständen in Palermo.
Einstellung der Ermittlungen 2015.

Majorana - Masse ist eine komplexe Größe!
($\neq$ normale Masse)



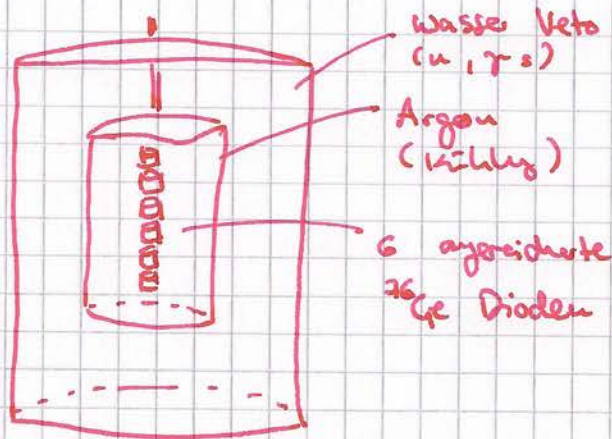
$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i e^{i\alpha_i} \right|$$

$\Rightarrow$ falls Imaginärteil nicht verschwindet: Beitrag zur Materie - / Antimaterie - Asymmetrie

berühmtes Experiment: Heidelberg Moskau

$\Rightarrow$ bisher keine Ergebnisse

anderes Exp.: GERDA

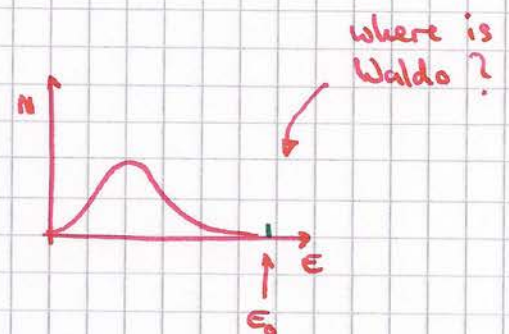
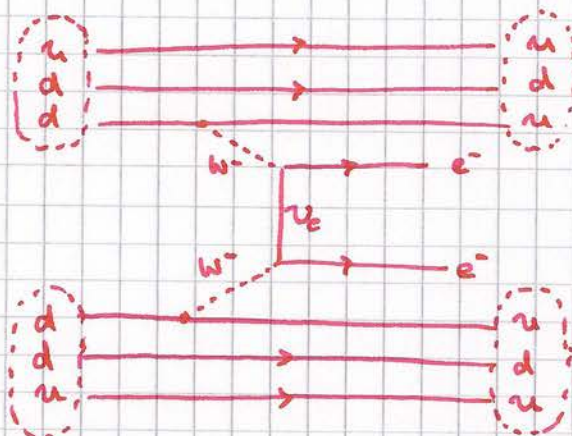


Untergrundrate
 $B \approx 0.02 \frac{\text{N}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{y}}$

