

Kernphysik

Physik der **Nukleonen**,
die sich in einem Verband
zusammenschließen (gebunden
sind)

→ **Nuklide**

Notation:



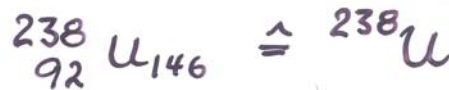
X - chemische Abkürzung des Kerns
(Element)

A - Atomzahl, Massenzahl
($\hat{=}$ Zahl der Nukleonen)

Z - Zahl der Protonen

N - Zahl der Neutronen

Beispiel:



Ausnahme: leichte Kerne

Kerne:	n	p	d	t	γ	α
	Neutron	Proton	Deuteron	Triton	${}^3\text{He}$	Alpha
Atome:	${}^1_0\text{n}$	${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{D}$	${}^3_1\text{T}$	${}^3_2\text{He}$	${}^4_2\text{He}$
	Neutron	Wasserst.	Deuterium	Tritium	Helium	

Isotope

Atome / Kerne gleicher Ladungszahl

Beispiel: p, d, t

$^{40}\text{Ca}, ^{41}\text{Ca} \dots ^{48}\text{Ca}$

Isotone

Kerne mit gleicher Neutronenzahl

Beispiel: $^{88}\text{Sr}, ^{89}\text{Y}, ^{90}\text{Zr}$

($N = 50$)

Isobare

Kerne gleicher Masse (A)

Beispiel: $t, ^3\text{He}$
 $^{88}\text{Sr}, ^{88}\text{Y}, ^{88}\text{Zr}$

Isomere

langlebige **angeregte** Kerne mit gleichem N, Z

Beispiel: $^{178}\text{Hf}^M \xrightarrow{2.45 \text{ MeV}} ^{178}\text{Hf}(\text{g.s.})$

$^{178}\text{Ta}^M$ ($\beta \rightarrow 2.5 \text{ h}$)

$^{178}\text{Ta}(\text{g.s.})$ ($\beta \rightarrow 9 \text{ min}$)

$^{180}\text{Ta}^M$ stabil!!

$^{180}\text{Ta}(\text{g.s.})$ ($\beta \rightarrow 8 \text{ h}$)

Spiegelkerne

Kerne mit vertauschtem Z & N

Beispiel: $^{13}_6\text{C}_7$ $^{13}_7\text{N}_6$

aber nicht $^{12}_6\text{C}, ^{12}_7\text{N}$

HADRONEN

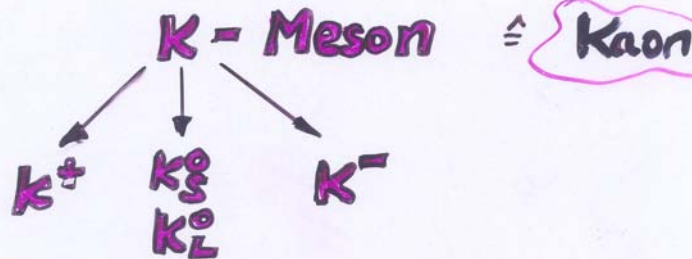
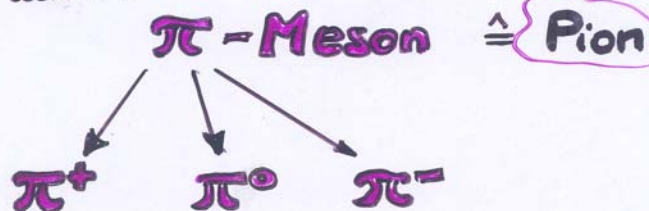
Sind:

alle **stark** wechselwirkenden Teilchen

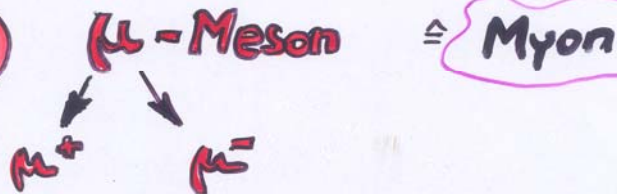
Beispiel:

Proton, Neutron, alle Kerne

aber auch:



! aber nicht



Allgemein

alle Teilchen, die eine **Quark**-Substruktur haben

Q: stark ??, Pion ??, Kaon ??, Myon ??, Quark ??

BARYONEN

alle Baryonen
sind auch Hadronen

Beispiel

p, n

Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Λ^0 , Ξ^- , Ξ^0
 ~~Ξ^+~~ , Ω^- , ~~Ω^0~~ , ~~Ω^+~~

aber nicht:

Mesonen

allgemein:

Baryonen: Teilchen mit 3-Quark-Substruktur (qqq)

Mesonen: Teilchen mit Quark-Antiquark-Substruktur (q \bar{q})

Quarks

q = +2/3 : **u** (up) **c** (charm) **t** (top, true)

q = -1/3 : **d** (down) **s** (strange) **b** (bottom, beauty)

LEPTONEN

sind: punktförmige **Elementarteilchen**
die **NICHT** stark wechselwirken

e Elektron **μ** Myon **τ** Tau

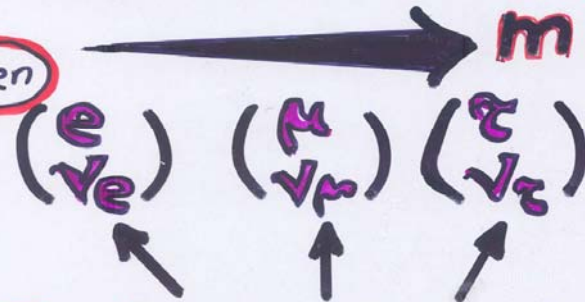
ν_e e-Neutrino **ν_μ** μ -Neutrino **ν_τ** τ -Neutrino

Quarks



Ladung
 $+ 2/3$
 $- 1/3$ $\Delta q = 1$

Leptonen



$- 1$
 0 $\Delta q = 1$

Fermionen

Familien, Generationen

zusätzlich : Gauge-Bosonen

$\gamma, W^+, Z^0, W^-, g, G$
 Gluon Graviton

alle Teilchen unterliegen der **Gravitation**
 Quarks, Leptonen unterliegen der **schwachen**
 oder **Leptonischen WW**
 geladene Teilchen unterliegen der **elektro-**
magnetischen WW
 Quarks unterliegen der **starken** oder
hadronischen W
 Teilchen $\hat{=}$ Elementarteilchen!

Weiterhin

Alle Teilchen sind instabil
mit Ausnahme:

Proton

Elektron

Neutrinos ?

γ

Neutron \leftarrow nur im Kernverband!

Graviton ?

Quarkinhalt: Proton = (uud)
Neutron = (udd)

für Kernphysik
nur p, n, e ν , γ
von Bedeutung
Nukleus: $Z \times p^{(+)} + N \times n^{(0)} + Z e^{-}$
weiterhin: Die Quarkstruktur von p & n
wird in der Kernphysik nicht
deutlich

Energien

$$\begin{aligned} \text{eV} &\hat{=} 1 \text{ elementare Ladung} \times 1 \text{ Volt} \\ &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Cb} \times 1 \text{ Volt} \\ &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Asec} \times \text{Volt} \\ &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Wsec} \\ &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{Atomphysik} : 10^{-6} \text{ eV} \lesssim E_{\text{Atom}} \leq 10^5 \text{ eV}$$

$$\text{Kernphysik} : 10^3 \text{ eV} \lesssim E_{\text{Kern}} \leq 10^8 \text{ eV}$$

$$\text{Teilchenphysik} : 10^8 \text{ eV} \lesssim E_T \leq \infty$$

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$\text{MeV} = 10^3 \text{ keV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$\text{GeV} = 10^3 \text{ MeV} = 10^6 \text{ keV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$\text{TeV} = 10^3 \text{ GeV} \dots \dots = 10^{12} \text{ eV}$$

