

# 11 starke WW / Einführung ↳ Skript?

1. 4 fundamentale Kräfte im Natur:

1) Grav. (Fall + Dynamik aller Lebewesen, Struktur, Mat. ↑ unvollkommene)  

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} R \sqrt{-g} + \mathcal{L}^{Mat.}$$
Raumzeit-Krümmung

$$\kappa \equiv \frac{8\pi G_N}{c^4}, \quad G_N = 6.672 \dots \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}$$

$$\Rightarrow \text{z.B. } g = 9.806 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$$

aber für Teilchenphysik günstigere Einheiten:

$$M_{Pl} \equiv \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}, \quad c = 2.99 \dots \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

$$\hbar c = 197.327 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$= 1.22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2 \approx 2.17 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \approx \text{Staubk.$$

= Kombination von Gravitation / spez. RT / QM

$G_N, M_{Pl}$  ~ dimensionsbehaftet, keine absolute Zahl  
 (nicht mit anderen WW direkt vergleichbar)

phänomenologische makroskopische/mikroskopische WW  
 (Quantengravitation = ?)

Theoretische Physik (Feldtheorie):  $\mathcal{L}$  gegeben  $\Rightarrow$  alles folgt durch Ausrechnen

(was fehlen noch  $R, \sqrt{-g}, \mathcal{L}^{Mat.}$ )

→ Einsteinsche Feld-Gl. + EL-Gl.

↳ Black Holes, um HICS? ← kosmische Strahlung?  
 no hard

2) starke WW (von Quarks und Gluonen)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} (i \not{\partial} - M) \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a$$

Kov. Ableitung

↑

Kopplung (= WW) von Quarks an Gluonen

↑

↑

Gluonenfeld, 8 Farben

Quarkfelder

Hessensmatrix

$\psi \Rightarrow$  Fermion (6 Quarksorten, verschiedene Massen)

↳ Color (3 Farben  $\Rightarrow$  see (2))

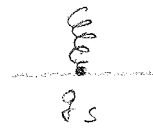
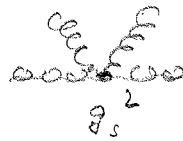
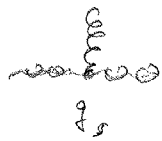
↳ Dirac,  $\psi_{DCF}, M_{FF}, D_{\mu CC}, \psi_{DD}, \mu = 0, \dots, 3$

Erläuterung, was  $D_u$  ist  $\rightarrow QCD$

Besonderheit: nicht-Abelsche Eichtheorie:  $SU(3)$

$\hookrightarrow$  Selbstkopplung der Gluonen  
 tragen Farbladung

Feynman-Diagramme:

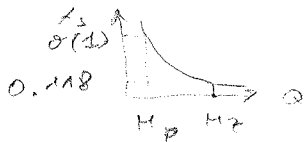


$$\alpha_s \equiv \frac{g_s^2}{4\pi}$$

Gross, Wilczek, Politzer: 2004 Nobelpreis für

$$\alpha_s = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f) \ln\left(\frac{Q^2}{\Lambda_{QCD}^2}\right)} \quad \dots \quad \alpha_s(Q^2 \rightarrow \infty) \rightarrow 0$$

asymptotische Freiheit



$\uparrow$  neue Skala  $\mathcal{O}(200 \text{ MeV})$   
 (dimensionale Transmutation  
 nicht im  $\mathcal{L}$  enthalten;  
 Renormierung)

unser Problem: QGP,  $T \sim 300 \text{ MeV} \rightarrow Q^2 \sim (300 \text{ MeV})^2$

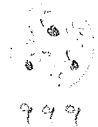


$\alpha_s \sim \mathcal{O}(1)$ : keine übliche Störungskorrektur  
 (Potenzen von  $\alpha_s$ )

"starke WW ist stark": spezielle Techniken

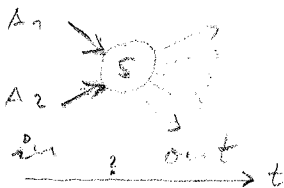
Umrechnung: Impuls  $\sim \text{MeV}/c$ :  $c = 1$ ,  $t_c = 1$   
 ( $t_c = 197.327 \dots \text{ MeV} \cdot \text{fm} \rightarrow$  übliche Einheiten)

andere Quark-Gluonen-Systeme: Hadronen, Kerne  
 (auch starke WW)



Confinement: QCDs  
 Kernkraft

Schwerpunkt unseres Themas:  $|A_1\rangle + |A_2\rangle \rightarrow \sum_i |H_i\rangle$



Frage: QGP als unterkollider  
 Zustand? Wie ihn quantifizieren?