auch hier bisher kein $0\nu\beta\beta$ nachgewiesen

andere: MAJORANA, CUORE, EXO, SNO, KamLAND

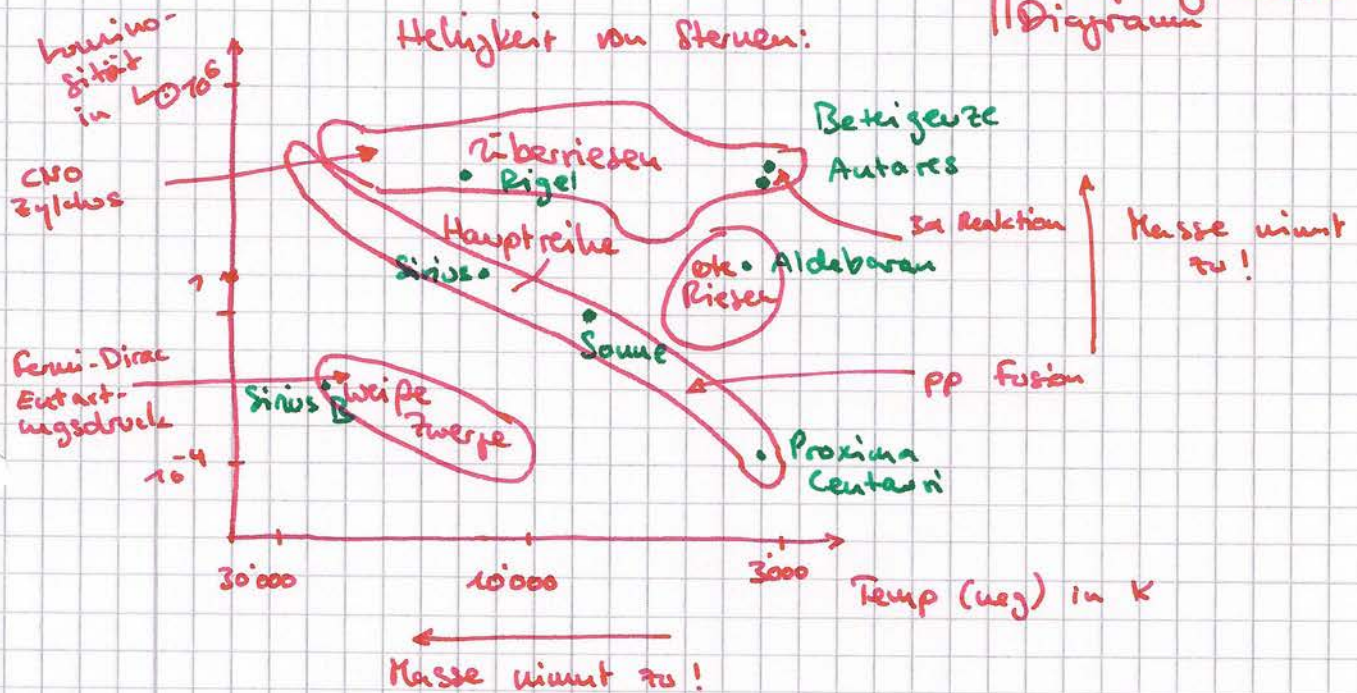
Ausblick: größere Detektoren, mehr Sensitivität



Supernovae / Sterne:

- starke ν -Quellen
- vergleichbare Helligkeit
- Standardkerzen

Hertzsprung-Russell-Diagramm

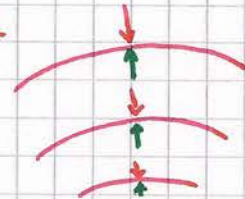


Entwicklung entlang der Hauptreihe:

Gleichgewicht von Druck & Gravitation

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) \frac{GM(r)}{r^2}$$

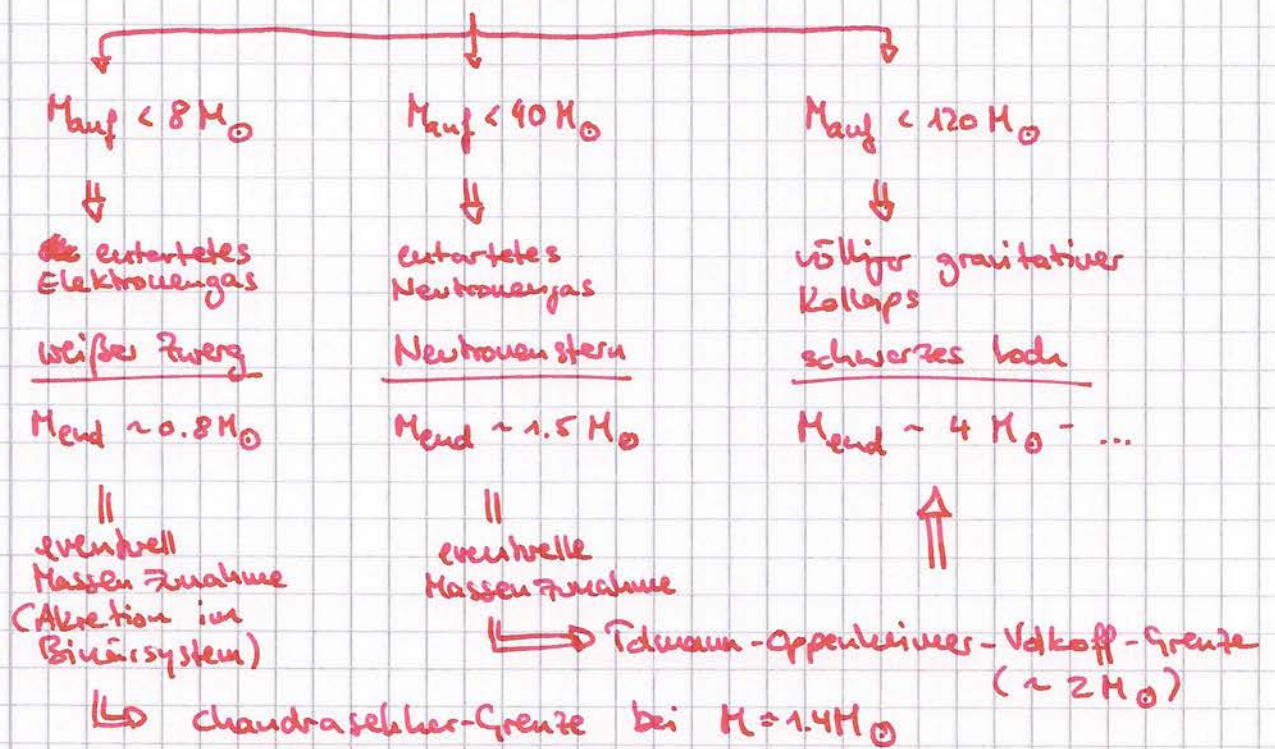
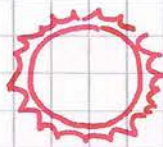
an jeder "Schale"!



Bei Ungleichgewicht von Gas- & Strahlungsdruck mit Gravitation nimmt Temperatur T ab bis neues Gleichgewicht erreicht ist.

- nach Verbrauch des H $\rightarrow$ Triple α -Reaktion $\Rightarrow$ alter Riese
- innerer Kern des r. Riesen erreicht stabile Endkonfiguration, langsames Abkühlen, (C, O) $\Rightarrow$ weißer Zwerg (nur für leichte Sterne)

(!) unvollständig!
siehe Foliensatz 24



Detonation:

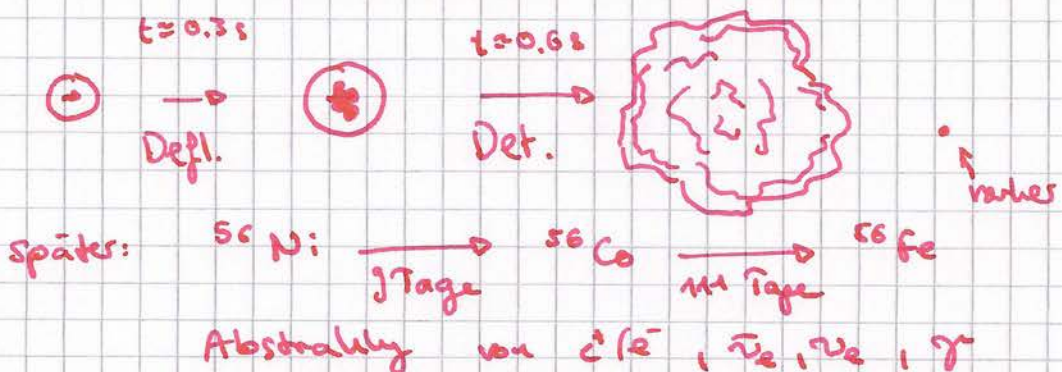
Brennfront schneller als Schallg.

