

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III

Vorlesung 19

MICHAEL FEINDT & THOMAS KUHR
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Aufbau der Kerne (3)

Messung der Neutrinomasse

Kurie - Plot

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

Atomare Zustände müssen sehr gut verstanden sein. Optimal:



E_0 nur 18,6 keV

Bisher: keine Abweichung von Null gemessen.

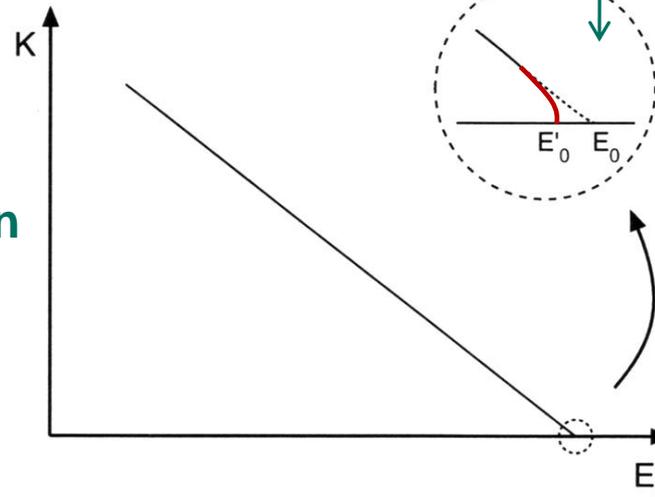
(lange Zeit: $m_\nu^2 < 0$, mehrere Std.-Abweichungen. War systematischer Oberflächeneffekt.)

Jetziges Limit: $m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}$

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

⇒ erwarte Gerade

schneidet E – Achse bei Maximalenergie
(für $m_\nu = 0$)



Bei endlichen m_ν weicht das Spektrum am Endpunkt davon ab.

E_0 aus Extrapolation der Gerade bestimmbar.

Abbildung 17.21. 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.
Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

Kollektive Kernanregungen

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

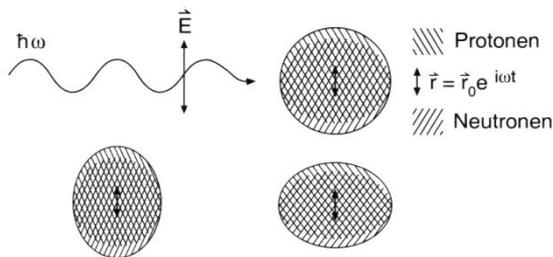
<u>E1</u> : elektrischer Dipolübergang	:	Parität ändert sich $\Delta J \leq 1$; $\propto E_{\gamma}$	} dominant 2. Ordnung :
<u>M1</u> : magnetischer Dipolübergang	:	Parität bleibt gleich $\Delta J \leq 1$; $\propto E_{\gamma}^3$	
<u>E2</u> : elektrischer Quadrupolübergang	:	Parität bleibt gleich $\Delta J \leq 2$; $\propto E_{\gamma}^3$	
•			
•			
•			

