### Atome und ihre Kerne

Die dunkle Seite des Protons

Franziska Hagelstein

Randolf Pohl

Johannes Gutenberg-Universität Exzellenzcluster PRISMA+

PRISMA+ Vortragsreihe Bachelor 17.01.2023







European Research Council Established by the European Commission

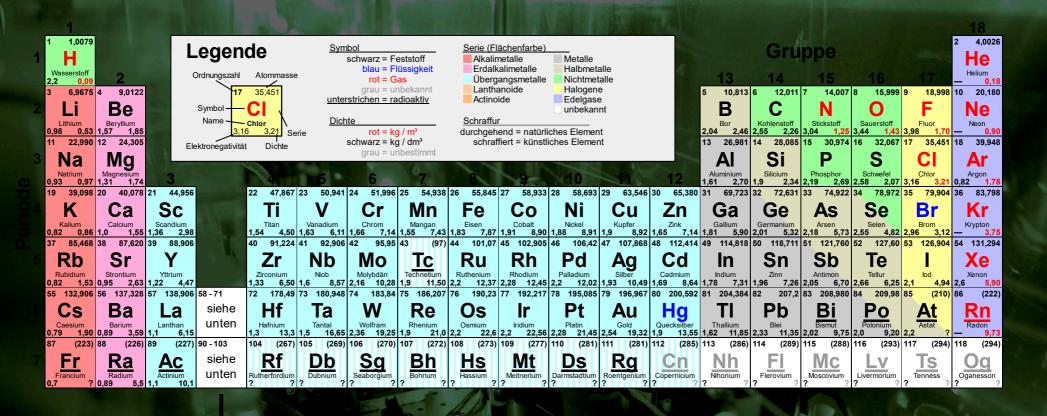


Precision Physics, **Fundamental Interactions** and Structure of Matter

# Die Experimente

- Elektron-Proton Streuung (MAMI)
- Laserspektroskopie an Wasserstoff
- Elementarteilchen: Myonen
- Laserspektroskopie von myonischem Wasserstoff
- und (k)eine Antwort auf die Frage:
- "Wie groß ist das Proton?"
- Viel Spaß!

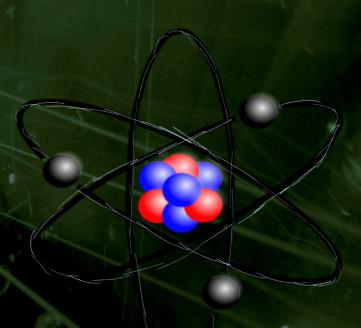
### Periodensystem der Elemente



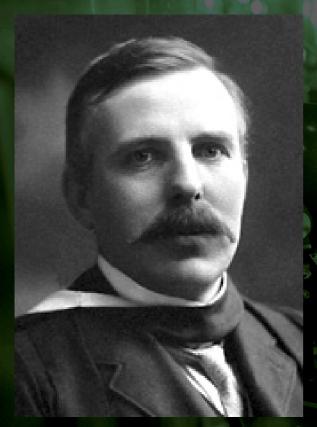
58	140,116	59	140,908	60	144,242	61		(14	5) 6	2 150,	,360	63	151,96	64 6	4	157,25	65	158,925	66	162,50	00 6	7 164,930	68	167,25	9 69	168,9	934	70 173,	045	71 1	174,967
	Се		Pr		Nd		Pm		Sm		า	Eu			Gd			Tb		Dy		Но		Er		Tm		Yb		Lu	
	Cer		Praseodym		Neodym		Promethiu		n Samarium		ım	Europium			Gadolinium			Terbium		Dysprosium		Holmium		Erbium		Thulium		Ytterbium		Lutetium	
1,12	6,77	1,13	6,48	1,14	4 7,01	1,1	3	7,2	2 1	,17 7	7,54	1,2	5,2	25 1	,2	7,89	1,1	8,25	1,2	2 8,5	55 1	,23 8,78	1,2	24 9,0	5 1,2	25 9	,32	1,1	6,97	1,27	9,84
90	232,038	91	231,036	92	238,029	93	Ш	(23	7) 9	4 (2	244)	95	(24	3) 9	6	(247)	97	(247)	98	(25	1) 9	9 (252	10	0 (25	7) 10	1 (2	58)	102 (2	59)	103	(262)
٦	Γh	F	Pa		U		N	p		Pu	ı	F	۱m		C	m		Bk		Cf		Es	Ш	Fm		Md		No			_r
Th	norium	Prot	actinium		Uran	N	eptu			Plutoniu			nericium			ırium		Berkelium		alifornium		Einsteinium		Fermium		endelevi		Nobeliui			encium
1,5	11,72	1,3	15,4	1,36	6 18,95	1,3	8	20,4	5   1	,3 19	9,82	1,28	13,6	7 1	,3	13,51	1,3	14,78	1,3	15	,1   1	,3	1,3	3	? 1,3	3	?	1,3	?	1,3	?

### Atome!

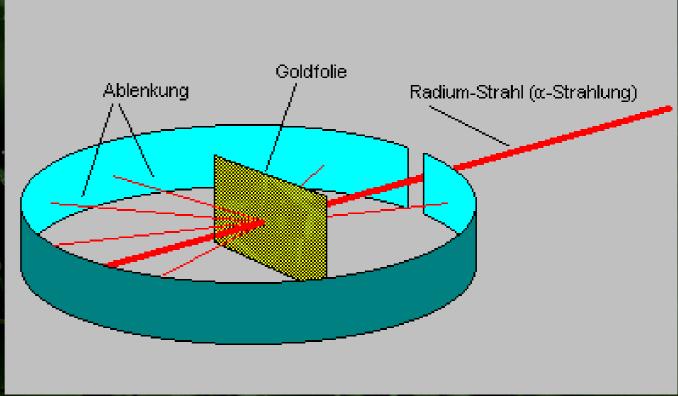
- Atome haben einen Kern, der von Elektronen umkreist wird
- Der Kern besteht aus Protonen und Neutronen
- Protonen bestehen aus Quarks, die von den Gluonen zusammen gehalten werden
- Protonen sind also ausgedehnte Objekte
- Elektronen sind punktförmig
- Wasserstoff ist das einfachste aller Atome:
  - ein (ausgedehntes) Proton, und
  - ein (punktförmiges) Elektron



