

Messung der Neutrinomasse

Kurie-Plot: $K(E_e) = \sqrt{\frac{dN(E_e)/dE_e}{F(Z', E_e) E_e \sqrt{E_e^2 - m_e^2 c^4}}}$

⇒ erwartete Gerade
schneidet E-Achse
bei Maximalenergie
(für $m_\nu = 0$)

Atomare Zustände müssen sehr gut
verstanden sein. Optimal:

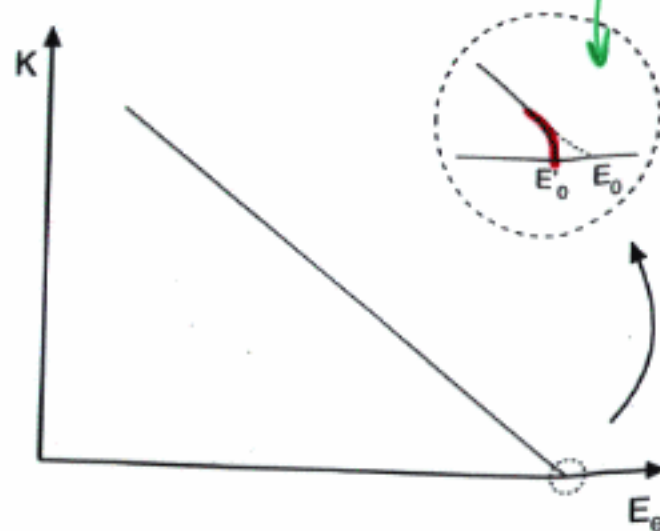


E_0 nur 18.6 keV

Bisher: keine Abweichung von
Null gemessen
(lange Zeit $m_\nu^2 < 0$,
mehrere Standardabweichungen.
War systematischer
Oberflächen-Effekt.)

Jetix Limit: $m_{\nu_e} < 3 \text{ eV}$

z.Z. im Bau: KATRIN - Spektrometer am Forschungszentrum
Karlsruhe, Sensitivität bis hinunter zu 0.2 eV



bei endlichem
 m_ν weicht das
Spektrum am
Endpunkt davon
ab.

E_0 aus Extrapolation
der Geraden
bestimmbar.

Abb. 17.20. Schematische Darstellung des β -Spektrums in der Kurie-Darstellung. Falls die Neutrinomasse von Null verschieden ist, muss die Gerade nahe der Endenergie E_0 abknicken und die Achse bei der Energie $E'_0 = E_0 - m_\nu c^2$ senkrecht schneiden.

Kollektive Kernanregungen

Drehimpuls - Entwicklung von elektromagnetischen Übergängen
(die U(1)-Eichinvarianz berücksichtigen: Photon immer transversal polarisiert)

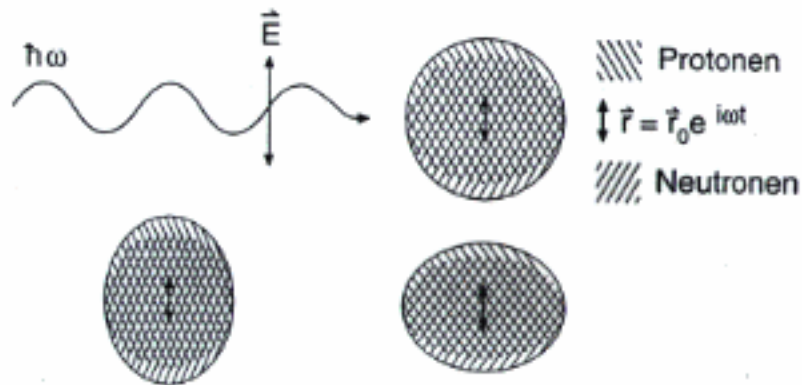
E1:	elektrischer Dipolübergang:	Parität ändert sich $\Delta J \leq 1$; $\propto E_\gamma^3$	dominant 2. Ordnung
M1:	magnetischer Dipolübergang:	Parität bleibt gleich $\Delta J \leq 1$; $\propto E_\gamma^3$	
E2:	elektrischer Quadrupolübergang:	Parität bleibt gleich $\Delta J \leq 2$; $\propto E_\gamma^5$	
:			:

Dipol - Resonanz : nukleare Photoeffekt: $^AX(\gamma, n)^{A-1}X$

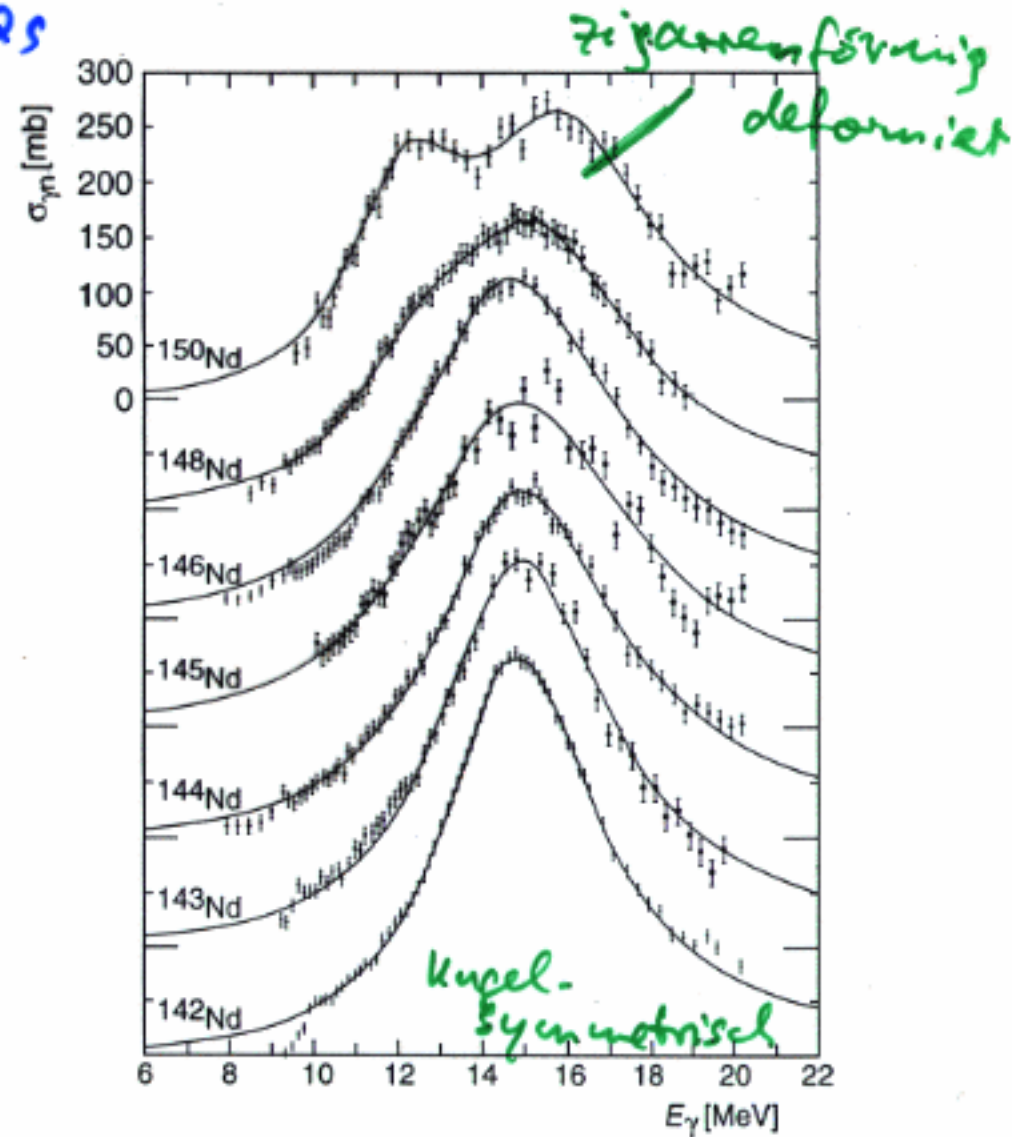
Anregungsenergie $\propto 2 \cdot$ Schalenabstand

^{142}Nd : 1 schmale Resonanz $\rightarrow$ schwerere Isotope: Aufspaltung in 2 Resonanzen
 integ. WQ $\propto$ Summe aller Einteilchen - WQs
 der äußersten Schale

Erklärung: Kollektive Schwingung aller
 Protonen gegen alle Neutronen

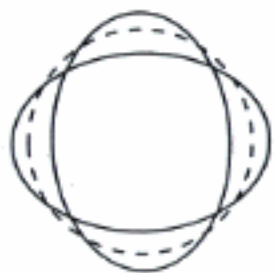


Für deformierte Kerne: unterschiedliche
 „Resonanzfrequenzen entlang der großen
 und kleinen Hauptachse $\rightarrow$ Aufspaltung
 in 2 Resonanzen

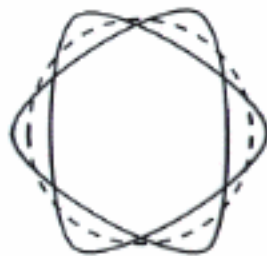


Wichtige Kernanregungen
typ. Anregungsenergien:
0.5 - einige MeV

Formschwingungen:



a)



b)

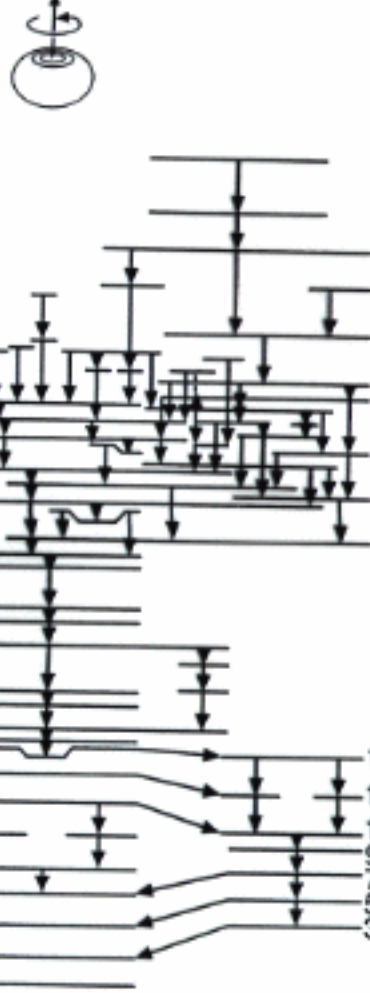
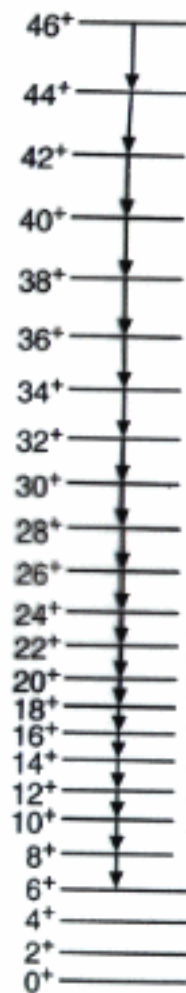
Quadrupol- Oktupol-
Vibrationen

Rotationen
bei großen Deformationen

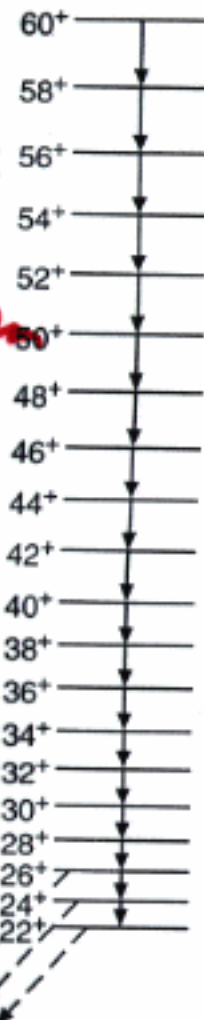
prolat



oblat



prolat
superdeformiert



$^{152}_{66}\text{Dy}_{86}$

E_x [MeV]

Abb. 18.14. Niveaus des Kerns ^{152}Dy [Sh90]. Während die niederenergetischen Zustände keine typischen Rotationsbanden zeigen, bilden sich bei hohen Anregungen Rotationsbanden, die auf eine große Deformation des Kerns schließen lassen.