Deflagration:

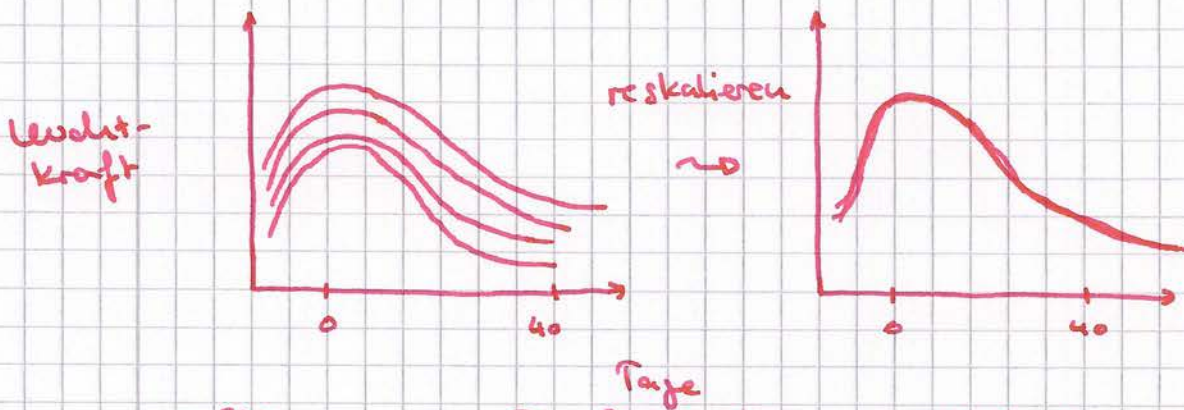
Brennfront langsamer als Sch.

• SN Ia (thermonukleare SN)

- Findung der Fusion von $^{12}\text{C} / ^{16}\text{O}$ zu ^{56}Ni
 $\rightarrow$ etwa die Hälfte des Sterns wird schlagartig zu ^{56}Ni fusioniert
- ebenfalls Fusion zu Si, S, Ca
- Materialauswurf mit $v \sim 20'000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$
- zunächst Deflagration mit großer Flammenoberfläche (Rayleigh Taylor Instabilitäten)
 $\Rightarrow$ mittelschwere Elemente
- danach thermonukleare Detonation $\Rightarrow$ ^{56}Ni -Brennen



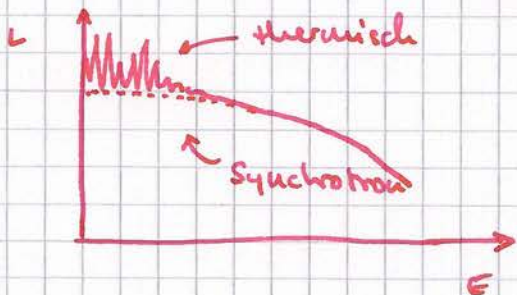
empirische Philips Beziehung:



- SNe von Typ Ia können reskaliert werden um "Masterkurve" zu Leuchtkraft zu finden.
- Rotverschiebung nimmt mit Laufzeit des Lichtes zu



SN Überreste (SNRs) geben Aufschluss über Elementsynthese. Spektrum:



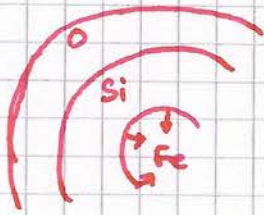
- Schockfront erhitzt expandierendes Gas $\rightarrow$ therm.
- Elektronen emittieren Strahlung im Magnetfeld $\rightarrow$ Synchr.

SN- Hellen sind Teilchenbeschleuniger! (siehe ATP 1)
 $\Rightarrow$ erzeugen u.a. γ im TeV-Bereich
 (SNIa $\rightarrow$ 99% der Energie in expandierender Hülle!)