Die Dipol – Riesenresonanz

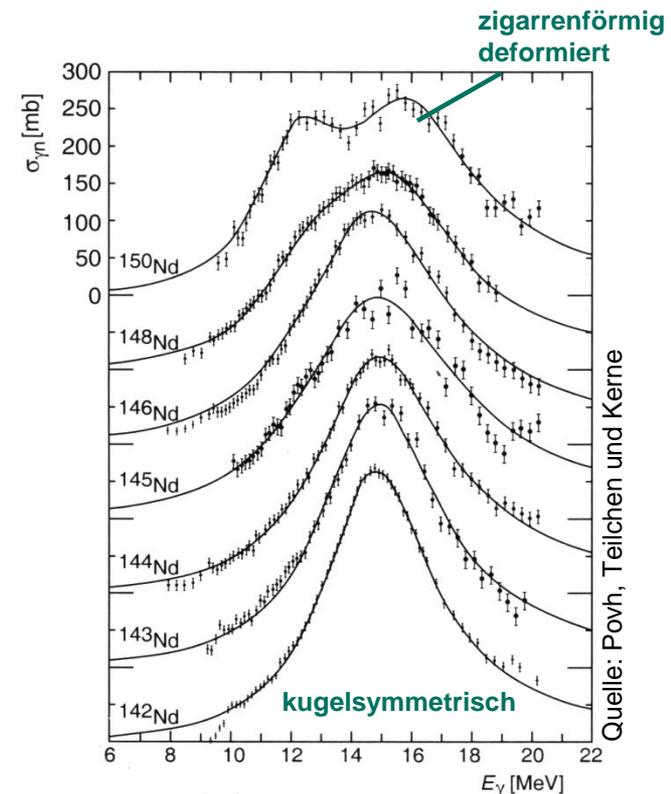
- nuklearer Photoeffekt: $A X (\gamma, n) A-1 X$
- Anregungsenergie $\propto 2 \cdot$ Schalenabstand

^{142}Nd : 1 schmale Resonanz \Rightarrow schwerere Isotope: Aufspaltung in **2 Resonanzen**
 integr. WQ \approx Summe aller Einteilchen – WQs
 der äußersten Schale

Erklärung: kollektive Schwingung aller
 Protonen gegen alle Neutronen



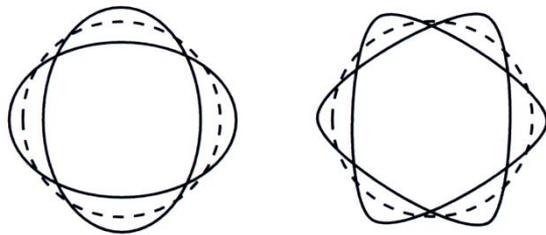
Für deformierte Kerne: **unterschiedliche "Resonanzfrequenzen"** entlang der großen und der kleinen Hauptachse
 \rightarrow **Aufspaltung** in 2 Resonanzen



Weitere Kernanregungen

- typische Anregungsenergien: 0.5 – einige MeV

Formschwingungen:



Quadrupol - Vibrationen Oktupol - Vibrationen

Rotationen: bei großen Deformationen

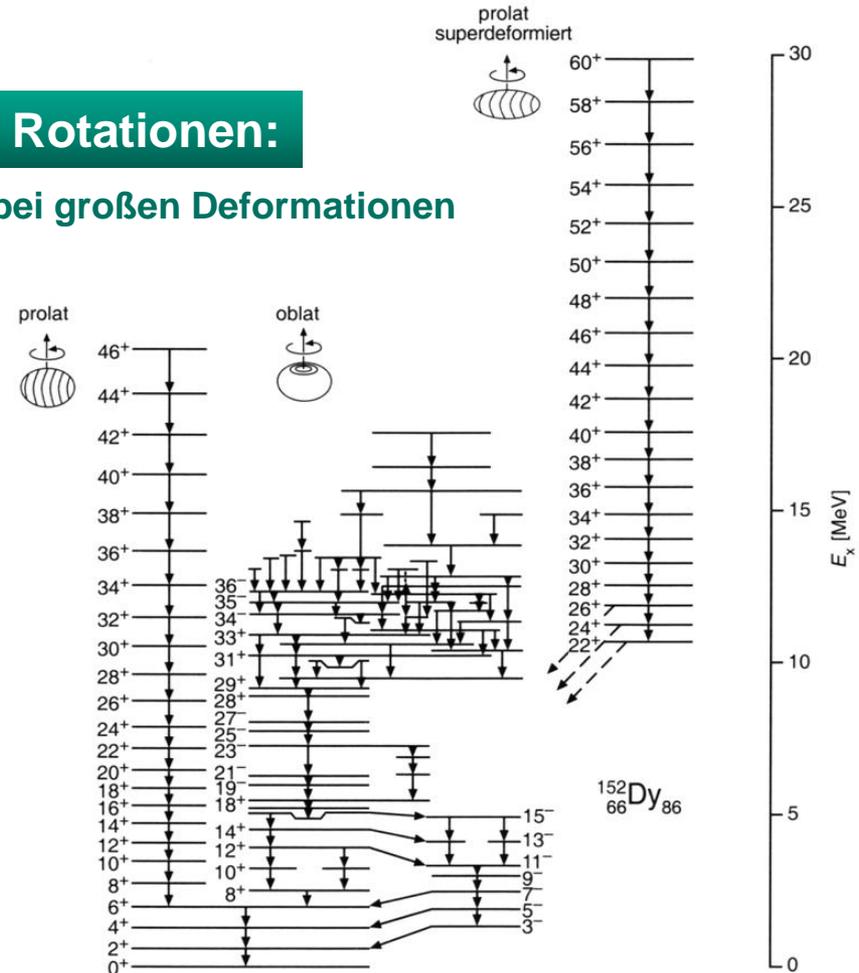


Abbildung 18.14. Niveaus des Kerns $^{152}\text{Dy}_{86}$ [Sh90]. Während die niederenergetischen Zustände keine typischen Rotationsbanden zeigen, bilden sich bei hohen Anregungen Rotationsbanden, die auf eine große Deformation des Kerns schließen lassen.

Rotationszustände

$$E_J = J(J+1) \frac{\hbar^2}{2\theta} \leftrightarrow \text{Trägheitsmoment}$$

$$\Rightarrow \Delta E = E_{J+1} - E_J = 2(J+1) \frac{\hbar^2}{2\theta}$$

ΔE nimmt linear mit J zu:

⇒ äquidistante Rotations – Übergangs – Linien

⇒ nur näherungsweise der Fall ⇒ θ nimmt mit steigendem J zu!

$$\theta_{\text{starre Kugel}} = \frac{2}{5} MR_0^2$$

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

Ideale inkompressible Flüssigkeit ohne innere Reibung (suprafluid, wirbelfrei). (Masselose Eierschale, gefüllt mit suprafluidem ^3He , nur Ausbeulung des Eies trägt zu θ bei.)

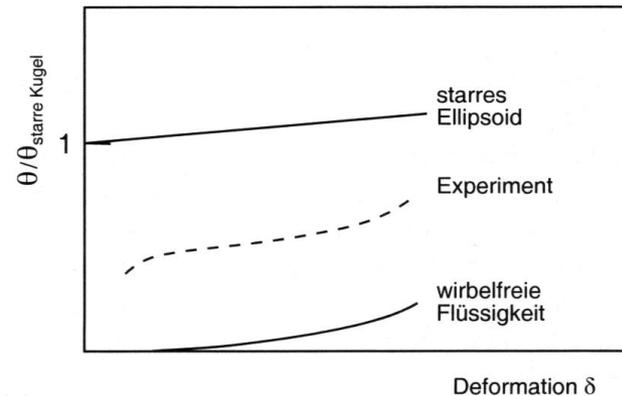


Abbildung 18.13. Trägheitsmoment deformierter Kerne, verglichen mit dem einer starren Kugel, als Funktion des Deformationsparameters δ . Zum Vergleich sind die Extremfälle eines starren Ellipsoiden und einer wirbelfreien Flüssigkeit angegeben.

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

Experiment: \approx in der Mitte; Kern ist **z.T. suprafluid** (innere Schalen, Paarungskraft) **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 z.B. T .
- **Achtung:** Zahl der Teilchen nicht wirklich groß, nicht im thermodynamischen Gleichgewicht: "Kernmaterie" impliziert sehr große Systeme.
- Experimentell: Schwerionenreaktionen; z.B. Gold – Gold, Gold – Blei
 - CERN Fixed Target
 - RHIC Brookhaven (USA) (Relativistic Heavy Ion Collider)
 - LHC heavy ion programme (ALICE – Experiment)