Rotationszustände: $E_J = J(J+1) \frac{\hbar^2}{2\Theta} \leftrightarrow$ Trägheitsmoment

$$\Delta E = E_{J+1} - E_J = 2(J+1) \frac{\hbar^2}{2\Theta} \quad \text{nimmt linear mit } J \text{ zu}$$

$\Rightarrow$ äquidistante Rotations-Übergangs-Linien

$\Rightarrow$ nur näherungsweise der Fall $\Rightarrow \Theta$ nimmt mit steigendem J zu!

$$\Theta_{\text{starre Kugel}} = \frac{2}{5} M R_0^2$$

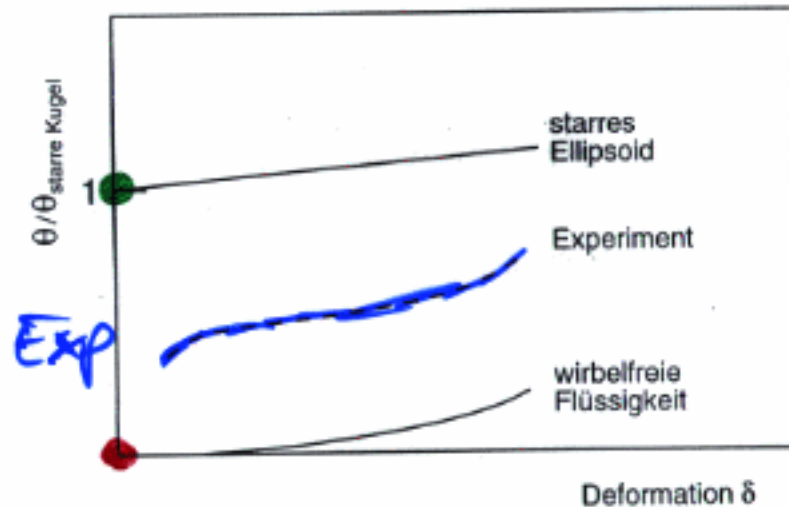


Abb. 18.13. Trägheitsmoment deformierter Kerne, verglichen mit dem einer starren Kugel, als Funktion des Deformationsparameters δ . Zum Vergleich sind die Extremfälle eines starren Ellipsoids und einer wirbelfreien Flüssigkeit angegeben.

ideale inkompressible Flüssigkeit ohne innere Reibung (suprafluid) (masselose Eierschale gefüllt mit suprafluidem ^3He) wirbelfrei
(nur Ausbeulung des Eies trägt zu Θ bei):

$$\Theta = \frac{45\delta^2}{16\pi} \cdot \Theta_{\text{starre Kugel}}$$

Exp: $\approx$ in der Mitte; Kern ist z.T. supraflüssig (innere Schalen, Paarungswelt) z.T. starres Ellipsoid (ungepaarte Nukleonen)

Nukleare Thermodynamik

Kerne im Grundzustand: entartetes Fermi-Gas, Nukleonen quasi-frei;
Einteilchen-Zustände mit Radial- und Orbital-
anregung, Thermodynamisch: $T = 0$.

Kerne in hohen Anregungszuständen: reduzierte freie Weglänge ca. 1 fm ,
nähert sich normaler Flüssigkeit an.
Statistische, thermodynamische Größen (B.B.T)

Achtung: Zahl der Teilchen nicht wirklich groß, nicht im thermischen
Gleichgewicht; „Kernmaterie“ impliziert sehr große Systeme

Experimentell: Schwerionenreaktionen; z.B. Gold-Gold, Gold-Blei
CERN Fixed Target
RHIC Brookhaven (USA) Relativistischer Heavy Ion Collider

LHC heavy ion programme (ALICE-Exp.)

⇒ Kerne verschmelzen und bilden kurzzeitig
Kernmaterie mit erhöhtem T und ρ .