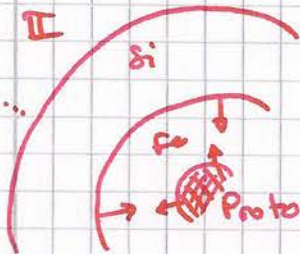
- SN Ia (extrem selten)
 - $\rightarrow$ Gravitationskollaps des ^{56}Ni : Kern eines überlebten
 - $\rightarrow$ Neutronenstern / schw. Loch bleibt übrig
- Kernkollaps SNe
 - $\rightarrow$ extrem ~~massereiche~~ massereiche Sterne fusionieren im Kern bis ^{56}Fe $\rightarrow$ kein Strahlungsdruck
 - $\rightarrow$ Gravitationskollaps
 - $\rightarrow$ heißer Auswurf und Neutronenstern / schw. Loch (Kern hat Chandrasekhar Limit!)

Kernkollaps SN

I Fe-Kern kollabiert bei $M_K \approx 1.4 M_\odot$

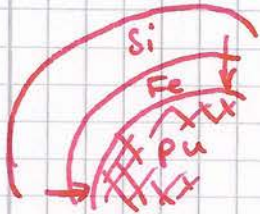


- Strahlungsdruck unterliegt Gravitation



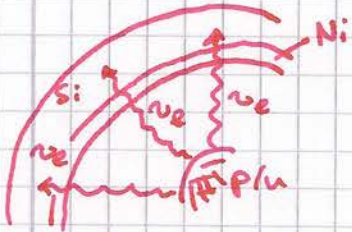
- Rückprall an p/n Kern
- Deleptonisierung (e^- -Einfang) beginnt
- "Kern Bounce"

III Schock stagniert kurzzeitig



- p/n Stern kühlt ab

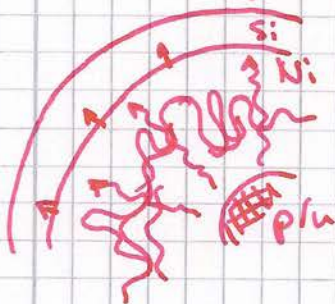
IV Neutrinos aus inv. β -Zerfall "heizen" neu auf



- Neutrinos tragen $\sim 99\%$ der Energie!
- asymmetrische Schockfront durch Rayleigh-Taylor-Instabilität

V Schock wird "wiederbelebt"

VI Verzögerte Explosion



- Neutrinoimpulse bringen Stern zur Explosion
- schwere Elemente werden in der Nähe des p/n Kernes erzeugt und z.T. ausgeworfen

Vergleich der SNa

SN I (a)

Ausgang: weißer Zwerg mit $M \approx 8 M_{\odot}$
(im Binärsystem!)

t: einige 10^7 Jahre bis SN

Auslöser: $^{12}\text{C}/^{16}\text{O}$ -Kern erreicht M_{Ch} ($\approx 1.38 M_{\odot}$)

was?: Kernfusion C/O $\rightarrow$ Ni

E: Bindungsenergie der Kerne $\rightarrow$ Umwandlung in 99% kin. Energie (SN - Auswurf)
 $\sim 10^{44}$ J

Rest: kein zentraler Überrest! nur Hülle!

Bsp.: SN 1572, Cassiopeia
-4 mag, aufgez. v. Tycho Brahe

SN II

Überriesse mit $M \approx 10 M_{\odot}$

$\sim 10^7$ Jahre

^{56}Ni -Kern erreicht M_{Ch}

Kernkollaps $\rightarrow$ p/n-Stern

Gravitationspotential des Sterns (Kollaps)
Umwandlung in 99% ν 's
 $\sim 10^{46}$ J

Kompaktes Zentralgestirn: BH / Neutronenstern

SN 1054, Stier
-6 mag, aufg. v. chinesischen Astronomen
 $\rightarrow$ Krebsnebel, Pulsar im Zentrum

• SN Detektion via „Multi-Messenger-Analysen“

$\rightarrow$ GW (Quadrupolmoment durch Anisotropie wg. Rayleigh-Taylor-Instabilität)