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

⇒ **wichtig für Kosmologie und Astrophysik**

Kerntemperatur

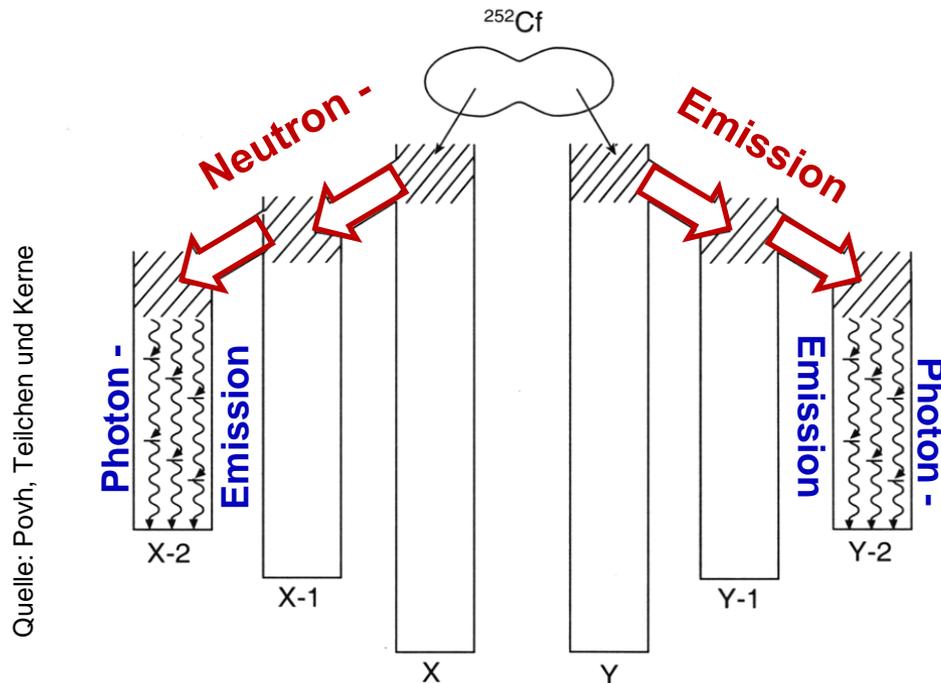


Abbildung 19.1. Abkühlung von Spaltfragmenten (schematisch). Ein ^{252}Cf -Kern spaltet sich in zwei Bruchstücke der Massenzahlen X und Y, die sich durch Emission von Neutronen und anschließend von Photonen abkühlen.

Abkühlung der Spaltfragmente X und Y

- ⇒ erst durch **Neutron - Emission** (im Mittel $4n$)
- ⇒ Wenn Energie nicht mehr groß genug ist für n - Emission: **Photon - Emission**

"Temperatur"

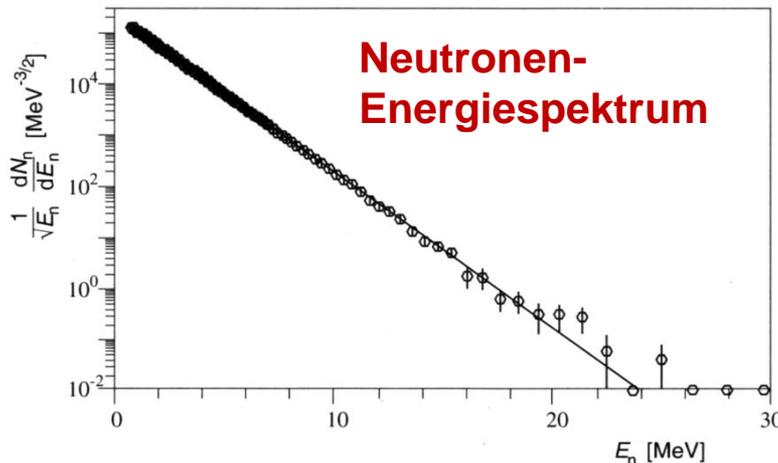
^{252}Cf : $\tau = 2.6$ Jahre

3.1% : spontane Spaltung

Trennung der Spaltfragmente

- ⇒ Reibung
- ⇒ erhöht innere Energie der Fragmente, die sich dadurch erhitzen

Energiespektren bei spontaner ^{252}Cf -Spaltung



Neutronen-Energiespektrum

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

Abbildung 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).
 Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