⇒ wichtig für Kosmologie und Astrophysik

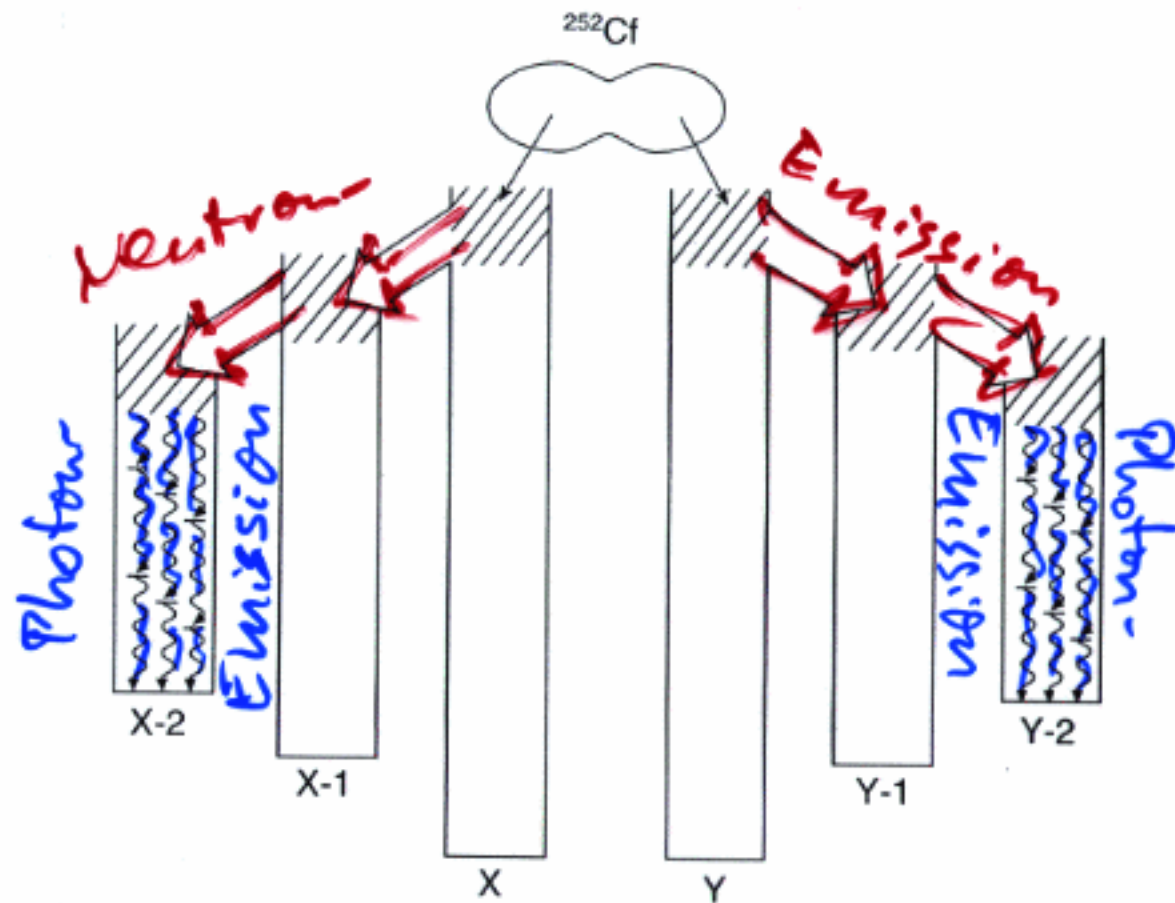


Abb. 19.1. Abkühlung von Spaltfragmenten (schematisch). Ein ^{252}Cf -Kern spaltet sich in zwei Bruchstücke der Massenzahlen X und Y, die sich durch Emission von Neutronen und anschließend von Photonen abkühlen.

„Temperatur“

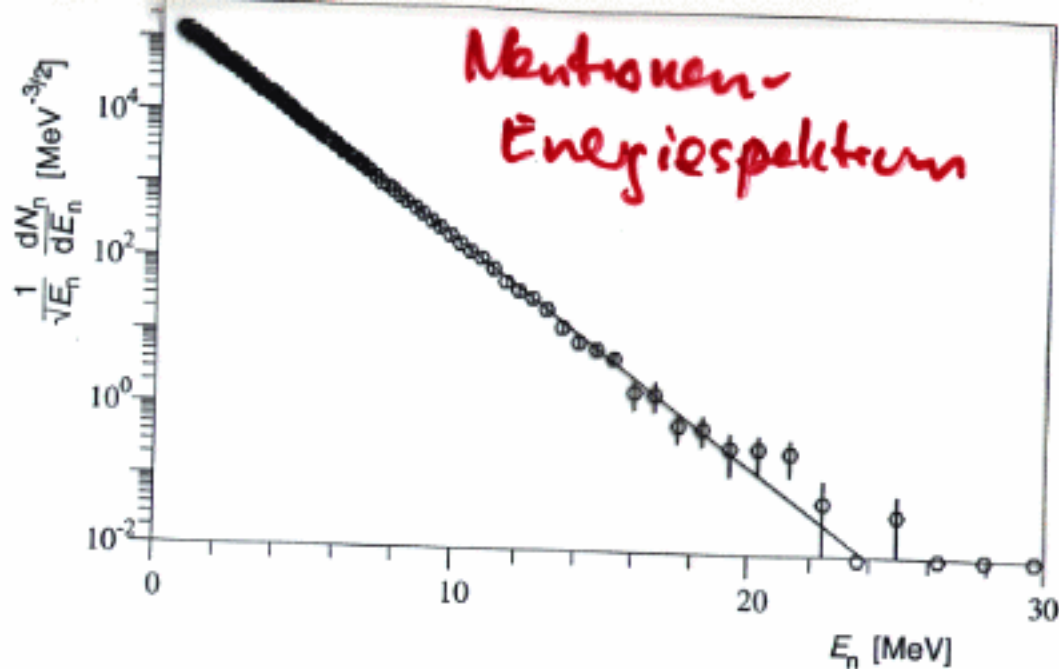
^{252}Cf : $\tau = 2.6$ Jahre
3.1% : spontane Spaltung

Trennung der Spaltfragmente
 ⇒ Reibung
 ⇒ erhöht innere Energie der Fragmente, die sich dadurch erhitzen.

Abkühlung der Spaltfragmente X und Y

⇒ erst durch Neutron-Emission
(im Mittel 4 n)

⇒ Wenn Energie nicht mehr groß genug für n-Emissionen :
Photon-Emission



⇒ Maxwell-Verteilung:
 $N_n(E_n) \propto \sqrt{E_n} \cdot e^{-E_n/kT}$
 „Verdampfungsspektrum“ mit
 $kT \approx 1.41 \text{ MeV}$

Abb. 19.2. Energiespektrum von Neutronen, die bei der spontanen Spaltung von ^{252}Cf emittiert werden (nach [Bu88]). Die Verteilung ist durch $\sqrt{E_n}$ dividiert und dann mit dem Exponentialfaktor der Maxwell-Verteilung angepasst (durchgezogene Linie).