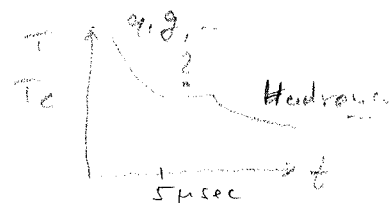
prinzipiell interessant: neuer "Aggregatzustand" starke  
 Wechselwirkungsdichte

analog: Evolution des Universums

Frage: Reliabilität?

(analog zur primordialen

Nucleosynthese: 25%  $^4\text{He}$ )



Folie (10)

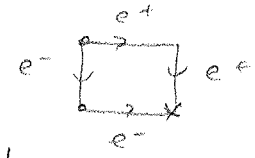
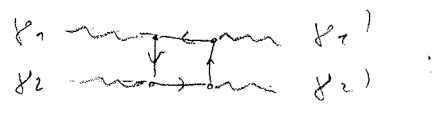
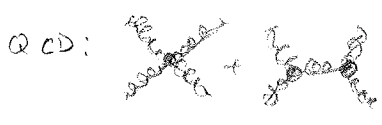
3) e.m. WW:  $E, B$  vs. Ströme + Ladungen  
 (Maxwell vor 170 Jahren; Dirac vor 80 Jahren)

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4} (\text{rot } \vec{D}_\mu - m)^2 - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

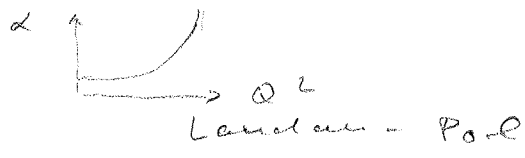
$\uparrow$  em. Felder  
 z.B.  $e^-$  oder  $p^+$

Abelsche Eichtheorie,  $U(1)$   
 $\rightarrow$  keine Selbstkopplung der Photonen  
 (Photonen haben Photonen nicht)  
 Vielfalt der Natur

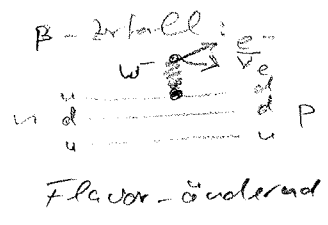
Ultraviolett - Streuung über Vakuumfluktuationen



$\alpha = \frac{1}{137.035...}$  : wie kommt diese Zahl?  $\ll 1$   
 (alles Leben basiert darauf)



Mo



4) elektroschw. WW,  $\mathcal{L}$  sehr komplex  
 2 neue Eichfelder  $\rightarrow$  Quanten =  $W^\pm, Z^0$ -Bosonen, <sup>SU(2)</sup>  
 deren Massen (wie auch Quark + Leptonen - Massen)  
 durch Symmetriebrechung erzeugt werden: Higgs  
 (= skalares Feld!)

Quarks + Leptonen = Fermionen: Spin  $\frac{1}{2}$

WW (2/4): Eichbosonen: Spin 1

Higgs - Suche: LHC (dort auch ALICE)

2), 3), 4): fundamentale mikroskopische WW  $\rightarrow$  SM: 123 <sup>QCD</sup>  
 viele "Konstruktion" u.a. CKM  
  
 GUT?  $\rightarrow$  SURY?  $\rightarrow$  ?  
 LHC

5) jenseits vom SM:  $\nu$ -Massen (ev. geringe Modif.)