Atomphysik \rightarrow \leq keV-Physik

Kernphysik \rightarrow MeV-Physik

Teilchenphysik \rightarrow GeV-Physik

Problem :

100 GeV p macht eine massive Reaktion

1 kg Wasser aus 1 m Höhe fallend

$\sim 10^8$ mal größere Energie

ABER: keine Kernreaktion

Längenskalen

Atomphysik : $\circ (10^{-10} \text{ m}) = \circ (\text{\AA}) \sim \text{Atom } \phi$
Kernphysik : $\circ (10^{-15} \text{ m}) = \circ (\text{fm}) \sim \text{Kern } \phi$

Fermi oder Femtometer

Teilchenphysik : $< 10^{-15} \text{ m}$

Beispiel

Volumen Atom : $\circ (10^{-30} \text{ m}^3)$
Proton : $\circ (10^{-45} \text{ m}^3)$
Kern : $\circ (10^{-43} \text{ m}^3)$



> Atom ist fast leer ! $R(\text{Erde}) \hat{=} 300 \text{ m}$

Massenskalen

$$E = mc^2$$

$$\bullet m_0(p) = E/c^2 = 938.279 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}$$

$$\bullet m_0(n) = E/c^2 = 939.573 \text{ MeV}/c^2 > m_0(p)$$

$$\bullet m_0(e^-) = 511 \text{ KeV}/c^2 \approx 1/1836 m_0(p)$$

$$\bullet m_0(\nu) \approx 0$$

$$\bullet m_0(h\nu) \equiv 0$$

$$m_0(\mu) = 105.65943 \text{ MeV}/c^2$$

$$\sim 10\% m(p)$$

$$\sim 200 \times m(e^-)$$

$$m(\pi^\pm) = 139.567 \text{ MeV}/c^2$$

$$\sim 14\% m(p)$$

$$m(\pi^0) = 134.963 \text{ MeV}/c^2$$

$$= m(\pi^\pm) - \sim 5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_0(\Sigma) \sim 1380 \text{ MeV}$$

$$m_0(\Xi) \sim 1540 \text{ MeV}$$

$$m_0(\Delta) \sim 1670 \text{ MeV}$$


} lasse c^2 weg

WICHTIG

$$m_0(n) > m(p)$$

$$\Delta m = 1.29 \text{ MeV}$$

$$\begin{array}{r} \overline{m(n) = 939.57} \\ \updownarrow \\ \underline{m(p) = 938.28} \end{array}$$

d.h. Neutron kann zerfallen  aber wie?



$$\text{Energie} = m(n) - \{m(p) + m(e^-) + m(\bar{\nu}_e)\}$$

$$\approx 780 \text{ keV}$$

Welche WW "bindet" Nukleonen?

Wie groß ist diese Bindungsenergie?

Beispiel ①



$$\begin{aligned} \text{i)} \quad 6 \cdot M_p + 6 \cdot M_n &= 6 \cdot (938.279 + 939.573) \\ &= 11\,267.112 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\text{ii)} \quad M({}^{12}\text{C} - 6e^-) = \underline{11\,174.950 \text{ MeV}}$$

$$E_B = \text{i)} - \text{ii)} = 92.162 \text{ MeV}$$

$$E_B/N = 7.68 \text{ MeV}$$

Beispiel ②



$$\text{i)} \quad 40 \cdot M_p + 50 \cdot M_n = 84\,509.834 \text{ MeV}$$

$$\text{ii)} \quad M({}^{90}\text{Zr} - 40e^-) = \underline{83\,728.20 \text{ MeV}}$$

$$\text{i)} - \text{ii)} = 781.634 \text{ MeV}$$

$$E_B/N = 8.685 \text{ MeV}$$

0.8 % Masse $\xleftrightarrow{mc^2}$ Energie

atomare Bindungsenergien:

$$\text{Bohr'sche Bahn: } \frac{e^2}{2a_0} = 13.6 \text{ eV}$$

$$\text{Ionisationsenergien: } \sim \text{eV} - \text{keV}$$

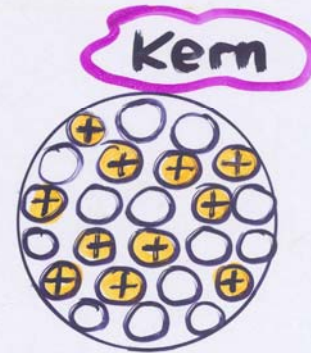
d.h.

● Kern-WW verschieden von Atom-WW

● im übrigen:



attraktive
Coulomb-WW



repulsive
Coulomb-WW

Gravitationsenergie?

$$V_{\text{grav}} = G \frac{M_1 M_2}{r}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{erg cm}}{\text{g}^2}$$

$$= 1.1 \cdot 10^{-36} \frac{\text{MeV fm}}{\langle M_N \rangle^2}$$

$$V_{\text{grav}} = 1.1 \cdot 10^{-36} \frac{A_1 A_2}{r [\text{fm}]} \quad [\text{MeV}]$$

$$\frac{E_B^{\text{grav}}}{E_B^{\text{kern}}} \sim 10^{-38}$$

Das "amu" als neue Einheit

Definiere

atomic mass unit

$$\begin{aligned} 1 \text{ amu} &= \frac{1}{12} M(^{12}\text{C}\text{-Atom}) \\ &= \frac{1}{12} \left\{ 6 M_p + 6 M_n + 6 M_e \right. \\ &\quad \left. - E_{\text{Kern}}^{\text{B}} - E_{\text{Atom}}^{\text{B}} \right\} \\ &= \mathbf{931.494 \text{ MeV}} \\ &\quad (\sim 1 \text{ GeV}) \end{aligned}$$

damit:

$$\begin{aligned} M_p &= 1.007276 \text{ amu} \\ M_n &= 1.008665 \text{ amu} \\ M_H &= 1.007825 \text{ amu} \\ M_{e^-} &= 0.5486 \cdot 10^{-3} \text{ amu} \end{aligned}$$

Warum nicht $1 \text{ amu} = M_p$



Fassen wir zusammen:

Aus einfachen Überlegungen zur Bindungsenergie folgern wir, daß wir es mit einer neuen und **extrem starken** Kraft zu tun haben, die außerhalb unseres Erfahrungsbereichs steht

starke
↓
hadronische

Wechselwirkung

zur Reichweite

Die neue Kraft kann nicht sehr reichweitig sein, die in unserem Erfahrungsbereich (Biologie, Chemie) solche extreme Energien nie vorkommen
d.h.

$$V_{\text{kern}} \neq \frac{1}{r} \text{-Potential}$$
$$\neq \left(\frac{1}{r}\right)^n \text{-Potential}$$

Ansatz!

$$V_{\text{kern}}(r) = -G \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{r-R_0}{a}}} \right)$$

Woods-Saxon-Potential

Fassen wir zusammen:

Aus einfachen Überlegungen zur Bindungsenergie folgern wir, dass wir es mit einer neuen und **extrem starken** Kraft zu tun haben, die außerhalb unseres Erfahrungsbereichs steht

starke
↑
hadronische

Wechselwirkung

Zur Reichweite:

Die neue Kraft kann nicht sehr reichweitig sein, da in unserem Erfahrungsbereich (Chemie, Biologie) solche Extremen Energien nie vorkommen d.h.

$$V_{\text{Kern}} \neq \frac{1}{r} - \text{Potential} \neq \left(\frac{1}{r^n} \right) - \text{Potential}$$

Ansatz:

$$V_{\text{Kern}}(r) = -G \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{r-R_0}{a}}} \right)$$