### Ernest Rutherford – 1911

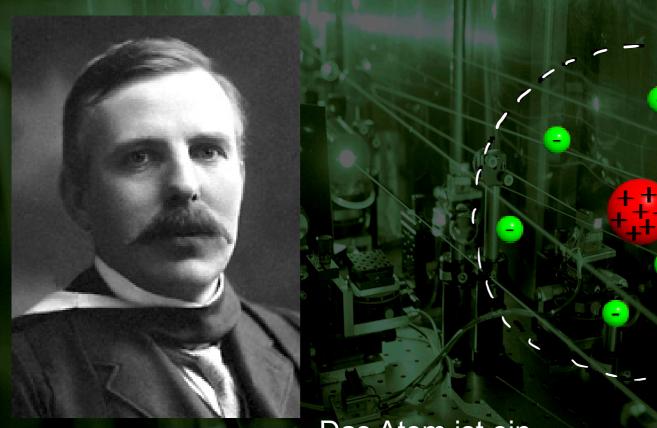


1871 – 1937 Nobelpreis 1908 Rutherford beschießt eine dünne Goldfolie mit Alpha-Teilchen



Die meisten Alpha-Teilchen passieren die dünne Goldfolie ungehindert. Wenige werden jedoch stark abgelenkt.

### Ernest Rutherford – 1911

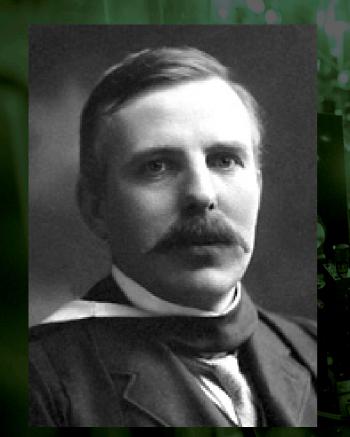


1871 – 1937 Nobelpreis 1908 Das Atom ist ein

sehr kleiner, schwerer, positiv geladener Atomkern

umkreist von negativ geladenen Elektronen

### Ernest Rutherford – 1917



$$^{14}N + \alpha \rightarrow ^{17}O + p$$

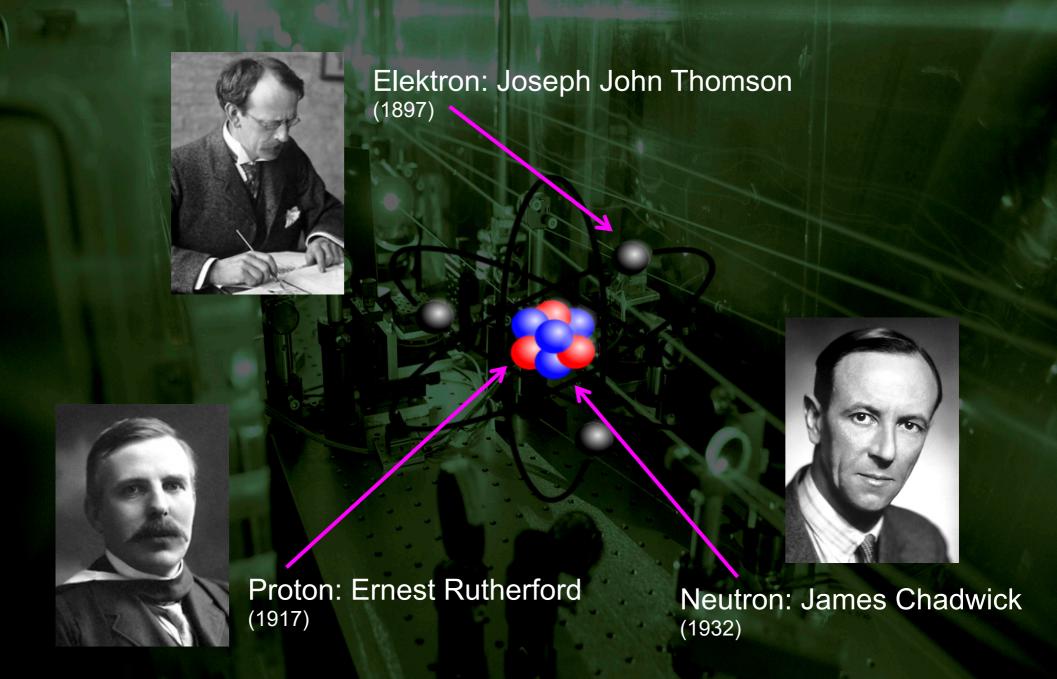
Rutherford gelingt die erste Kernreaktion beim Beschuss von Stickstoff mit Alpha-Teilchen.

Dabei entdeckt er das Proton

### 106 Jahre Proton !!!



### Die Bausteine der Materie



# Proton – 3 Quarks

### Proton – >>3 Quarks

### proton

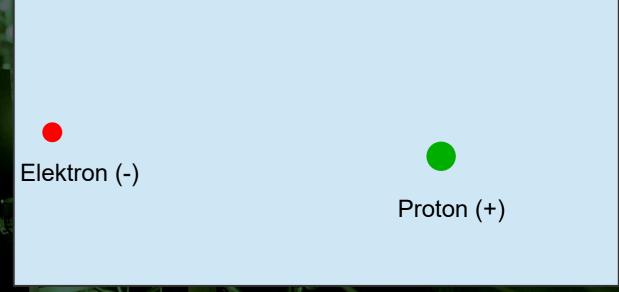
```
s g
s g
u g
                                     d g
g d
                        g
uu
                                      g
g
                              đ
                               ggd
g u
```

Matt Strassle

### Robert Hofstadter – 1955



1915 – 1990 Nobelpreis 1961

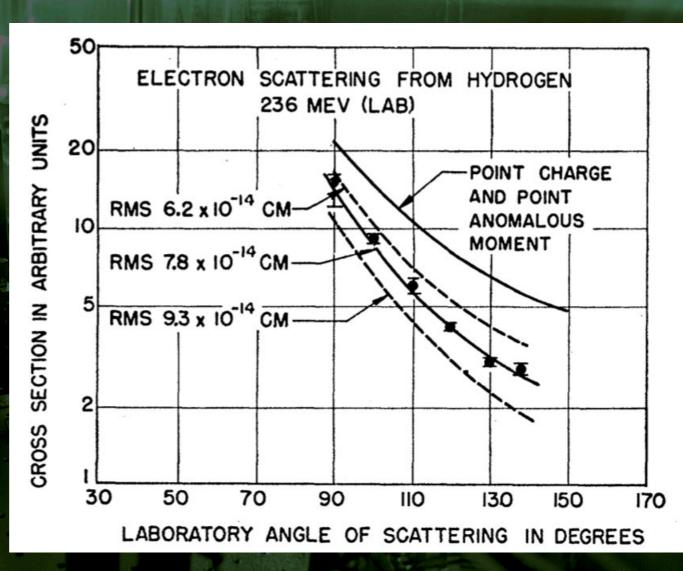


Streuung von (negativ geladenen) Elektronen an (positiv geladenen) Protonen.