Kosmologie: Dunkle Materie: ~20%

Dunkle Energie: ~75%

Baryonen (u. Neutronen): ~5%

$\uparrow$   
 ca 2% sichtbar  
 in Sternen +  
 Galaxien

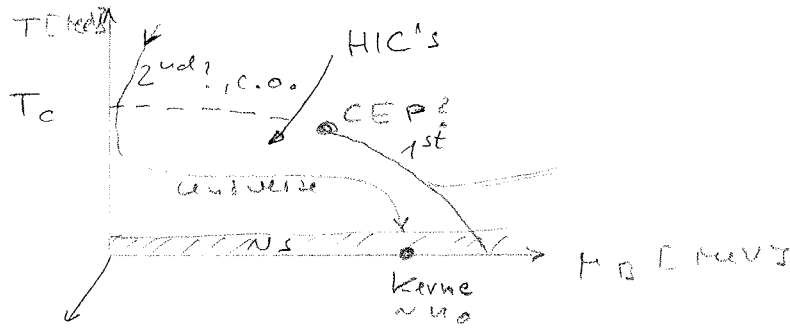
$\Rightarrow$  Abendvortrag

Schwerpunkte: QGP, HICs, Kosmischer konfinement - Übergang,  
 Quark - Sterne, (primord. Nucleosynthese)

Ziel: Darstellung als verschiedenen Facetten aus starken WW

Probleme: aktiver Forschungsgegenstand  $\rightarrow$  nicht abgeschlossen  
 viele offene - qualitative Überlegungen vs. komplizierte Details  
 vielfach noch keine zugehörigen Antworten, z.B. QGP = ?

## 2. Phasendiagramm stark WW Materie



transient  
d. o. f.

Folie ① ①.1 ①.2 ①.3 ①.3' ①.4

$$T: 1 \text{ MeV} \hat{=} 1.16 \cdot 10^{10} \text{ K}$$

$$(k_B T \text{ bei } 300 \text{ K} = \frac{1 \text{ eV}}{38.684})$$

$\mu_B$ : entartetes Fermion-System  
= Injektionsenergie  
= Fermi-Energie

$$P(T, \mu) \sim \text{p.d.m. therm. Pot.} = -$$

$$s = \frac{\partial P}{\partial T}, \quad u = \frac{\partial P}{\partial \mu}$$

Gibbs:  $e + p = Ts + \mu u$

Ziel Thermodynamik + Statistik, Details im Komplex QGP + QPM

$$T_c = (175 \pm 20) \text{ MeV}$$

$$T_{NS} \leq 50 \text{ MeV}$$

CEP = ? hängt von  $u_0, u_1$  ab

$$\mathcal{L} \rightarrow Z(T, \vec{\mu}; u_0, u_1, N_0, N_1)$$

action

$$P = \frac{1}{V} \ln Z|_{V \rightarrow \infty}$$

$$n_0 \sim 0.16 \text{ fm}^{-3} = 1.6 \cdot 10^{32} \text{ Nucleonen/cm}^3$$

$$m_p = 1.672 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

$$\rho_0 \approx n_p m_p \approx 2.7 \cdot 10^{14} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{NS} \leq 10^{15} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ oder } \lesssim 10 \rho_0$$

Ziel der Experimente (HIC's): Untersuchung von einem Ausschnitt des Phasendiagramms, in überlappende  $T > T_c$  und in letzter Zeit: CEP; früher: --- = 1st order p.t. (wäre noch interessanter: Wasser-Eis, Wasser-Dampf, mein Startpunkt = Theorie, aber phys. orientiert (→ Anwendungen) (M. B. ...: Therm + Hydrodynamik →  $\sigma_2 \dots$ )

### 3. Themenliste

1)  $T^{\mu\nu}_{; \nu} = 0$  → Friedmann-Gl.: Kosmologie - Big Bang  
 Bewegungs-Gl. (Energie-Impuls-T.) → Bjorken-Gl. → Ultra Relativistic (H. Bleicher)  
 → TOV-Gl.: Neutronen-Quark-Sterne


+  $P(T, \mu)$ : Zustands-Gl (ZGL) im Phasendiagramm  
 ↪ alles wäre ausrechenbar

ZGL ungenügend bekannt → Modelle für ZGL + Vergleich  
 → spez. Abschnitt QGP + QPM mit Daten

Bewegungs-Gl. ist universell (unabhängig von spez. Theorie),  
 aber für Minkowski-Systeme (Big Bang + NS, überraschend gut für HICs),  
 Hintergrund: • Integrierbarkeits-Bed. für Einstein-Gl.  
 (Konstante Ricci-Identität)

• im flachen (Minkowski-) Raum; lokale  
 Energie-Impulserhaltung aufgrund von  
 Symmetrie zur Raumzeit (10 Killing-Vektoren  
 → 10 Erhaltungsgrößen)