Photonen: im Mittel ca 20 Photonen
 pro Spaltung
 80% haben Energien unter 1 MeV
 starkerer Abfall: T ist schon deutlich
 niedriger

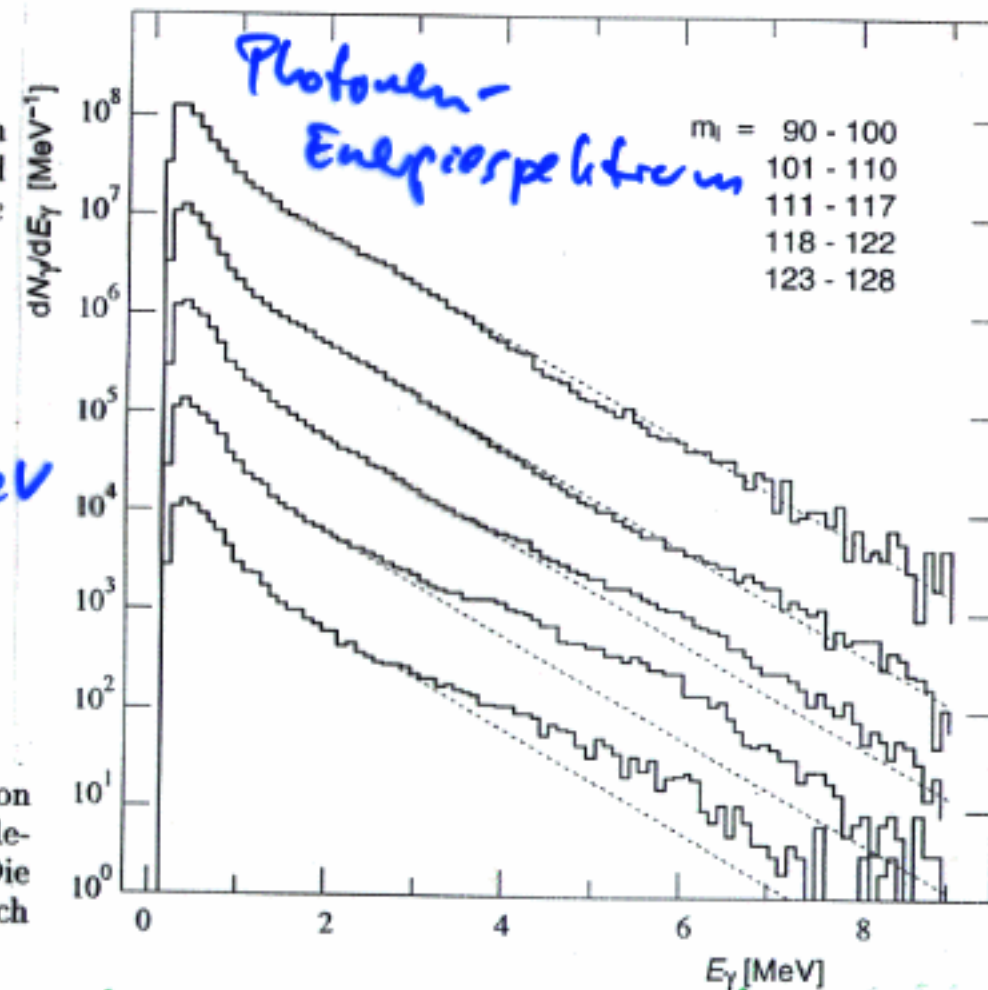


Abb. 19.3. Energiespektren von Photonen, die nach der spontanen Spaltung von ^{252}Cf emittiert werden. Die verschiedenen Spektren beziehen sich auf verschiedene Massenzahlen m_1 des leichteren Spaltfragments (von oben nach unten). Die gestrichelte Linie ist eine gemeinsame Anpassung einer Exponentialfunktion (nach [Gl89]).

⇒ Thermodynamische, statistische Beschreibung funktioniert ganz gut!