### Robert Hofstadter – 1955

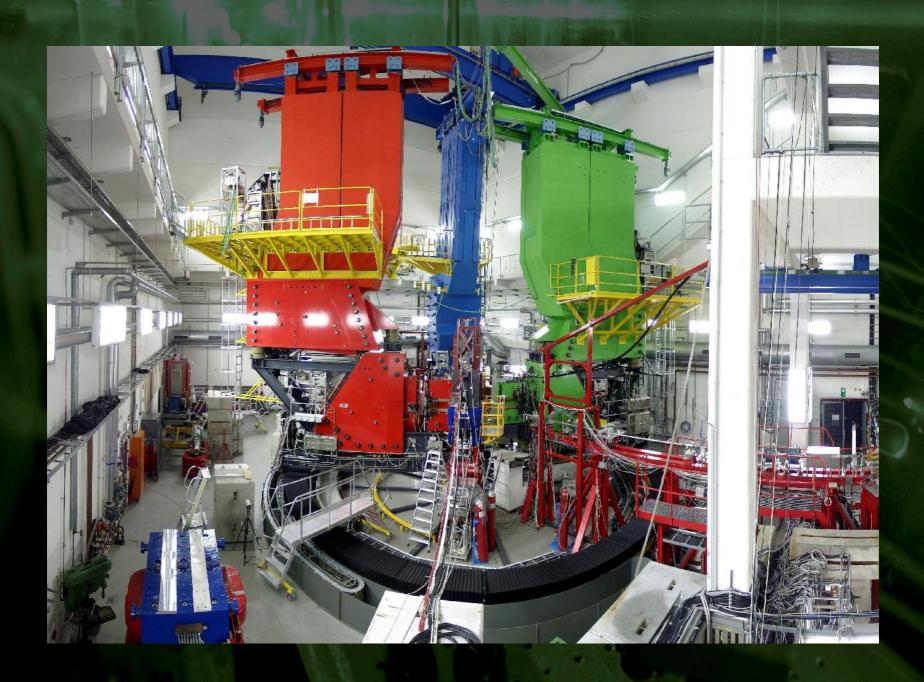


1915 – 1990 Nobelpreis 1961



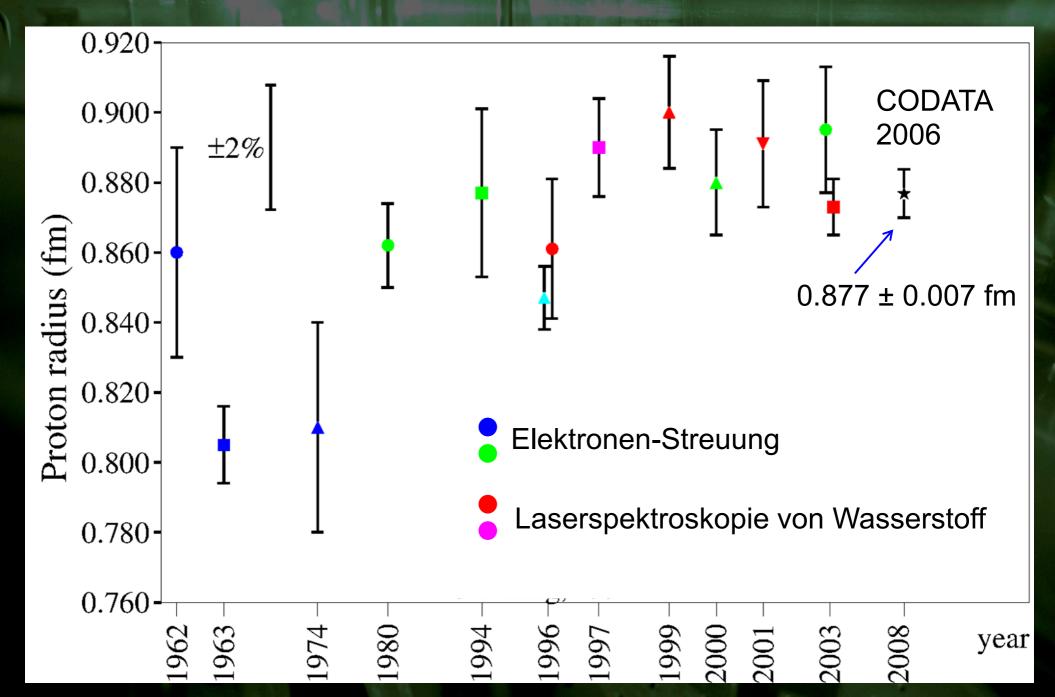
Das Proton hat einen Radius von "7.8 · 10<sup>-14</sup> cm"