$P(T, \mu)$ : lokales Gleichgewicht

  $V, E, N$ : keine Ströme (Energie, Impuls, Wärme)  
 maximaler Entropiezustand

jenseits von  $T^{\mu\nu}_{; \nu} = 0$  → beschleunigt, kein lokales Gleichgewicht  
 nicht (Boltzmann-Gl.)

für viele Aspekte von HICs wichtig:  $\bar{p}$ -Puzzle

besteht aus vielen Modulen (V6 + Bausteinmodulen)

2) o.m. Problem  spezieller Schalierung?

+ Medium-Modifikation von Hadronen

Beispiel: stark- und zermahlene Effekte → Unterentwicklung  
 + - aufspaltung  $\bar{p}$  z.s.

analog:  $0 \leq D$   $\eta \equiv \kappa$   
 $\pi$   
 z.s.  $\rightarrow$  Energieverschiebungen?

↑ komplexwertetes Vakuum  $|0\rangle$   
 z.B.  $\langle \bar{q} q \rangle = (-235 \text{ MeV})^3$

$\langle \frac{\delta^2 G}{\delta \pi^2} \rangle = (333 \text{ MeV})^4$

Folge ②

Energieschiebung  $\Rightarrow$  Massenänderung?

$\hookrightarrow$  woher kommt "Masse"? z.B. Zahlenwerte für  $m_N, m_e$

SM:  $m_e$  wird im elektrodynamischen Sektor durch Higgs-Brechensymmetrie erzeugt (erklärt nicht den Zahlenwert!)

$$m_N \approx F(\langle \frac{\alpha_s}{\pi} G^2 \rangle, \langle \bar{q}q \rangle, \dots)$$

Idee:  $T, \mu_B$  ändern QCD-Vakuum, d.h.

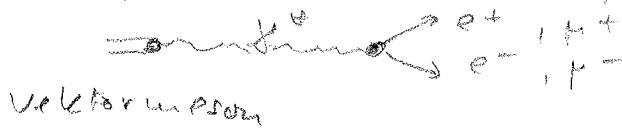
$\langle \frac{\alpha_s}{\pi} G^2 \rangle, \dots \rightarrow$  im Hadronen ändert sich

$\langle \bar{q}q \rangle$ : Ordnungsparameter für  $\mathbb{Z}_2$  Symmetriebrechung  $\rightarrow$  elementare Überlegungen zur Dirac-Gl.

exp. Schlüssel:  $\gamma^* \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$

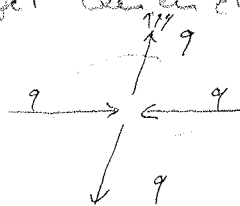
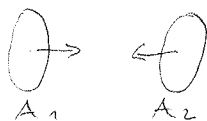
$\uparrow$  virtuelle Photonen:  $k^2 \equiv k_\mu k^\mu = \omega^2 - k^2 \neq 0$   $\frac{v}{tc} = 1$

wichtig für direkte Zufälle, z.B.  $p, \omega, \phi, Z/\gamma, \nu \rightarrow \gamma^*$ :



$$k_{\gamma^*}^2 = \underbrace{P_{e^+e^-}^2}_{(p_{e^+} + p_{e^-})^2} = P_V^2 = m_V^2$$

3) harte Problem, Jet Quenchung, Tomographie



Medium-Modifikation des Jets

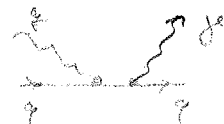
Jet, Spray von Hadronen

"hart ist alles, was nicht weicht ist"

$\uparrow$  hoher Impulsübertrag  $\rightarrow$  p QCD berechenbar = Standardherge

$\hookrightarrow$  Tomographie

$\gamma$ -tagged jets: Compton-ähnlicher Prozess



$\gamma$  - erleidet keine Medium-Modifikation

$\hookrightarrow$  Gamma-Jet - Imbalance

Folge 21

besondere Wünsche + Fragen // Skript

Dt./16:30

Vorstellung

# 5.3. Kugelsymmetrische Sterne

Geschichts Umordnen der vorherigen Gleichungen:  
 (kann "einfach" aus  $ds^2 = \dots$  mit  $T_{ii} = 0$  abgeleitet werden)

$$M(r) = \frac{1}{2} \int_0^r \rho c^2 e(r') + \frac{1}{2} dr' \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{c^2 (e + \frac{p}{c^2}) (M(r) + \frac{1}{2} r^3 \rho \frac{de}{dr})}{r^2 (1 - \frac{2M(r)}{r})} \quad (2)$$

de rausziehen, anders M

TOV-gl. für kalte, kugelsymmetrische, statische Konfigurationen  
 Tolman, Oppenheimer, Volkov

was bedeutet "kalt" hier?