Woods-Saxon-Potential

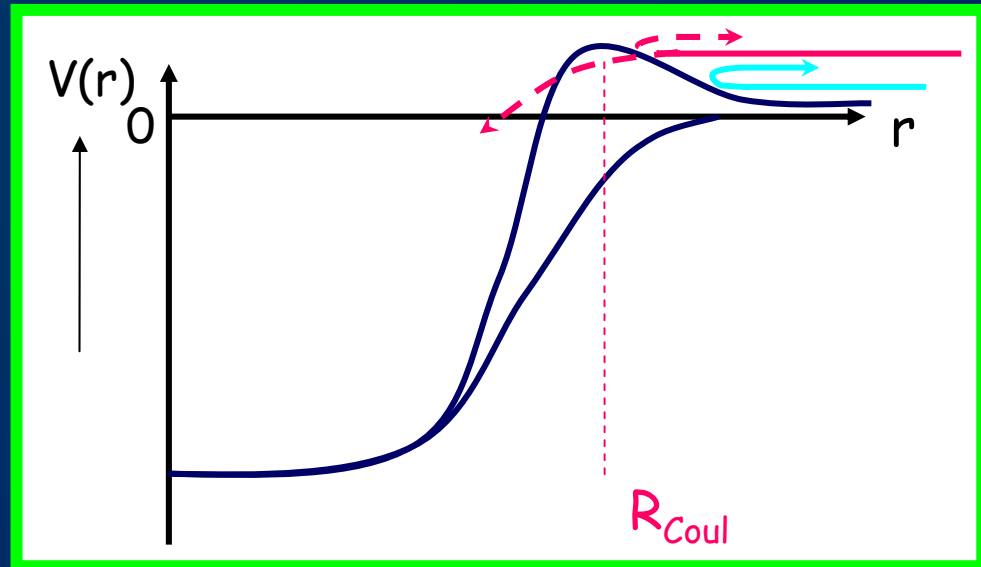
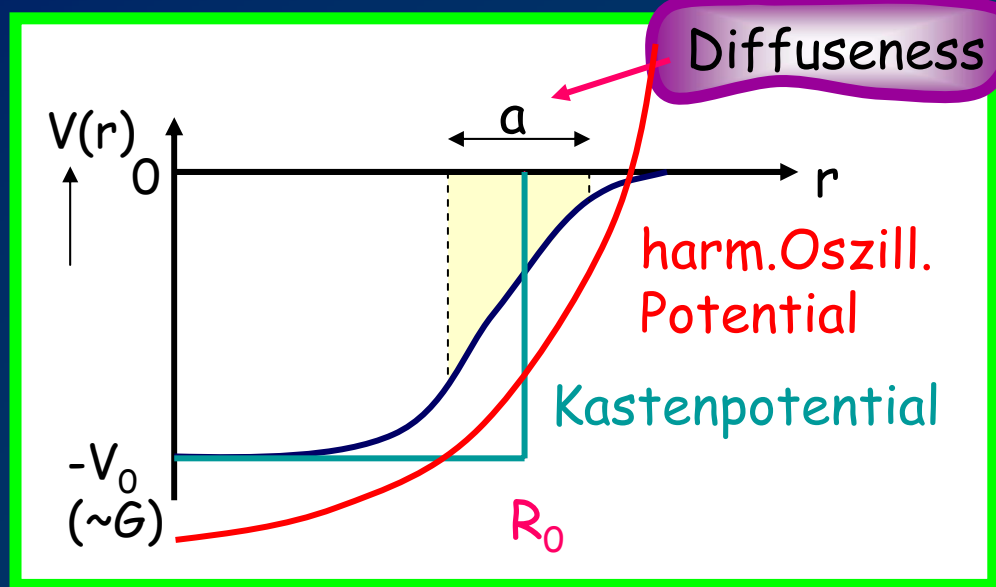
$$V_{\text{Kern}}(r) = -G \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{a}\right) \right]^{-1}$$

diesem Potential überlagert

$$V_{\text{Coul}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_0 Z_1}{r} = 1,44 \frac{Z_0 Z_1}{r [\text{fm}]} [\text{MeV}]$$

falls sich ein Teilchen mit Z_0
dem Kern mit Z_1 nähert

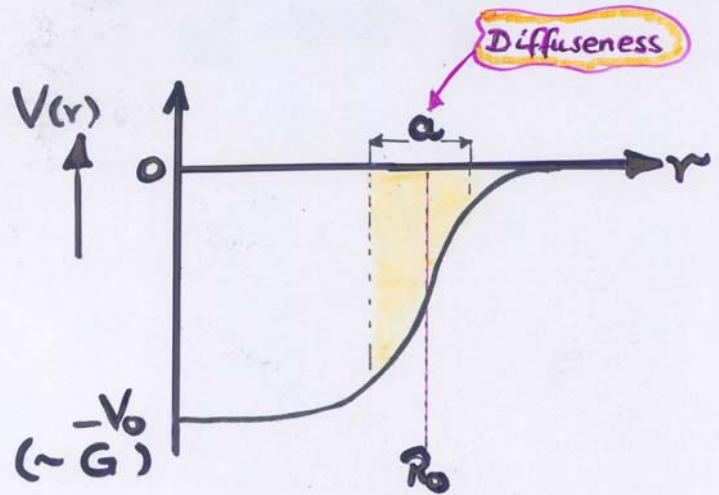
Frage: Wie groß ist R_0 ?



5

13

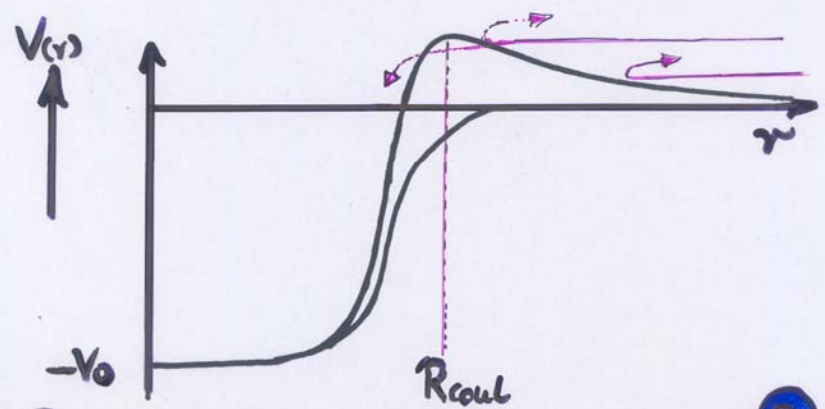
$$V_{\text{kern}}(r) = -G \left[1 + \exp\left(\frac{r-R_0}{a}\right) \right]^{-1}$$



diesem Potential überlagert

$$V_{\text{coul}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{z_0 z_1}{r} = 1.44 \frac{z_0 z_1}{r [\text{fm}]} \text{ [MeV]}$$

falls ein Teilchen mit z_0 sich dem kern mit z_1 nähert



Frage: Wie groß ist R_0 ?