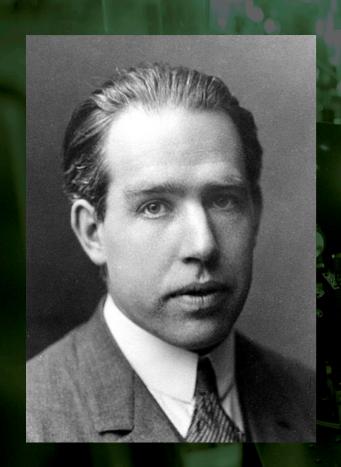
# Mainzer Microtron MAMI



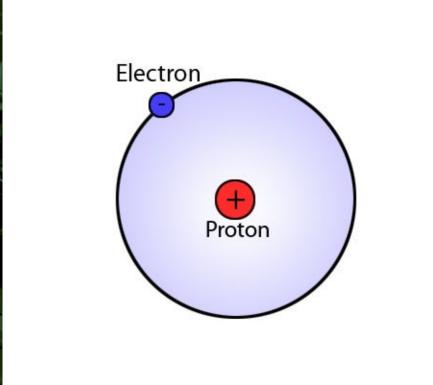


## Wie gross ist das Proton?





Ein Proton, von einem Elektron umkreist

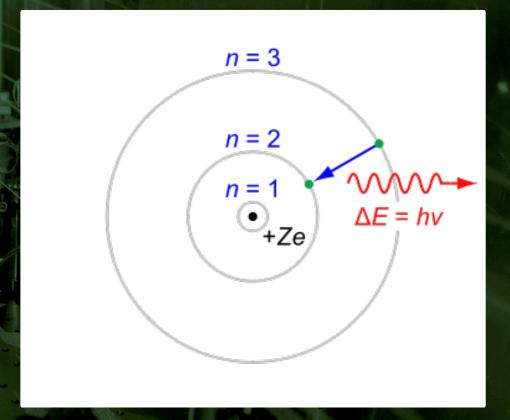


**Nils Bohr** 

1885 – 1962 Nobelpreis 1922



Ein Proton, von einem Elektron umkreist

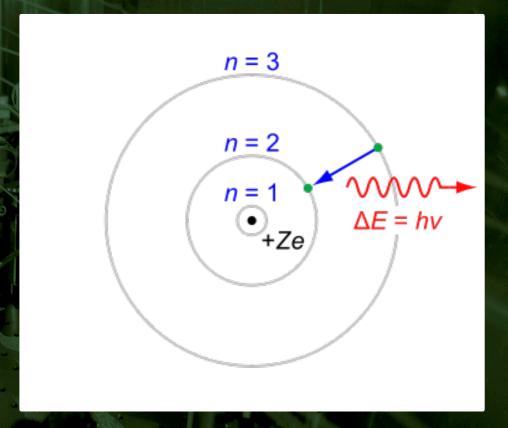


**Nils Bohr** 

1885 – 1962 Nobelpreis 1922



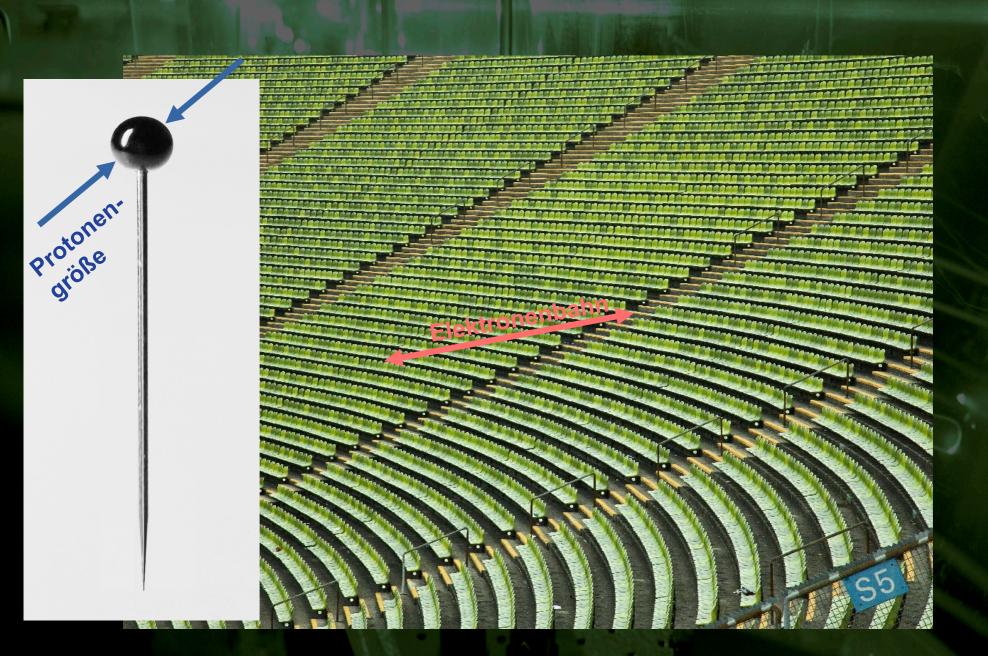
Ein Proton, von einem Elektron umkreist



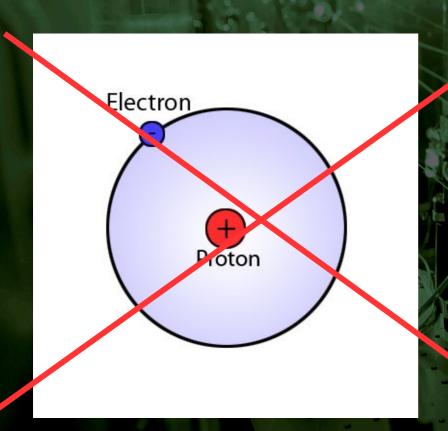
### **Nils Bohr**

1885 – 1962 Nobelpreis 1922

- Diskrete Bahnen (Orbitale)
- "Quantensprünge"



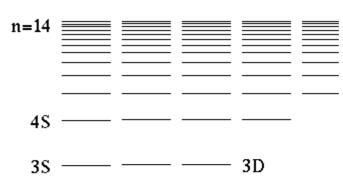
Ein Proton, von einem Elektron umkreist

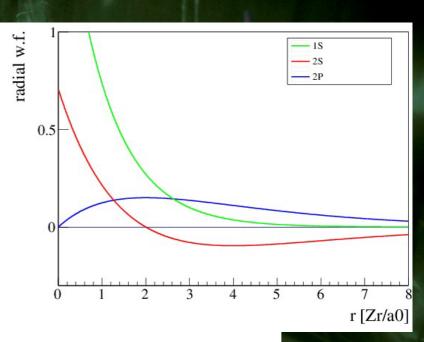


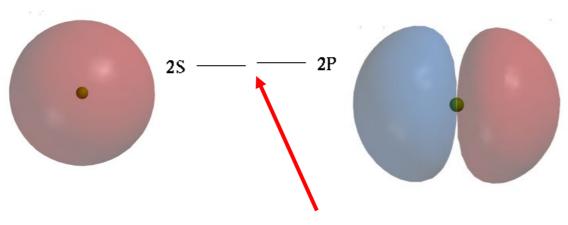
Atom is KEIN Planetensystem.