Periphere Ion-Ion-Stöße

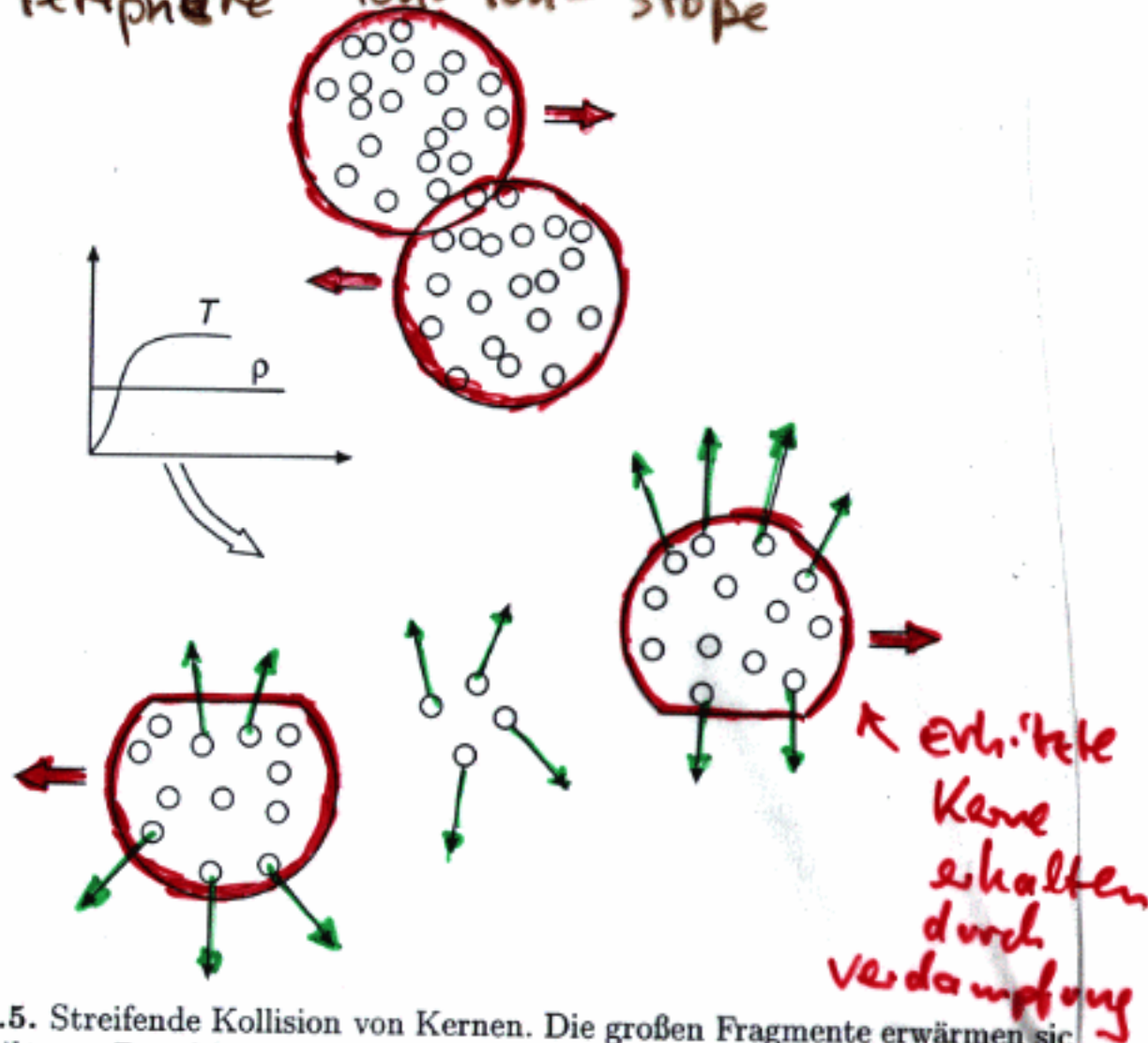
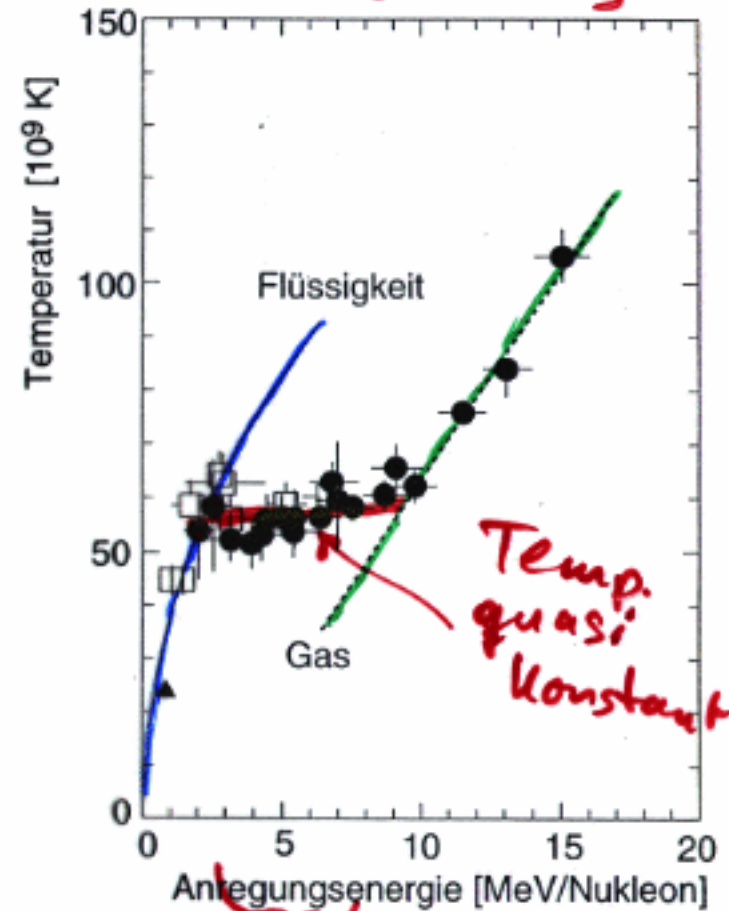


Abb. 19.5. Streifende Kollision von Kernen. Die großen Fragmente erwärmen sich durch Reibung. Daneben bleiben einzelne Nukleonen und kleine Kernfragmente übrig. Das Diagramm beschreibt die zeitliche Entwicklung der Dichte ρ und der Temperatur T der Fragmente während der Kollision.

Temperaturmessung: aus Maxwell-Verteilung der Zerfallsprodukte

zugeführte Gesamtenergie: aus Nachweis aller erzeugten Teilchen im Endzustand

Au-Au, 600 MeV / Nukleon
analog zu Verdampfung von Wasser, Phasenübergang flüssig $\rightarrow$ fest-gasförmig



Nukleonenschicht in der Gasphase, die nicht abdampft, im Gleichgewicht mit flüssigem Kern
erst wenn alles verdampft, T-Erhöhung möglich

Hadronische Materie

zentrale Gold-Gold-Kollisionen, $\approx 10 \text{ GeV/Nukleon}$
 $\Rightarrow$ viele Pionen entstehen