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

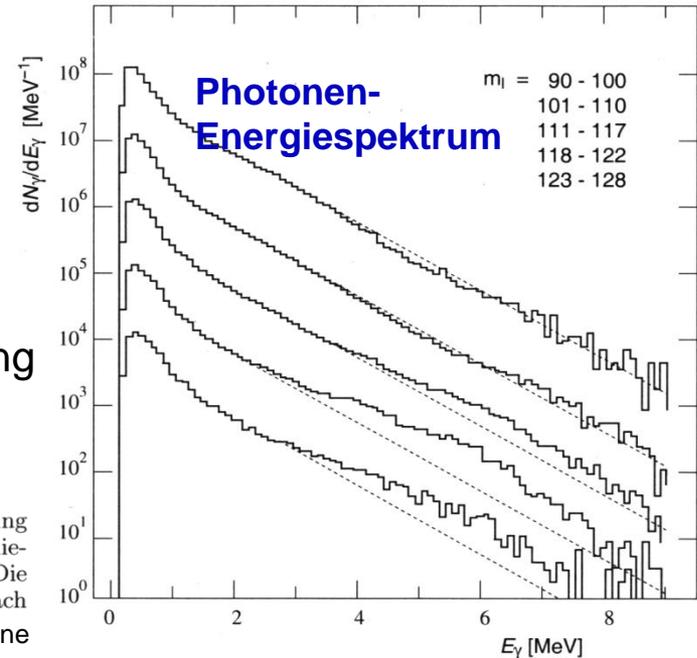


Abbildung 19.3. Energiespektren von Photonen, die nach der spontanen Spaltung von ^{252}Cf emittiert werden. Die verschiedenen Spektren beziehen sich auf verschiedene Massenzahlen m_1 des leichteren Spaltfragments (von oben nach unten). Die gestrichelte Linie ist eine gemeinsame Anpassung einer Exponentialfunktion (nach [G189]).
 Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