- → Quantenmechanik
- → Wellenfunktionen
- → Wahrscheinlichkeiten

# Energie-Niveaus in





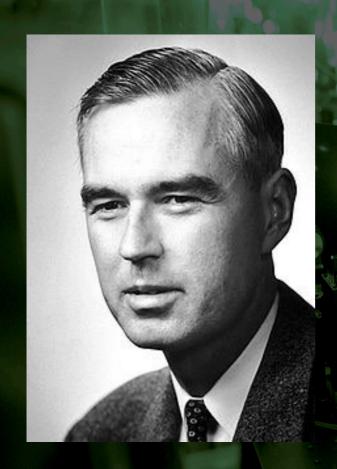


2S-2P Lamb-Verschiebung

Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons (Quadrat der Wellenfunktion)



# Die Lamb-Verschiebung



Entdeckung 1947

Energie-Niveaus "25" und "2P" in Wasserstoff

haben NICHT dieselbe Energie

Ursachen der Lamb-Shift:

\* Quanten-Fluktuationen des Vakuums

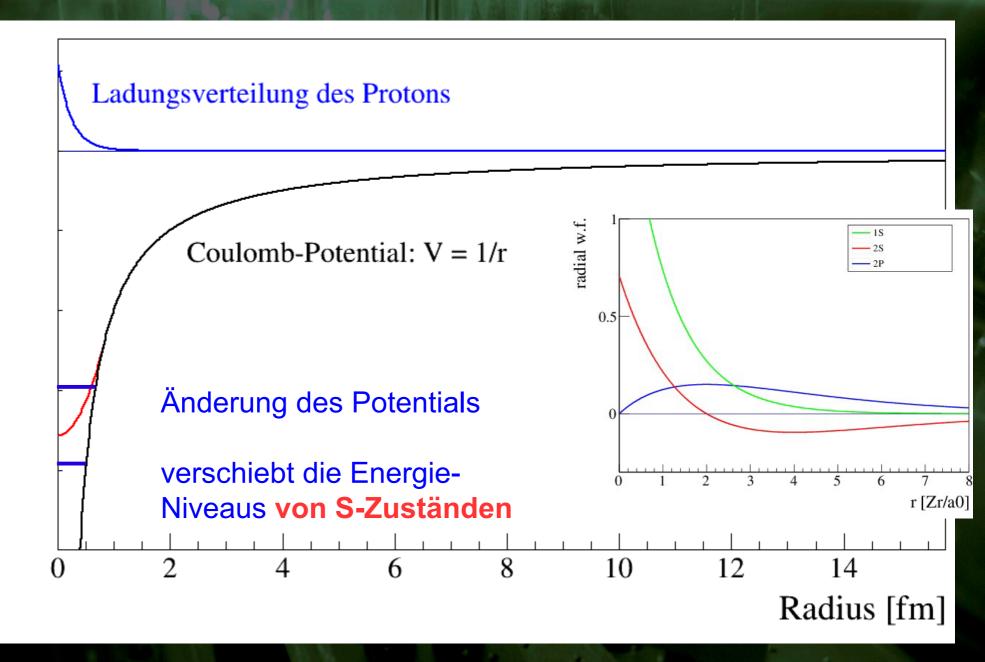
\* Ausdehnung des Protons (Ladungsradius)

Willis E. Lamb, Jr.

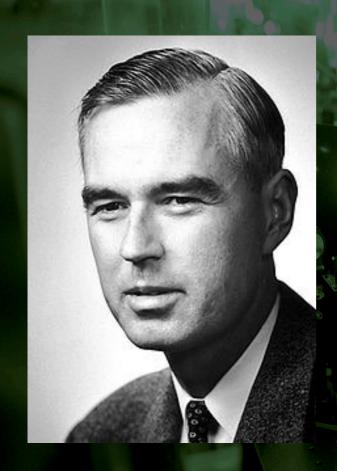
→ Entwicklung der

1913 – 2008 Nobelpreis 1955 Quantenelektrodynamik (QED)

### Protonenradius und Wasserstoff



# Die Lamb-Verschiebung



Entdeckung 1947

Energie-Niveaus "25" und "2P" in Wasserstoff

haben NICHT dieselbe Energie

Ursachen der Lamb-Shift:

\* Quanten-Fluktuationen des Vakuums

\* Ausdehnung des Protons (Ladungsradius)

Willis E. Lamb, Jr.

1913 – 2008 Nobelpreis 1955 Quantenelektrodynamik (QED)

### **Energie-Niveaus in Wasserstoff**



Bohr & Schrödinger & Dirac & recoil & relativistic recoil

$$E = \left( -\frac{1}{\hbar^2 (N + 4m^2 + \frac{\alpha^2}{\gamma - k})} \frac{2n^3 + 6n^2 - 12n + 5}{8n^6} \alpha^4 \dots \right) \frac{1}{1 + m_e/m_p}$$

$$+\left(\frac{1}{n^4}\alpha^2 - \frac{4n-3}{8n^6}\alpha^4 + \frac{8n^3 + 40n^2 - 72n + 29}{N}\alpha^6 \dots\right)\frac{m_e}{N}\frac{1}{m_p(1+m_e/m_p)^3}$$

$$+\frac{k_{2} \sqrt{3} m_{e}^{2} + 1/2}{\pi n^{3} m_{p} \sqrt{1 + \sqrt{2} m_{p}} \sqrt{3}} -\frac{2}{3} \ln(\alpha) - \frac{8}{3} \ln k_{0}(n) - \frac{1}{9} + \frac{14}{3} \left( \ln(\frac{2}{n}) + \sum_{m=1}^{n} \frac{1}{m} \right)$$

$$+1-rac{1}{2n}\Big)-rac{2}{1-(m_e/m_p)^2}\ln(rac{m_e}{m_p}+1)+rac{2}{1-(m_p/m_e)^2}\ln(rac{m_p}{m_e}+1)\Big)$$

$$+\frac{2\alpha^4 m_e}{m_p n^3} \left(4 \ln(2) - \frac{7}{2} - \frac{44\alpha}{60\pi} \ln(\alpha)^2\right)$$

### **Energie-Niveaus in Wasserstoff**

Bohr & Schrödinger & Dirac & recoil & relativistic recoil & self energy & vacuum polarization & two-

$$E = \left(-\frac{1}{n^2} - \frac{4n - 3}{4n^2}\alpha^2 - \frac{2n^3 + 6n^2 - 12n + 5}{8n^6}\alpha^4 \dots\right) \frac{1}{1 + m_e/m_p}$$