Reichweite der Kernkraft (Kernradius)

► Coulombstreuung

historisch: $\alpha + Au \rightarrow {}^{197}\text{Au}(\alpha, \alpha){}^{197}\text{Au}$

► Elektronenstreuung

Rutherford 1911

misst Ladungsverteilung

$$\rho(r) \quad \left({}^A\text{X}(e^-, e^-) {}^A\text{X} \right)$$

aber nicht

$$\succ R_{\text{Kern}}^2 = \langle r^2 \rangle = \int_0^{\infty} r^2 \rho(r) dr$$

„Ladungsverteilung“ für Neutronen

dazu üblicherweise **hadronische** Proben

wie: p, π^{\pm}, K^+

► μ -ische oder π -ische Atome

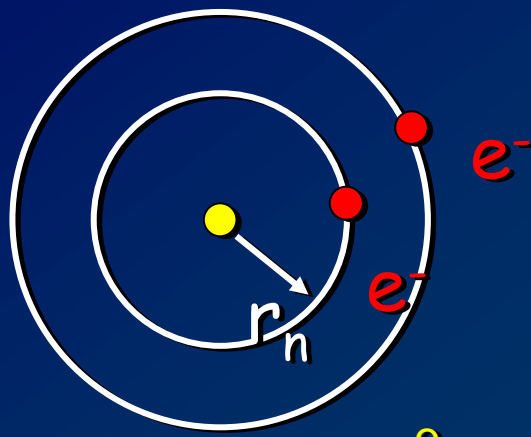
Idee:

Myon ist ein schweres Elektron ${}^A\text{X} + \mu^-$ (capture)

ersetze in der Atomphysik: $m_e \rightarrow m_{\mu}$

$\left(\pi^- \right)$

myonische,
pionische
Atome



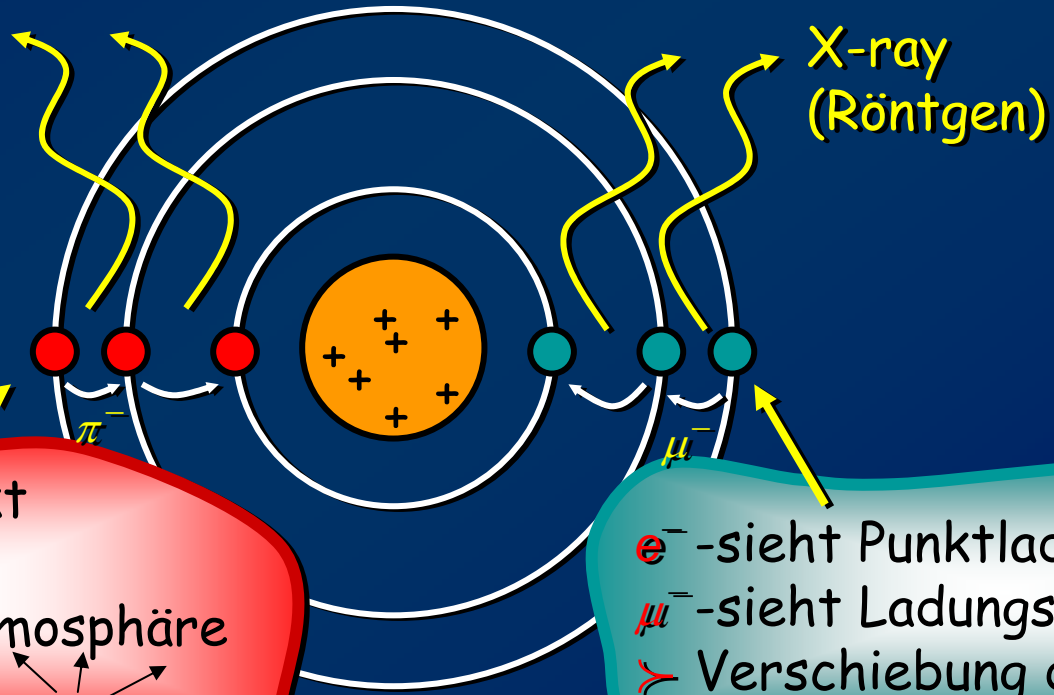
$$r_n = \frac{a_0 n^2}{Z} \quad a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e}$$

Bohr - Radius
(~ 1Å)

da $m_\mu \approx 200m_e$

$$\gamma r_0^\mu \sim \frac{1\text{\AA}}{200 \cdot Z}$$

$Z=50 \rightarrow \sim 10 \text{ fm}$
 $Z=82 \rightarrow \sim 6 \text{ fm}$



π^- wechselwirkt
hadronisch
mit der Kernatmosphäre

$$\gamma \quad {}^A X + \pi^- \rightarrow \dots$$

e^- -sieht Punktladung
 μ^- -sieht Ladungsverteilung
 γ Verschiebung der Niveaus

Ergebnisse der Elektronenstreuung

Erinnere:

e-Streuung misst Ladungsverteilung $\rho(r)$

$$R_{\text{Kern}}^2 = \langle r^2 \rangle = \int_0^{\infty} r^2 \rho(r) dr$$

aber nicht!

„Ladungsverteilung“ für Neutronen

dazu üblicherweise hadronische Proben wie:

$$\rho, \pi^{\pm}, K^+$$

gemessene (e,e)-Ladungsverteilungen

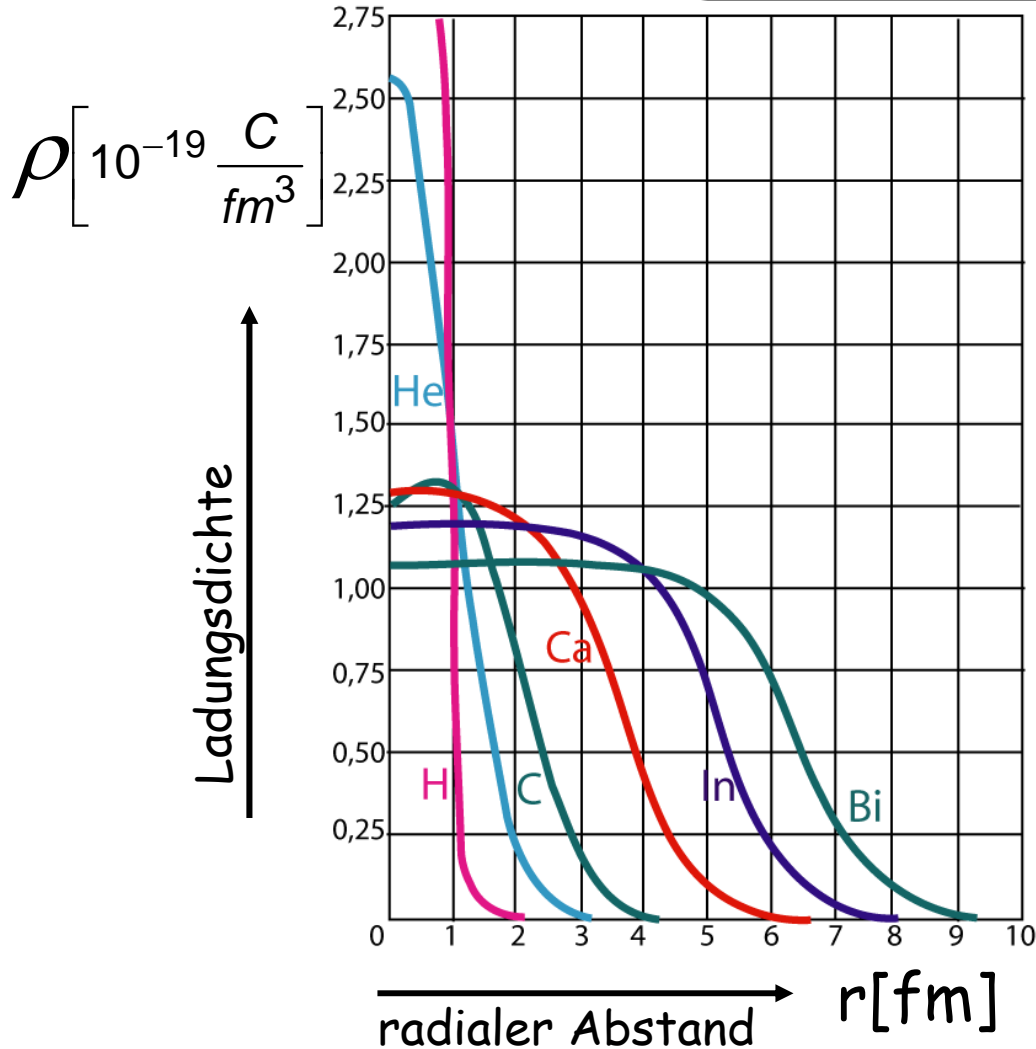
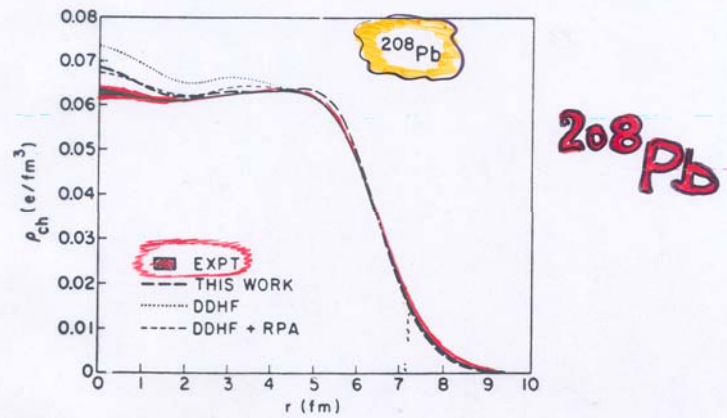
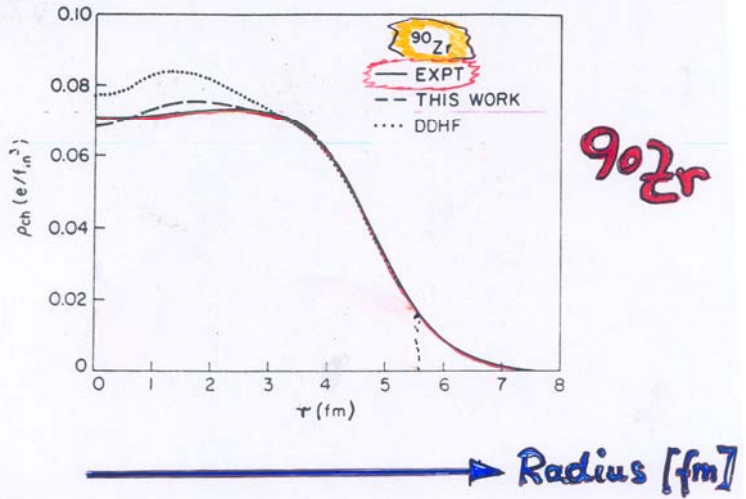
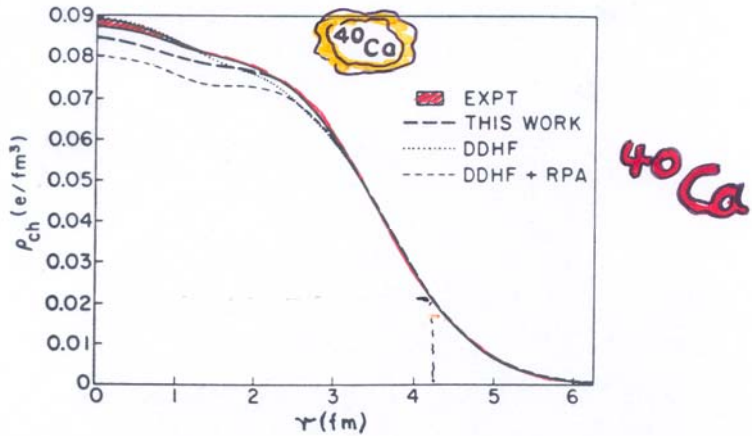
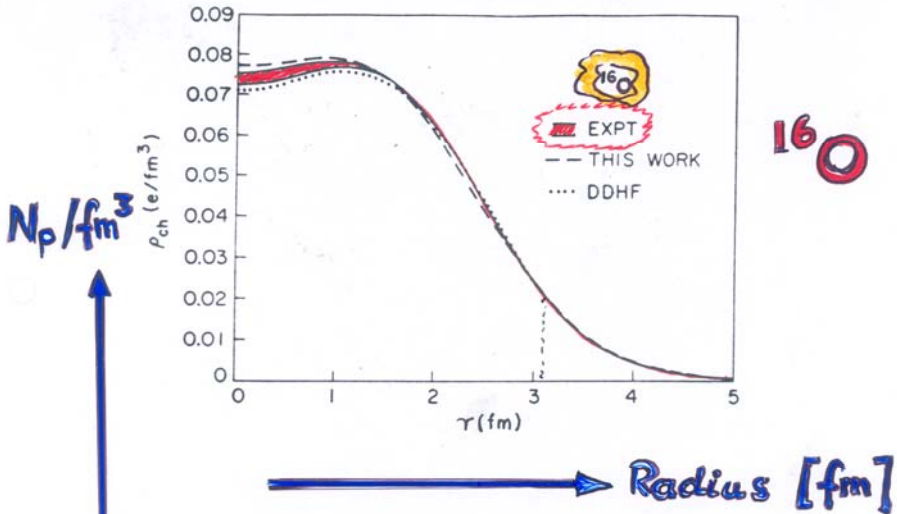
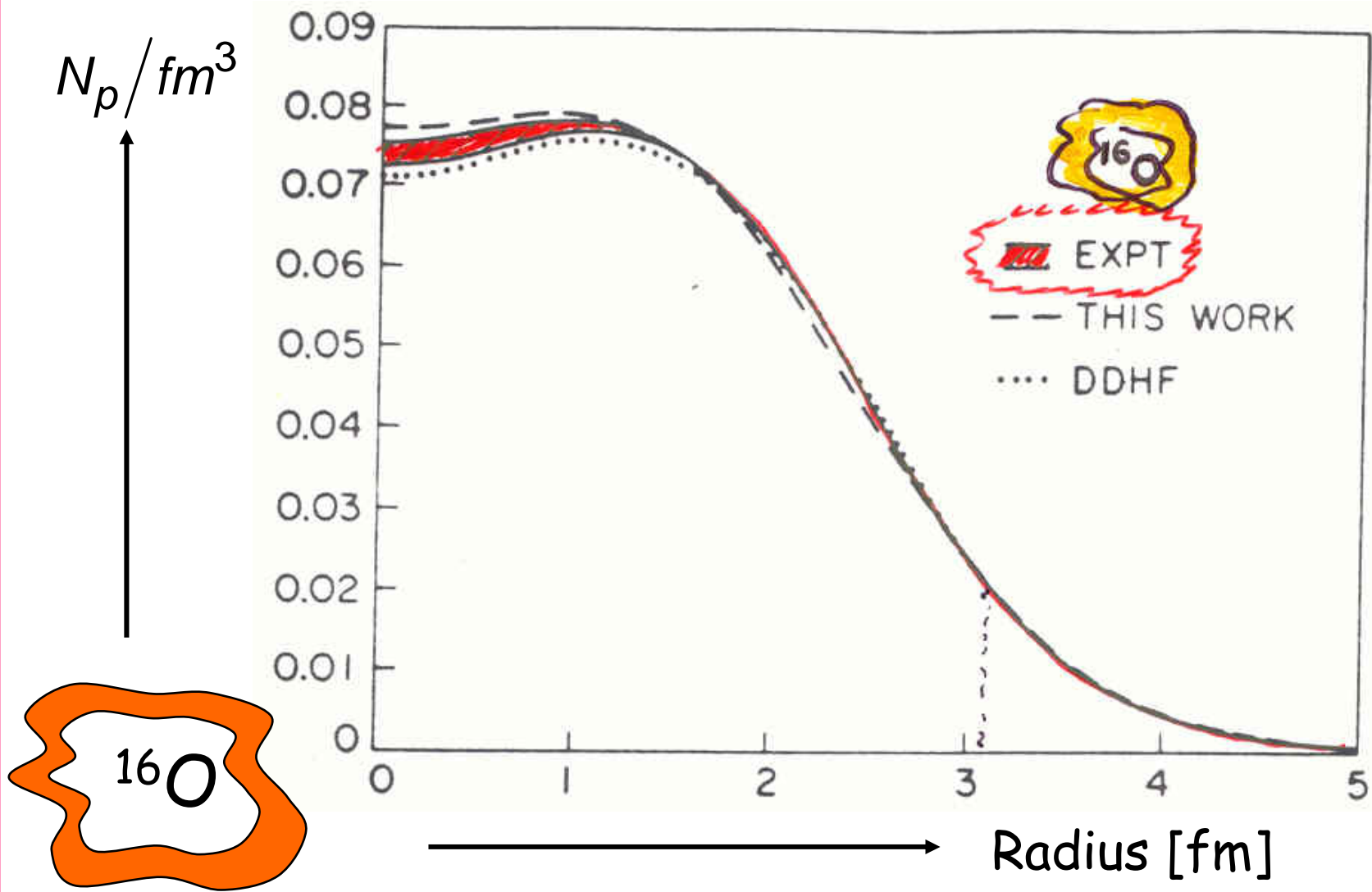