⇒ **Thermodynamische, statistische Beschreibung funktioniert ganz gut!**

Periphere Ion-Ion – Stöße

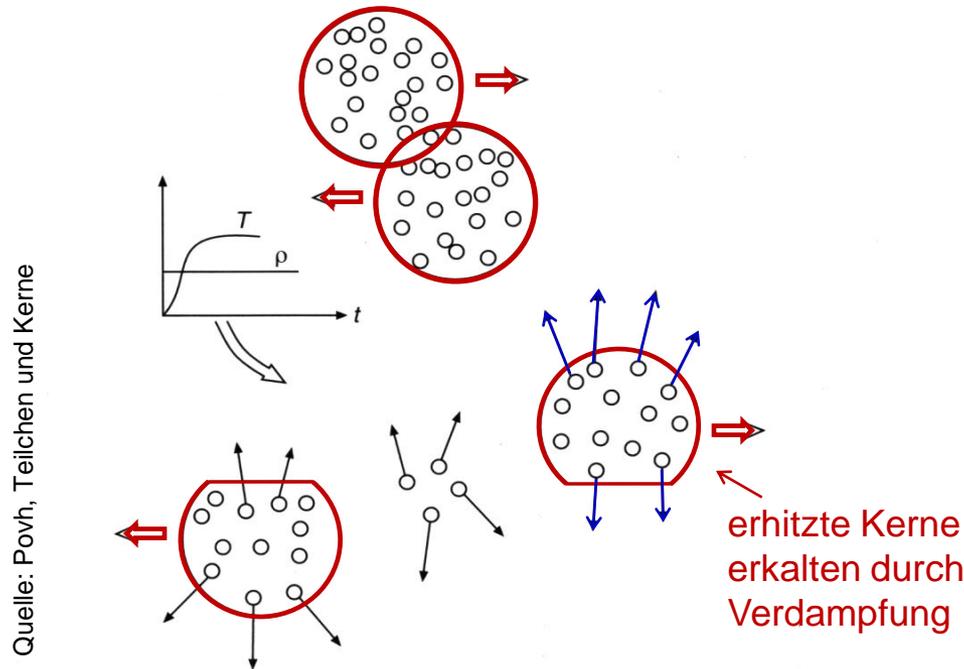


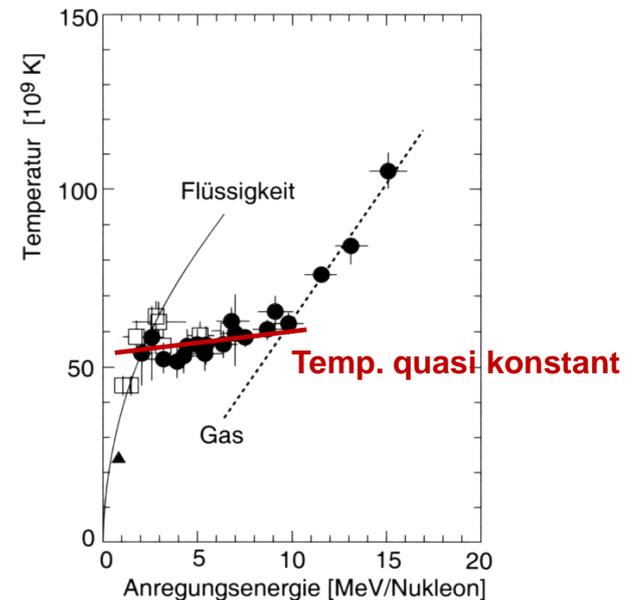
Abbildung 19.5. Streifende Kollision von Kernen. Die großen Fragmente erwärmen sich durch Reibung. Daneben bleiben einzelne Nukleonen und kleine Kernfragmente übrig. Das Diagramm beschreibt die zeitliche Entwicklung der Dichte ρ und der Temperatur T der Fragmente während der Kollision.

Temperaturmessung: aus Maxwell – Verteilung der Zerfallsprodukte

zugeführte Gesamtenergie: aus Nachweis aller erzeugten Teilchen im Endzustand

Au–Au ; 600 MeV / Nukleon

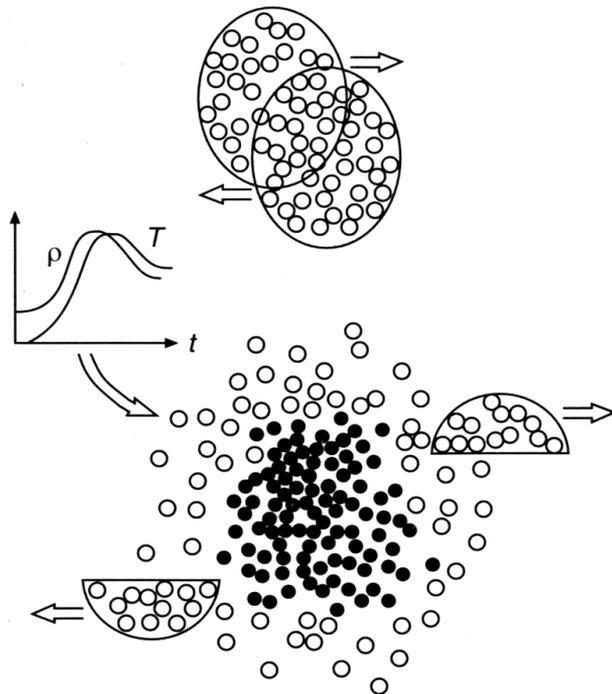
analog zu Verdampfung von Wasser, Phasenübergang flüssig \rightarrow gasförmig



Nukleonschicht in der Gasphase, die nicht abdampft, im Gleichgewicht mit flüssigem Kern.