$\rightarrow$ ν 's, SN Frühwarnsystem

$\rightarrow$ GRB's, leicht verspätetes Signal

Bsp.: SN 1987a $\rightarrow$ 24 nachgewiesene ν 's

$\rightarrow$ rekonstruierte Energie: $E \sim 10^{46}$ J

$\rightarrow$ 10s Neutrinopuls stimmt mit Modellen überein
(Abkühlen des p/n-Sterns & Deleptonisierung)

GRBs

Gamma Ray Bursts sind die energiereichsten EM-Prozesse überhaupt.

$$E_{\text{tot}} \sim 10^{45} \text{ J} \quad (\text{vergleichbar mit SN II})$$

$$E_{\gamma} = 0.1 - 100 \text{ MeV}$$

$$\langle E_{\gamma} \rangle \approx 250 \text{ keV}$$

GRBs sind isotrop verteilt

Ursachen: • Merger von Neutronen
→ BH & GRB (kurz)

• Gravitationskollaps eines Wolf-Rayet Sterns
→ BH & GRB (lang)

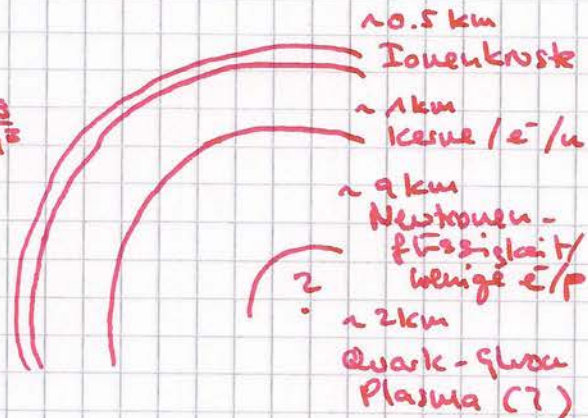


GRBs könnten Ursache höchstenergetischer kosm. Strahlung (UHECR) sein.

Neutronensterne

Gesamtdichte $\rho_{\text{NS}} \approx \rho(^{56}\text{Fe}) \approx 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

- typische Ausdehnung: 10 km - 20 km
- Dichte nimmt nach innen hin extrem zu!
- Stabilisiert durch Fermi-Dirac - Entartungsdruck & Pauli-Blocking (unterdrückt β -Zerfall)
- Typen:



Pulsar: Präzidierender NS, der ~~die~~ Radio-signale aussendet, welche wahrgenommen werden "pulsiert"

Magnetar: Rotationsperiode $< 10 \text{ ms}$! Konvektionsströme & Dynamo-Effekt sorgen für extremes Magnetfeld ($\sim 10^{11} \text{ T}$)

X-Ray Doppelsterne: akkretierender NS in Doppelsystem



Gravitationswellen (GW)

THEORIE:

- nichtlineare gekoppelte Feldgleichungen

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- enthalten Terme der Metrik $g^{\mu\nu}$
lineare Näherung 1. Ordnung zu flacher Metrik (Raumzeit) mit leichter Krümmung

$$h^{\alpha\beta} = g^{\alpha\beta} - g^{\alpha\beta} \sqrt{|\det g^{\alpha\beta}|}$$

liefert lineare Wellengl.

$$\square h^{\alpha\beta} = -16\pi T^{\alpha\beta} \approx 0$$

Fernfeldnäherung

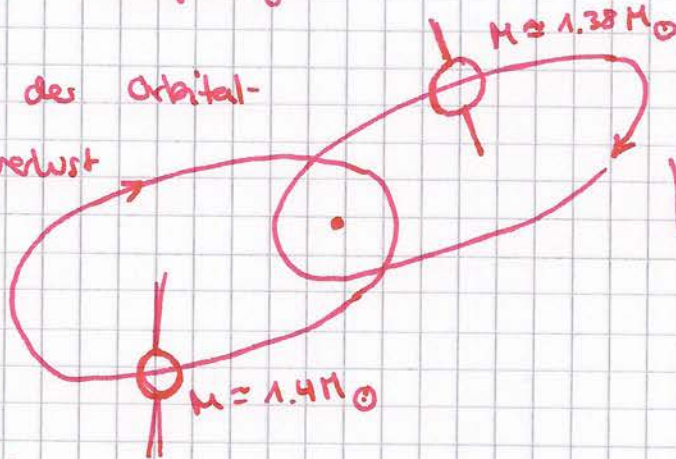
- Energietransport (Quellterm) erst ab 2. Ordnung möglich!
Energie-Impuls-Pseudotensor verschwindet nur in erster Ordnung $\Rightarrow$ nur in 1. Ordnung lineare Wellengleichung möglich!