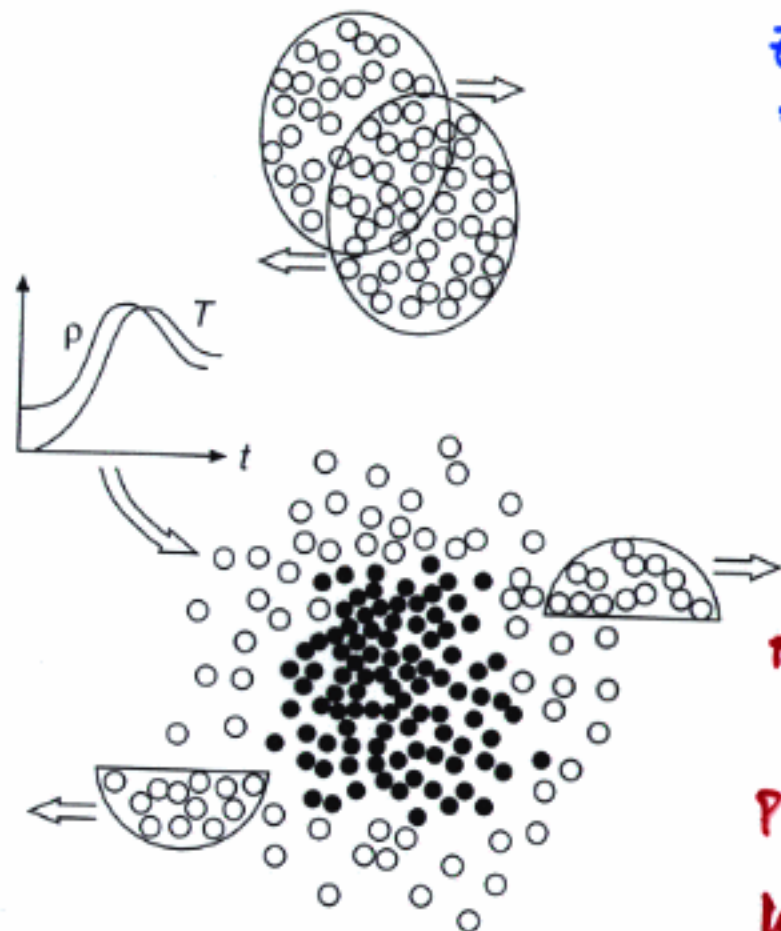
$N+N \rightarrow \Delta + N$ freie Weglänge $\approx 1 \text{ fm}$

$\Delta \leftrightarrow N\pi$, $N\pi \rightarrow \Delta$ thermodyn.
 Gleichgewicht

Mischung aus Nukleonen, Δ und π : hadronische Materie

$$\pi: \frac{dN}{dE_{\text{kin}}} \propto e^{-E_{\text{kin}}/kT}$$

Pionstrahlungs-Temperatur übersteigt
 $kT \approx 150 \text{ MeV}$ nicht, unabhängig von der
 Gesamtenergie.



• π, K $\circ$ N, Δ

Heiße Kernmaterie
 expandiert und
 kühlt dabei ab.

Unterhalb von 150 MeV nimmt WW-Wahrscheinlichkeit der Pionen drastisch ab, damit auch Energieaustausch mit anderen Teilchen.
 $\downarrow$
 „Ausfrieren der Pionen“