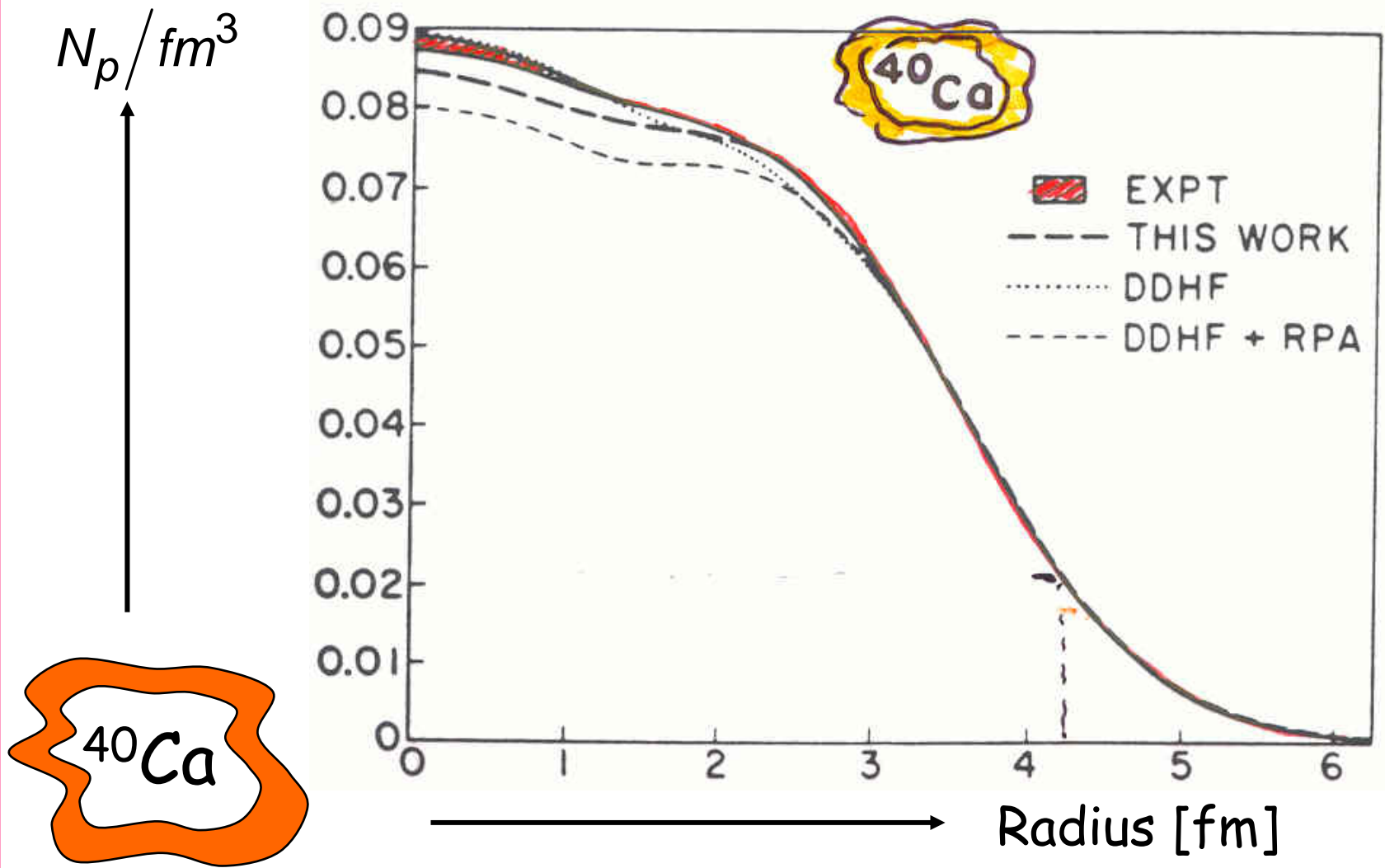
Fig. 7b)
Ladungsdichteverteilung
für verschiedene
Kerne nach [Hof57]