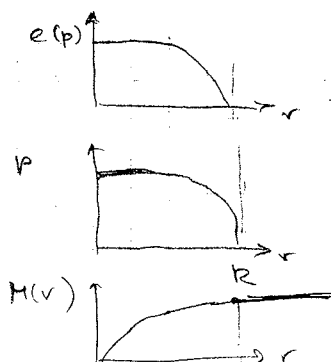
TOV-gln. haben nur Sinn für ZGL  $e(p)$ ,  
 (Hund integral)

i.a.  $S(e, h) \rightarrow P(e, h)$  d.h. ZGL ist zweiparametrig.

Hier:  $T=0$  ist zu betrachten; Recht fertigung  
 später  $\rightarrow$  für diesen Spezialfall ist  $p(e)$   
 bzw.  $e(p)$  thermodynamisch selbst-  
 konsistent

Mathematisch: 2 gekoppelte DGL (gewöhnliche)  
 man setzt  $p(r=0)$  vor; integriere bis  
 $p=0 \rightarrow R$  und  $M$

$\rightarrow p(r=0) \rightarrow R \rightarrow M$  für viele Werte  $p(r=0)$   
 $\rightarrow M(R), M(e_0 = e(r=0))$



Außerraum: äußere Schwarzschild-Lösung  
 mit  $M = M(R)$   
 bei  $r \geq R$

Rep.: TOV - fln für kugelsymmetrische  
statische Sterne (Nebenelemente):

$$(1) \quad \frac{dM}{dr} = \frac{1}{2} \rho e r^2$$

ist unveränderlich -  $p(r=0) = p_0$   
weise von  $\rho$  oder  $M(r=0) = 0$   
Struktur (wie Newton)  
keine Metrik-Koeff.

$$(2) \quad \frac{dp}{dr} = - \frac{(e+p)(M + \frac{1}{2} r^3 \rho e)}{r^2 (1 - \frac{2M}{r})}$$

Unterschied  
zu Newton-fl.

(3) sind mit  $e(p)$  als ZGL zu integrieren

(Achtung: hier spezielle Messwerte)

Annahme:  $1 \text{ MeV} = 1,78 \cdot 10^{-27} \text{ g}$  (oder hätte 1 MeV von  $\rho$ )  
↑ Dichte

Im Modell-Fall  $e = \text{const}$  analytisch zu integrieren  $\rightarrow$  vollständige Lösung der Einstein-fln.

(= interne Schwarzschild-Lösung)

Integrations-Konstante durch  $p(R) = 0$   
als gleicher Ausdruck an äußere Schwarzschild-Lösung festgelegt

Wenn noch eine kurze Skizze zu Temperatur:

warme, nicht-konvergente Sterne:

Mehrheit der Gravitation

$$T \sqrt{-g_{00}} = \text{const} : \text{Statik (keine Wärmeströme)}$$

i.e. konstante Temperatur ist nicht im Gleichgewicht!

von 3) im 2.6

Trägheit der Wärme

$$q^i = -\hat{x} (g^{ij} + u^i u^j) (T_{,j} + \Gamma_{jk}^l u^k u^l)$$

Wärmestrom

$$u_{j,k} u^k - \Gamma_{jk}^l u^k u^l$$

= 0  
Statik

$$\Gamma_{jk}^0 u^0 u^0$$

-1 (Noij)

$$= -\hat{x} (g^{ij} + u^i u^j) (T_{,j} + \Gamma_{jk}^0 T)$$

$$= -\hat{x} (g^{ij} + u^i u^j) (\sqrt{-g} T)_{,j} \frac{1}{\sqrt{-g}}$$

Wärmestrom verschwindet für  $(\sqrt{-g} T)_{,j} = 0$

Er gibt konstantestes Feld mit Rotationsbewegung!