Erst wenn alles verdampft ist, ist Temperaturerhöhung möglich.

Hadronische Materie



● π, K ○ N, Δ

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

zentrale Gold-Gold – Kollisionen

$\approx 10 \text{ GeV/Nukleon}$ \Rightarrow viele Pionen entstehen



freie Weglänge $\approx 1 \text{ fm}$



thermodyn. Gleichgewicht

Mischung aus

Nukleonen, Δ und π : hadronische Materie

π :

$$dN / dE_{kin} \propto e^{-E_{kin}/kT}$$

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



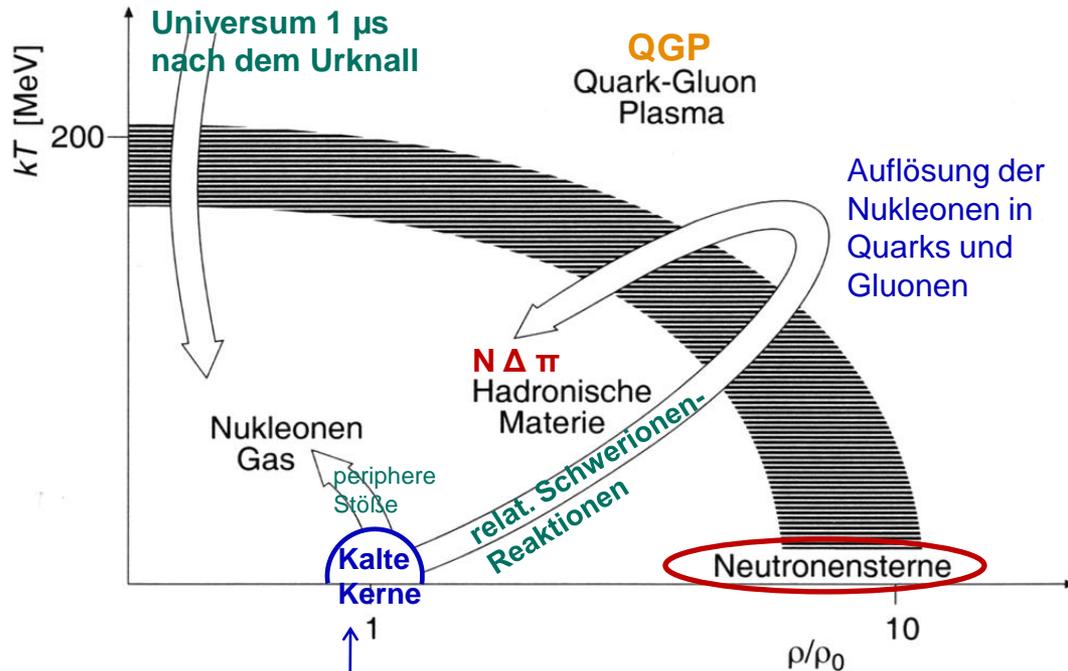
Heiße Kernmaterie expandiert und kühlt dabei ab.



Unterhalb von 150 MeV nimmt WW – Wahrscheinlichkeit der Pionen drastisch ab, und damit auch der Energieaustausch mit anderen Teilchen.

\Rightarrow "Ausfrieren der Pionen"

Quark-Gluon – Plasma (QGP)



1 Nukleon nimmt 6 fm^3 Volumen ein
(Eigenvolumen des Nukleons: ca. 0.6 fm^3)

Abbildung 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 $T \approx 1 \mu\text{s}$ wird durch den nach unten gerichteten Pfeil dargestellt.