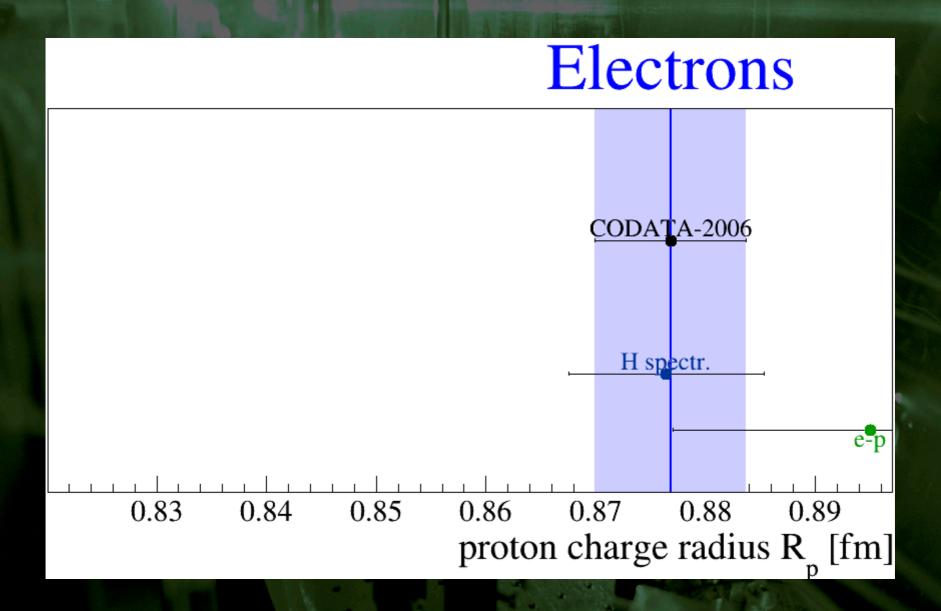
$$+\left(\frac{1}{n^4}\alpha^2 - \frac{4n-3}{8n^6}\alpha^4 + \frac{8n^3 + 40n^2 - 72n + 29}{64n^6}\alpha^6 \dots\right)\frac{m_e}{m_p(1 + m_e/m_p)^3}$$

$$+\frac{2\alpha^{3}m_{e}}{\pi^{3}m_{p}\left(1+m_{e}/m_{p}\right)^{3}}\left(-\frac{2}{3}\ln(\alpha)-\frac{8}{3}\ln k_{0}(n)-\frac{1}{9}+\frac{14}{3}\left(\ln(\frac{2}{n})+\sum_{m=1}^{n}\frac{1}{m}\right)\right)$$

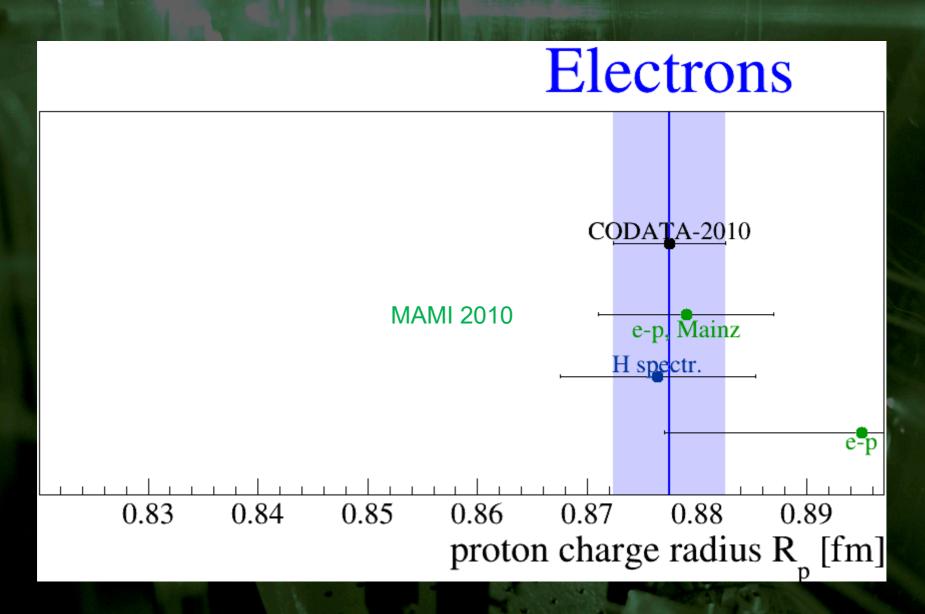
$$+1-rac{1}{2n}\Big)-rac{2}{1-(m_e/m_p)^2}\ln(rac{m_e}{m_p}+1)+rac{2}{1-(m_p/m_e)^2}\ln(rac{m_p}{m_e}+1)\Big)$$

$$+\frac{2\alpha^4 m_e}{m_p n^3} \left(4 \ln(2) - \frac{7}{2} - \frac{44\alpha}{60\pi} \ln(\alpha)^2\right)$$