Quark-Gluon-Plasma

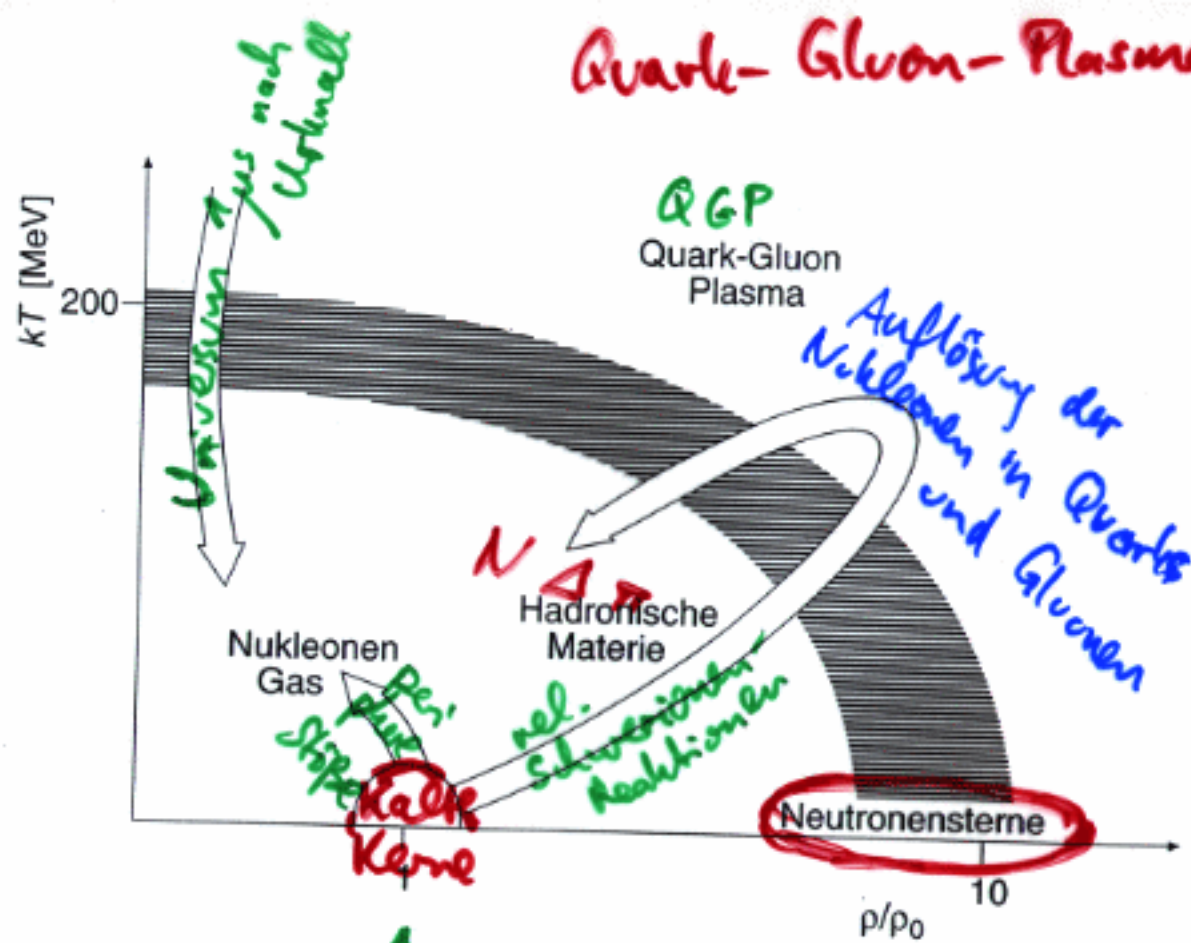


Abb. 19.8. Phasendiagramm der Kernmaterie. Die normalen Kerne befinden sich bei $\rho = \rho_0 (= \rho_N)$ und der Temperatur $T = 0$. Die Pfeile geben die Wege an, die die Kerne bei verschiedenen Schwerionenreaktionen nehmen. Der kurze Pfeil symbolisiert die Erwärmung des Kerns durch periphere Stöße; der lange Pfeil entspricht relativistischen Schwerionenreaktionen, bei denen die Kernmaterie möglicherweise die Quark-Gluon-Plasma-Phase durchquert. Die Abkühlung des Universums um die Zeit $T \approx 1 \mu s$ wird durch den nach unten gerichteten Pfeil dargestellt.

- Nachweis des QGP:
- durch e.m. Strahlung (kann aus Zentrum der Schwerionenreaktion entkommen; kühlt nicht durch Expansion ab.)
 - durch erhöhte Strangeness-Produktion
 - durch Unterdrückung von J/ψ -Erzeugung

Status: CERN, RHIC

2000 - 2005:

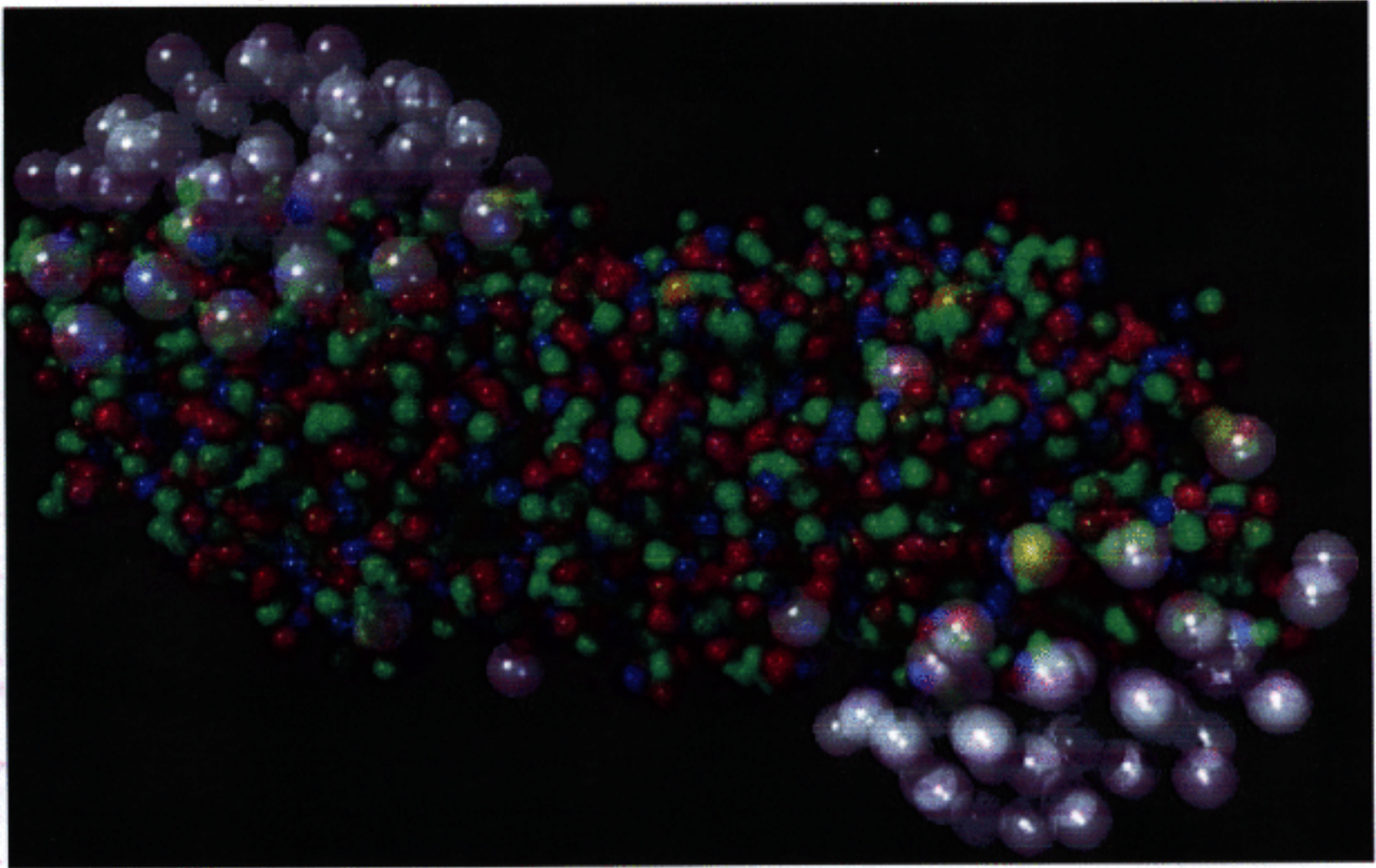
QGP gefunden
(aber noch umstritten,
Interpretationen nicht
eindeutig)

1 Nukleon nimmt
6 fm³ Volumen
ein

(Eigenvolumen des Nukleons: ca. 0,6 fm³)

Quark-Gluon-Plasma

Nukleonen



„Deconfinement“

↑
Nukleonen