C.J. Horowitz, B.D. Serot / Self-consistent Hartree description

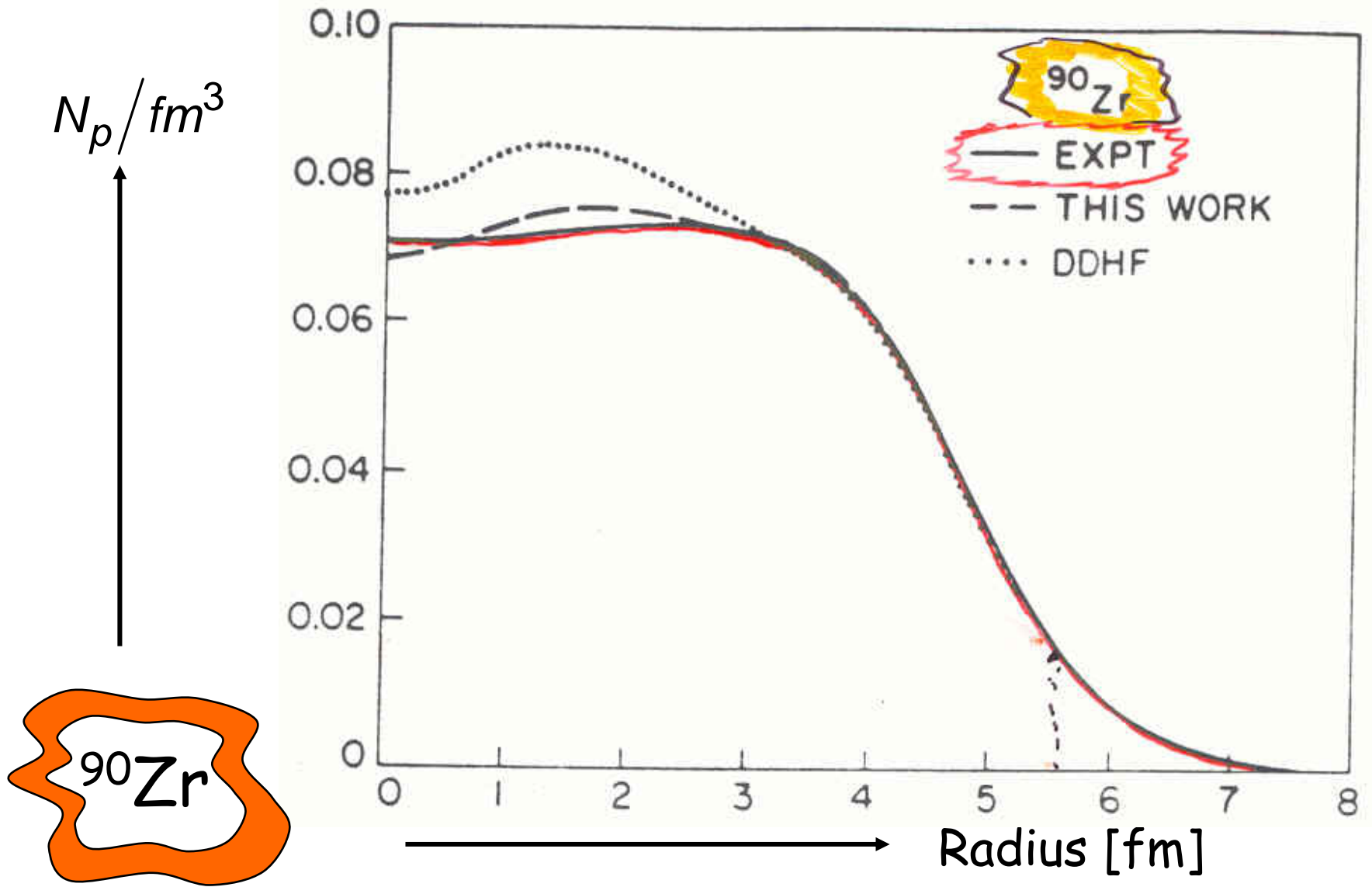




C.J. Horowitz, B.D. Serot / Self-consistent Hartree description



C.J. Horowitz, B.D. Serot / Self-consistent Hartree description

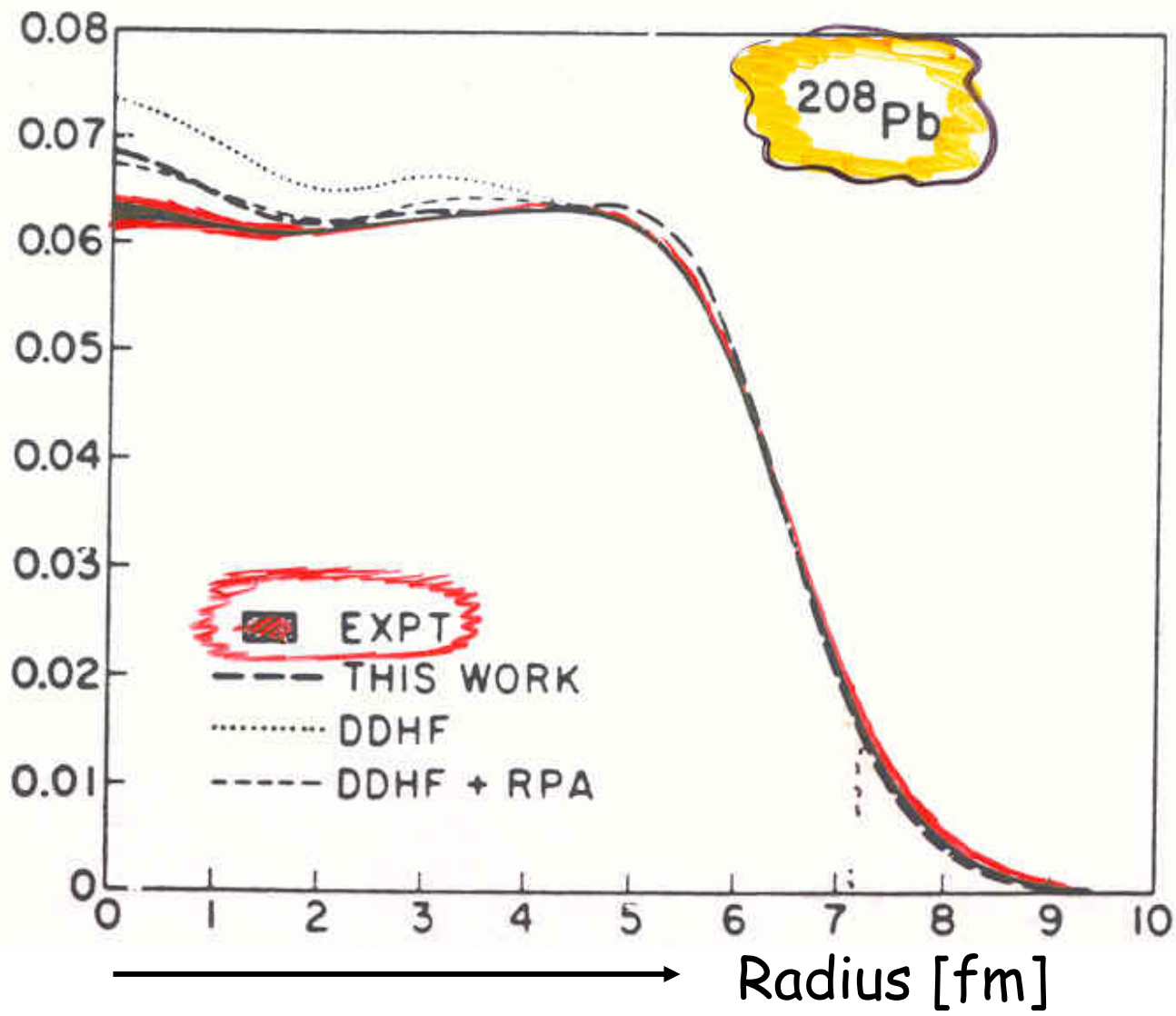


C.J. Horowitz, B.D. Serot / Self-consistent Hartree description

N_p / fm^3



208Pb

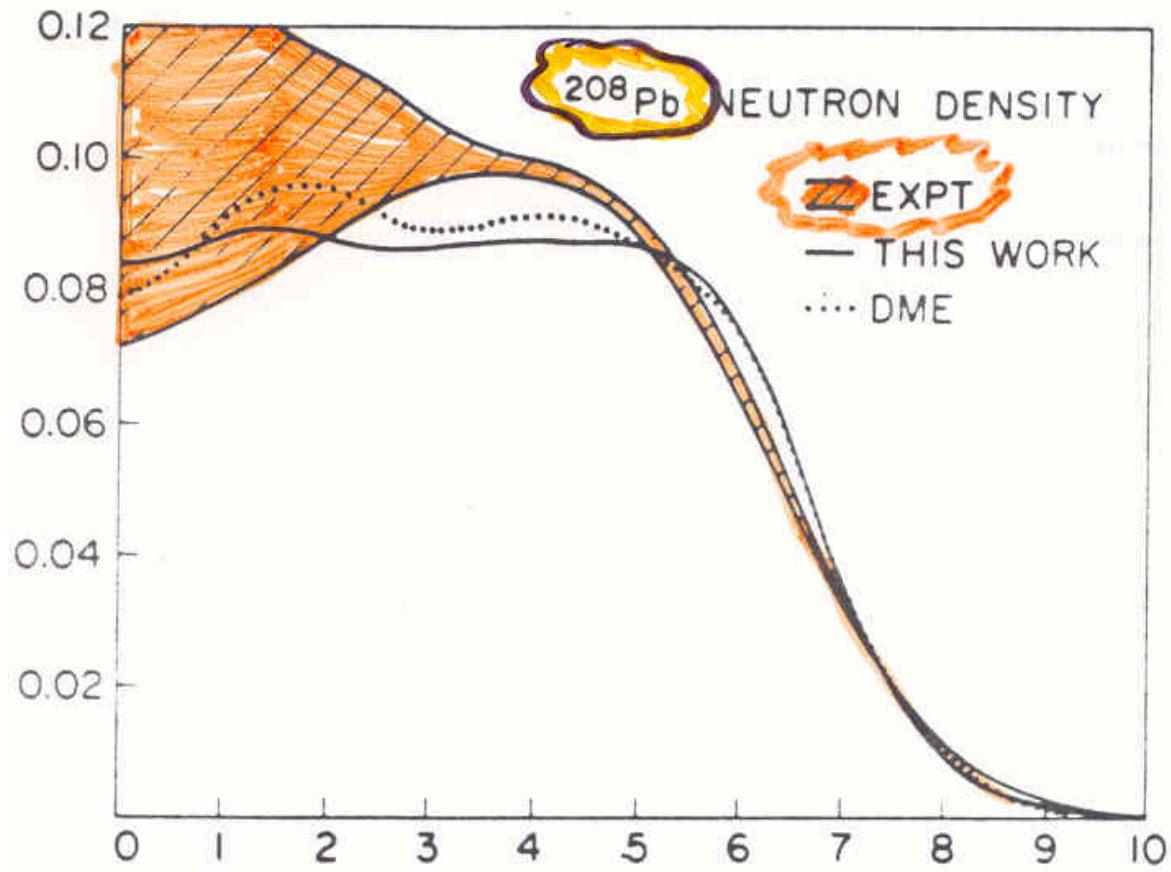


Neutron Dichteverteilung

N_n / fm^3



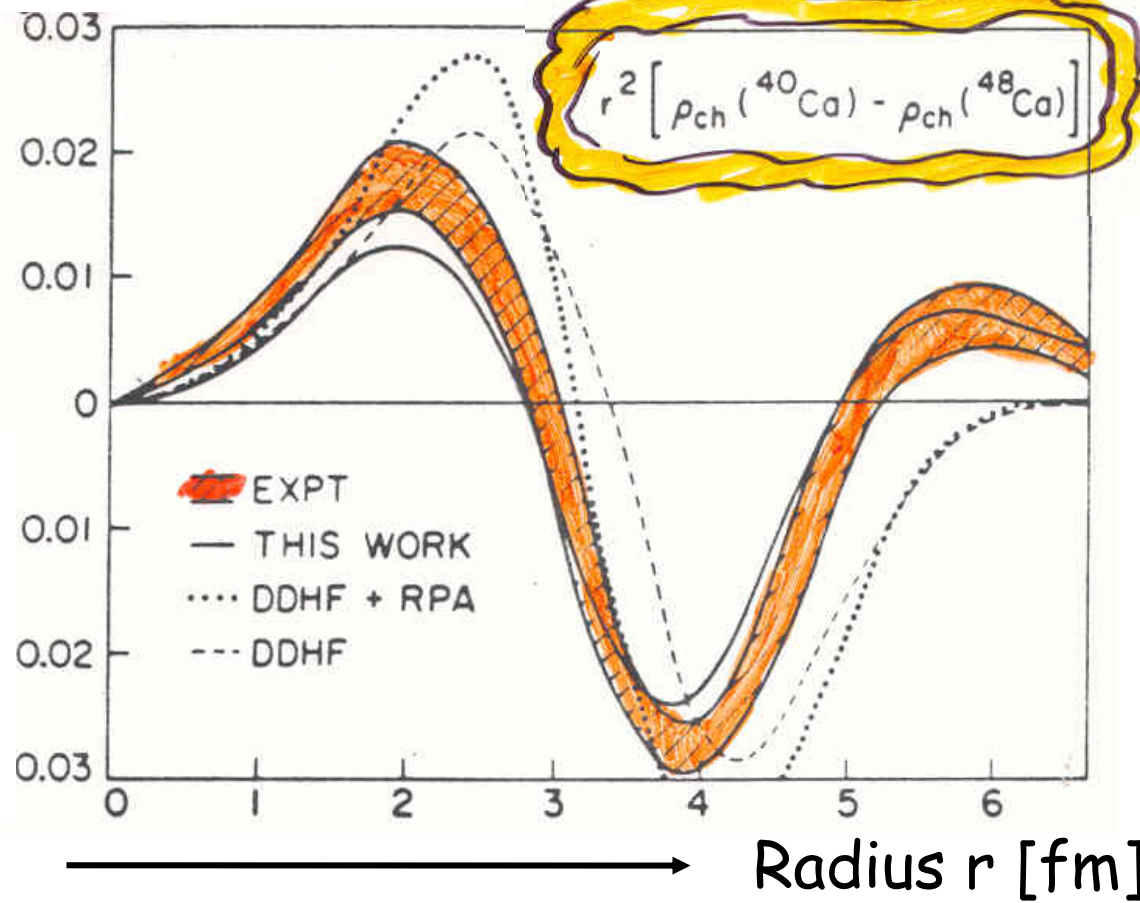
208Pb



Radius [fm]

Differenz der Ladungsverteilung von ^{40}Ca und ^{48}Ca

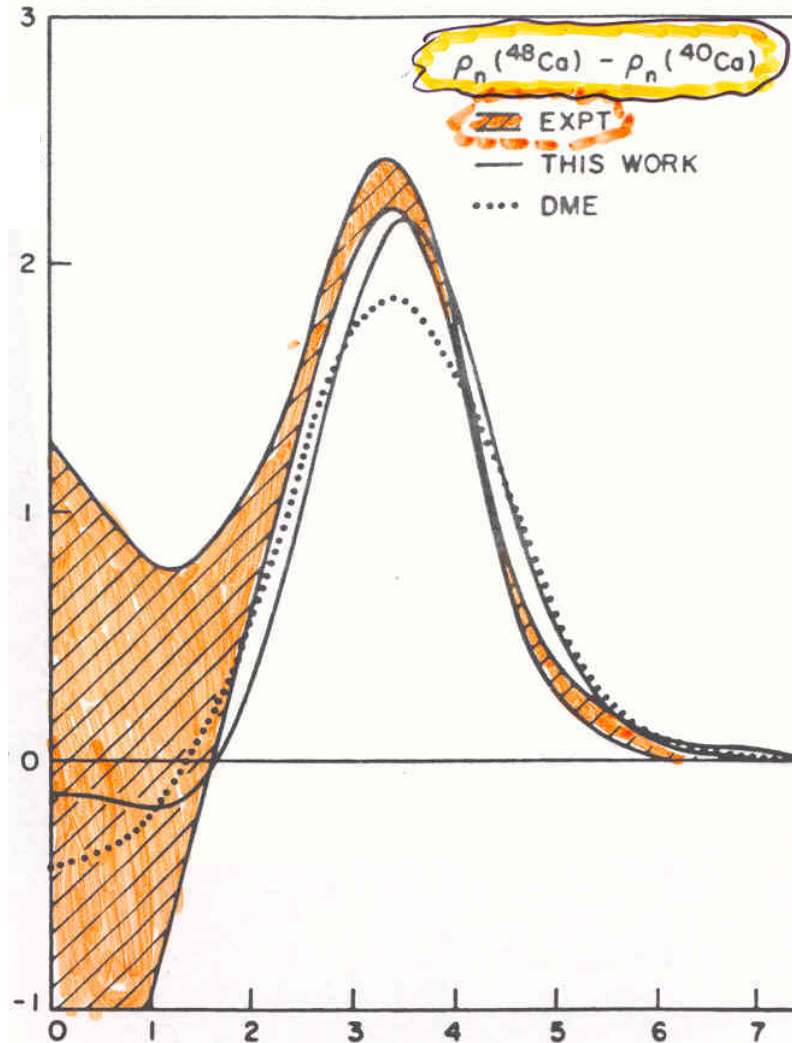
$$r^2 \Delta \rho \left[e/\text{fm}^3 \right]$$



Befund: Im ^{48}Ca befinden sich geringfügig mehr **Protonen** am Rand als im ^{40}Ca

Differenz der Neutronendichteverteilung. von ^{40}Ca und ^{48}Ca

$$\Delta N_n / 10^{-2} \text{ fm}^2$$



Radius r [fm]

Befund:

Im ^{48}Ca befinden sich auch mehr Neutronen am Rand als im ^{40}Ca

Befund

● Kernradien skalieren mit $A^{1/3}$
 $R = r_0 A^{1/3}$; $r_0 \sim 1.25 \text{ fm}$

● > Kernvolumen $\sim A$
 $V = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A = c_0 A$

● > ~~Kern~~dichte ist konstant
 $\rho_K = \frac{M}{V} = \frac{c_1 A}{c_0 A} = \text{const}$

mittlere Dichte der Kerne
ist konstant

> **SÄTTIGUNG**