### Protonen-Radien

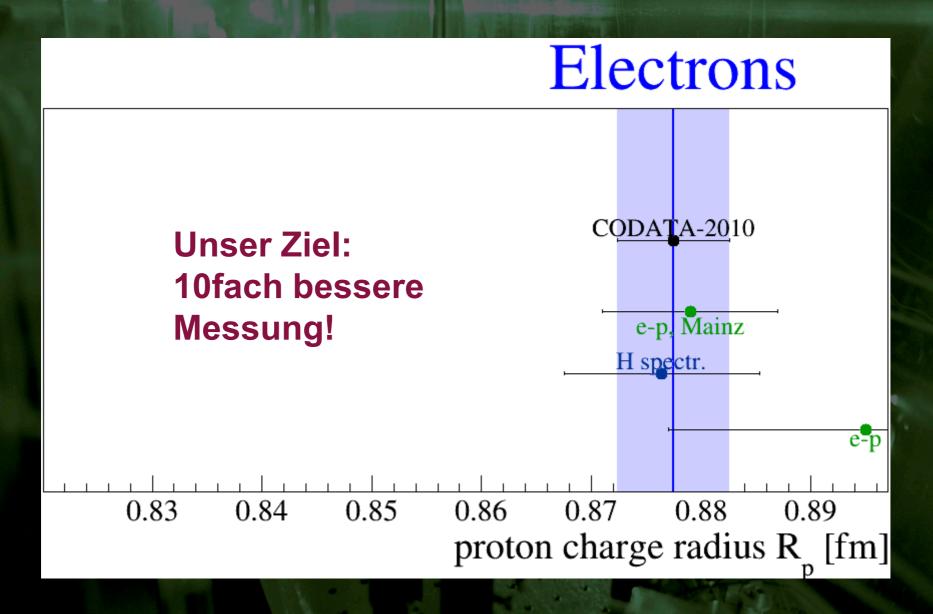


### Protonen-Radien



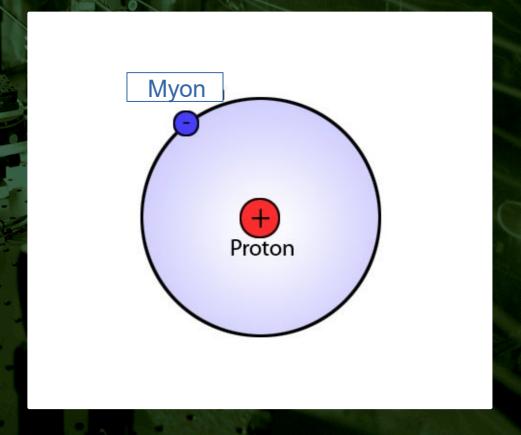


### Protonen-Radien

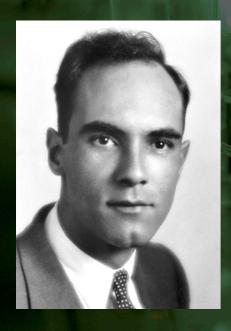


# Myonischer Wasserstoff

Ein Proton, das von einem negativen Myon umkreist wird.



### Was ist

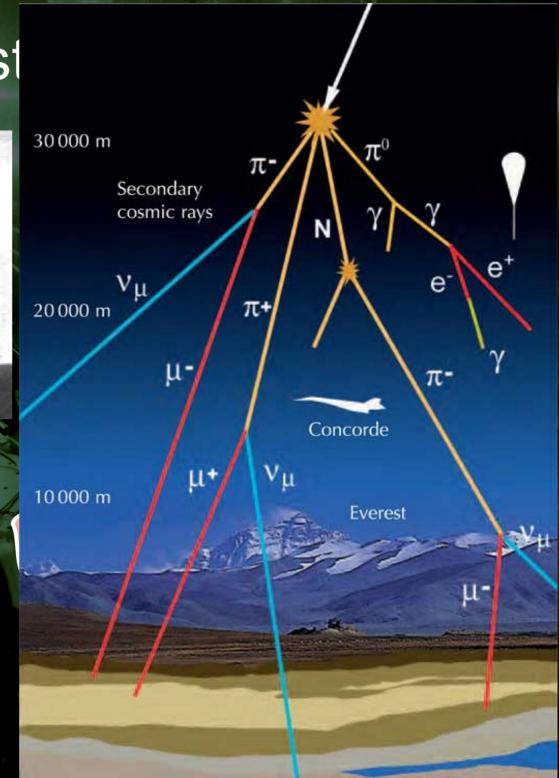




Carl David Anderson

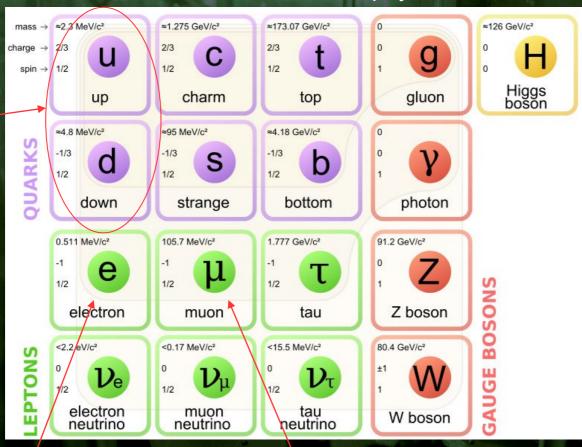
Nobelpreis 1936 (Entdeckung Positron!)