GW werden durch "große" Objekte mit (dynamischem) Quadrupolmoment erzeugt.

Bsp.: Pulsar-Binärsystem PSR B1513-16 in 6 kpc Entfernung

- Abnahme der Orbitalperiode $\Rightarrow$ Energieverlust

$\Rightarrow$ indirekter Nachweis von GWs

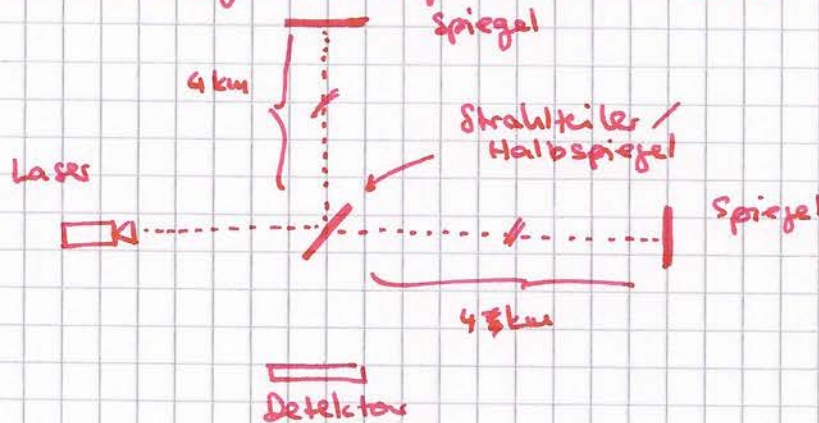


"Never measure anything but frequency!"

NP 1993 an Taylor-Hulse

Nachweis von GW:

- Zunächst Zylinder- / Kugelresonatoren & Piezokristalle
⇒ kein Ergebnis (angekündigter Nachweis 1969)
- Michelson-artiges Interferometer: LIGO

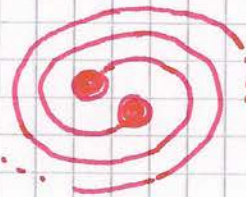


- Messprinzip:
- Anordnung wird auf destruktive Interferenz (Detektor misst nichts) eingestellt
 - GW verzerrt Lichtweg um $\sim 10^{-21}$ m
 - Rotverschiebung des Lichts minimal (→ keine Auswirkung)
 - Mit Oszillation der Raumzeit wird Signal durch konstruktive Interferenz am Detektor festgestellt.

⇒ erster Nachweis (direkt) von GWs am 14.09.2015

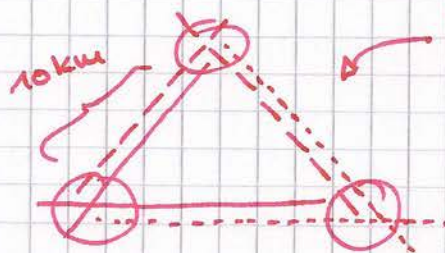
BH - Merging

$5 \cdot 10^{47}$ J werden in GWs abgestrahlt ($\sim 3 M_{\odot}$)



$$M_1 \approx 29 M_{\odot}$$
$$M_2 \approx 36 M_{\odot}$$

Ausblick: Einsteinoteleskop



3 Detektoren für mehr Genauigkeit.
 $f \approx 1 - 10^4$ Hz

eLISA: Weltraumteleskop (selbes Prinzip)

- Armlänge 10^6 km
- $f = 10^{-4} - 1$ Hz