$$\Gamma_{jk}^0 = \frac{1}{2} g^{0i} (g_{ij,0} + g_{io,j} - g_{jo,i})$$

orthogonale Metrik

$$= \frac{1}{2} g^{00} (g_{0j,0} + g_{00,j} - g_{j0,0})$$

$$= \frac{1}{2} g^{00} g_{00,j}$$

$$(\sqrt{-g_{00}})_{,j} = \frac{1}{2} \frac{-g_{00,j}}{\sqrt{-g_{00}}}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} g_{00,j} = -\sqrt{-g_{00}} (\sqrt{-g_{00}})_{,j}$$

$$= -g^{00} \sqrt{-g_{00}} (\sqrt{-g_{00}})_{,j}$$

$$= \frac{(\sqrt{-g_{00}})_{,j}}{\sqrt{-g_{00}}}$$

$$g^{00} g_{00} = 1$$

orthogonale Metrik

$$q^i = -\hat{x} (g^{ij} + u^i u^j) \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} (T \sqrt{-g_{00}})_{,j} \quad \text{g.e.d.}$$

ist nicht engde

= 0 für Statik

Newton'scher Wertes:

- $\frac{2M}{r} \ll 1$
- $p \ll \rho c^2$

$$M(r) = \frac{1}{2} \int_0^r 2 \rho c^2 e(r') r'^2 dr'$$

||  
 $8\pi \frac{G_N}{c^4}$

$$\frac{dP}{dr} = - \rho c^2 \frac{e(r) M(r)}{r^2} = - G_N \rho \frac{4\pi \int_0^r e r'^2 dr'}{r^2} = m$$

= Newton'sche Strukturgleichung (im Einklang mit dem allgemeinen Relativitätstheorie)

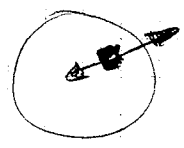
Interpretation: hydrostatischer Auftrieb

= gravitative Anziehung

auf Volumenelement  $e$   
= Nicht-Newton'sche Materie

Merke:  $e(r) \rightarrow \mu$  = Ruhemassendichte

Unter diesen Bedingungen:  $e$  ist unbeschränkt



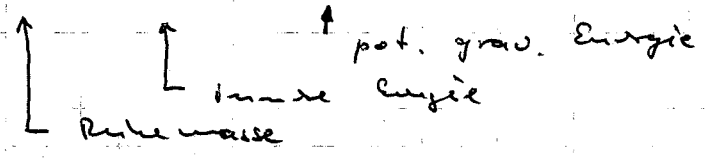
Massen / Bindungsenergie

Wegen Anschluss an äußere Schwarzschild-Lösung bestimmt

M die Bewegung von Testteilchen:

$$M = \frac{1}{2} 2 \rho c^2 \int_0^r e(r') r'^2 dr'$$

$$= M_0 + U + \Omega$$



gibt uns für kugelsymmetrische Konfigurationen!

$$\text{dann } e = e_0 + e_i = m_0 + e_i$$

Orngleich

ART :

Newton

e bzw. Massendichte  
 $\rho = \mu_N \mu$

$$m(r) = \int \mu_N \mu r^2 dr$$

$r=2$

Einstein

$e + p$

↳ je Energieform ist  
gravitierend;  
auch Druck

→ Druck Wlft Wlft  
open collapse

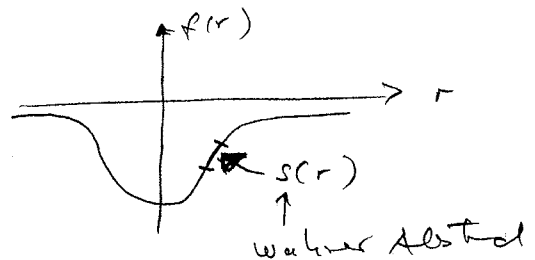
$$\int e \mu r^2 dr$$

↳ jede Energieform, auch  
innere Energie

+  $r^3 p$  ~ weil gravitierend  
Druck

$$r=2 \left( 1 - \frac{2M(r)}{r} \right)^{-1}$$

Raumkrümmung ändert sich  
durch Gradienten



Fazit : deutliche Unterschiede