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

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

Status:

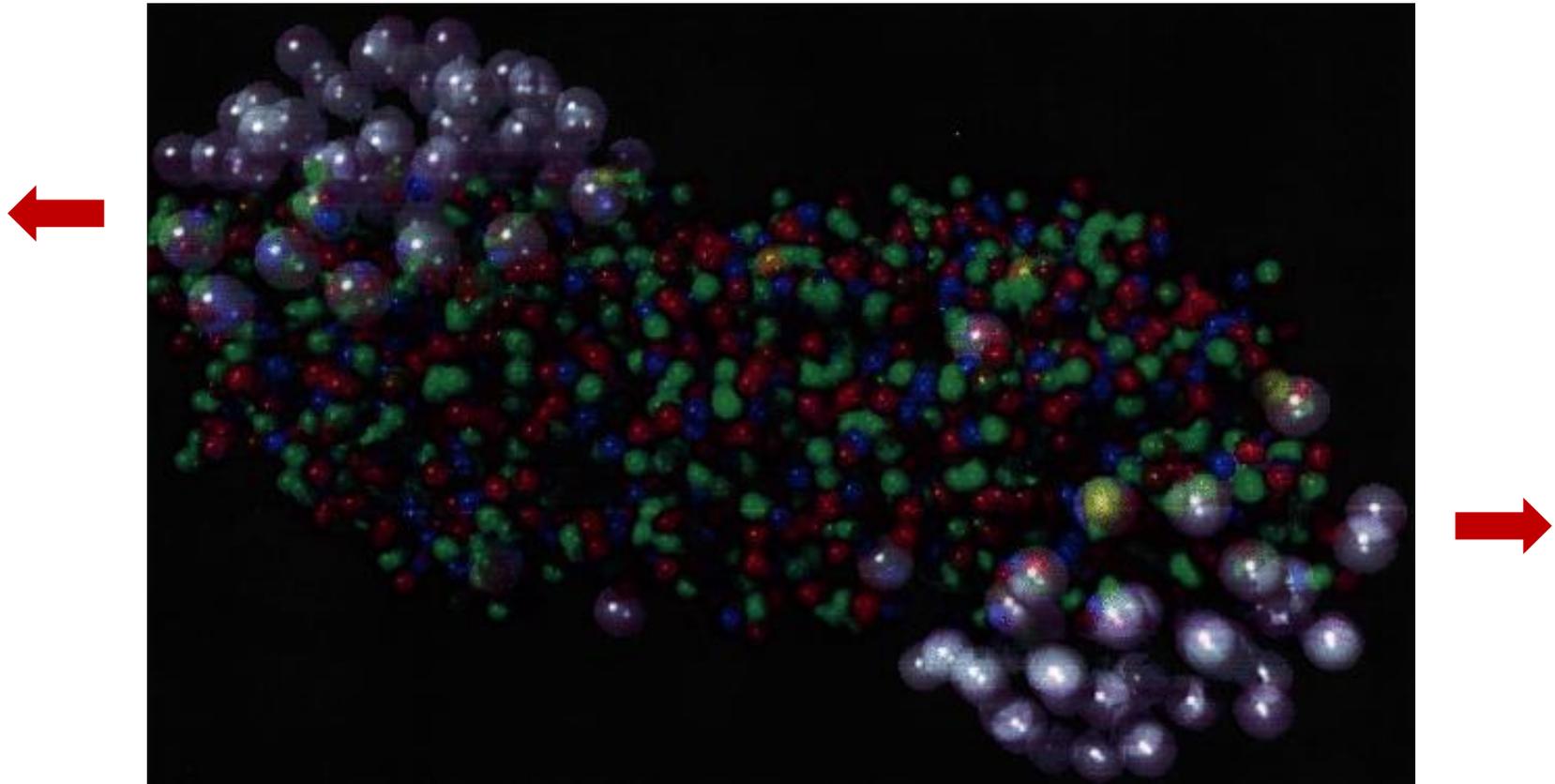
CERN, RHIC 2000 – 2005:

QGP gefunden

(aber noch umstritten, Interpretationen nicht eindeutig)

Quark-Gluon – Plasma

Nukleonen



"Deconfinement"

Nukleonen