Seth Neddermeyer



## Das Myon und sein Platz in der Welt

Das Standard-Modell der Teilchenphysik



Elektron

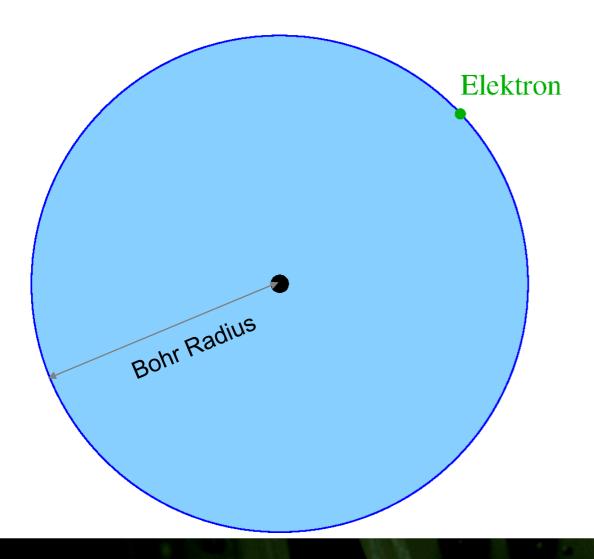
Proton

Myon

### Normaler and myonischer Wasserstoff

### Normaler Wasserstoff:

Proton + Elektron



### Myonischer Wasserstoff:

Proton + Myon

Masse = 200 \* Elektronenmasse

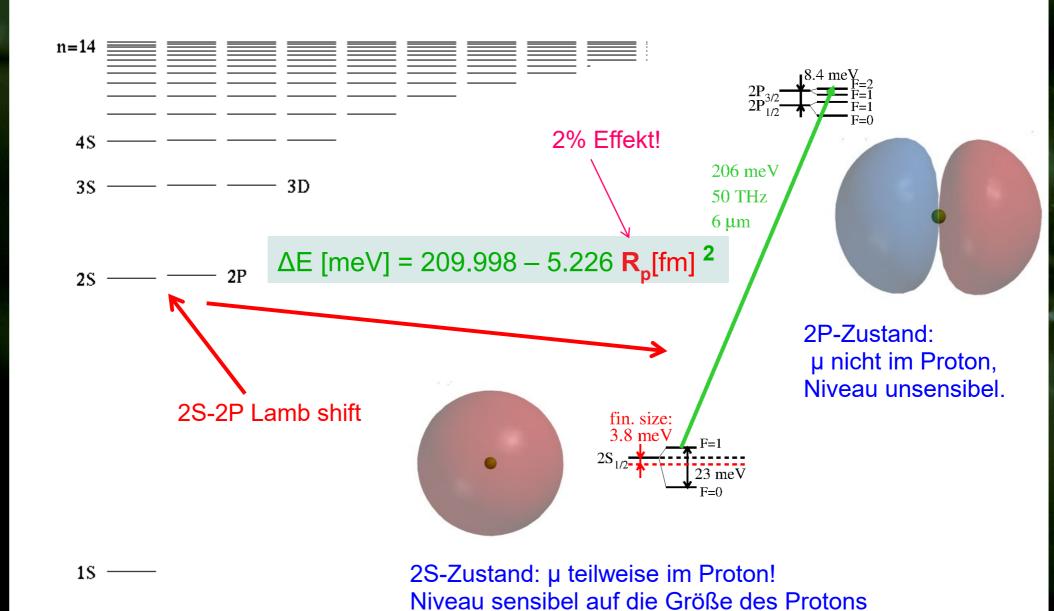
Bohr Radius = 1/200 von H

200<sup>3</sup> = 10 Millionen mal sensibler

auf die Größe des Protons



### Myonischer Wasserstoff



# Prinzip der Messung



3S — — 3D

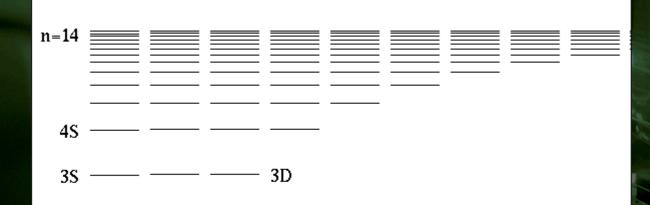
2S — 2P



- \* Myonen stoppen in H<sub>2</sub>
- \* Einfang zuerst in Niveaus mit n~14
- \* Kaskade zu niedrigeren n



## Prinzip der Messung



2S — 2P

1%

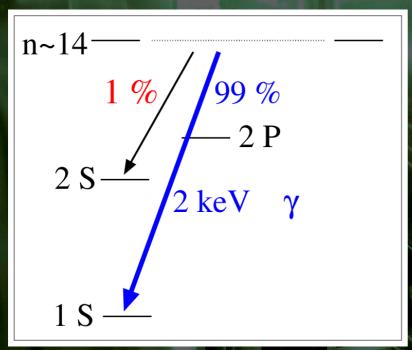


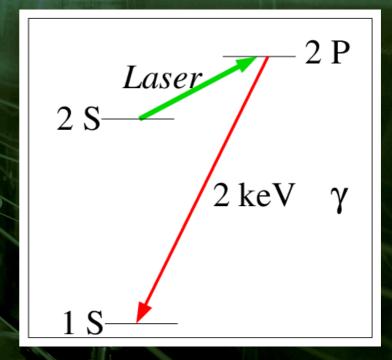
- \* Myonen stoppen in H<sub>2</sub>
- \* Einfang zuerst in Niveaus mit n~14
- \* Kaskade zu niedrigeren n

- \* 1% enden im langlebigen2S Zustand
- \* Laser auf Resonanz

ıs — 99%

## Prinzip der Messung

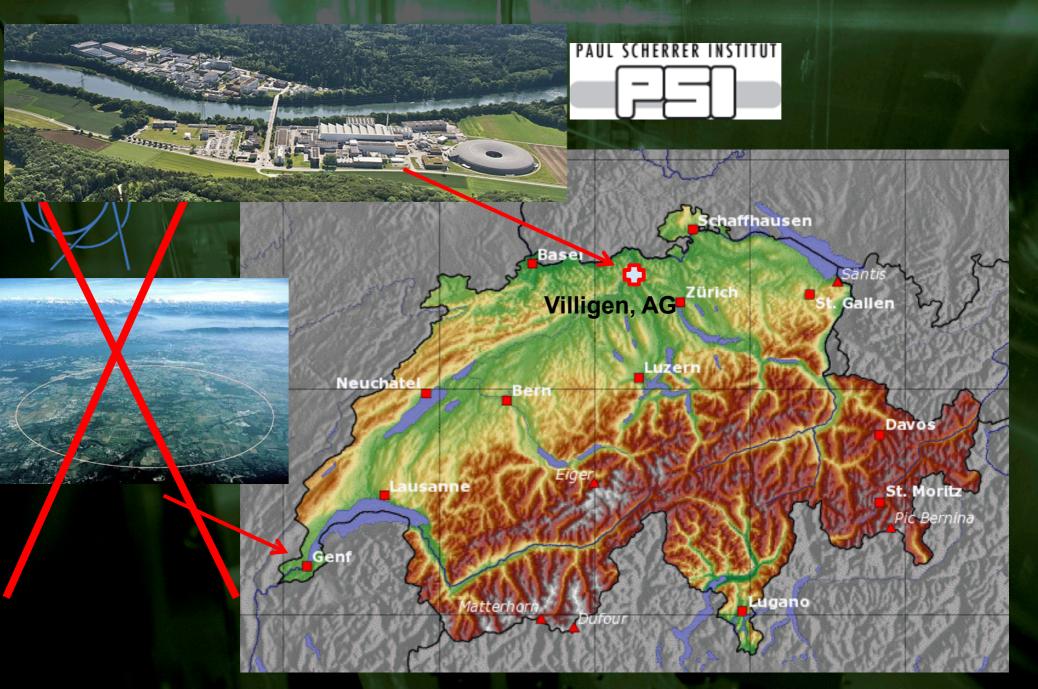




- "prompt" (t=0):
- \* Einfang des Myons bei n~14
- \* Kaskade
- \* 99% enden im Grundzustand
- → "prompte" Röntgenquanten

- "später" (t ~ 1µs):
- \* 1% der Myonen sind im 2S-Zustand
- \* Laser auf Resonanz (λ=6μm)
- \*  $2S \rightarrow 2P \rightarrow 1S$
- → "verzögerte" Röntgenquanten

## Der Beschleuniger am PSI



#### Paul-Scherrer-Institut

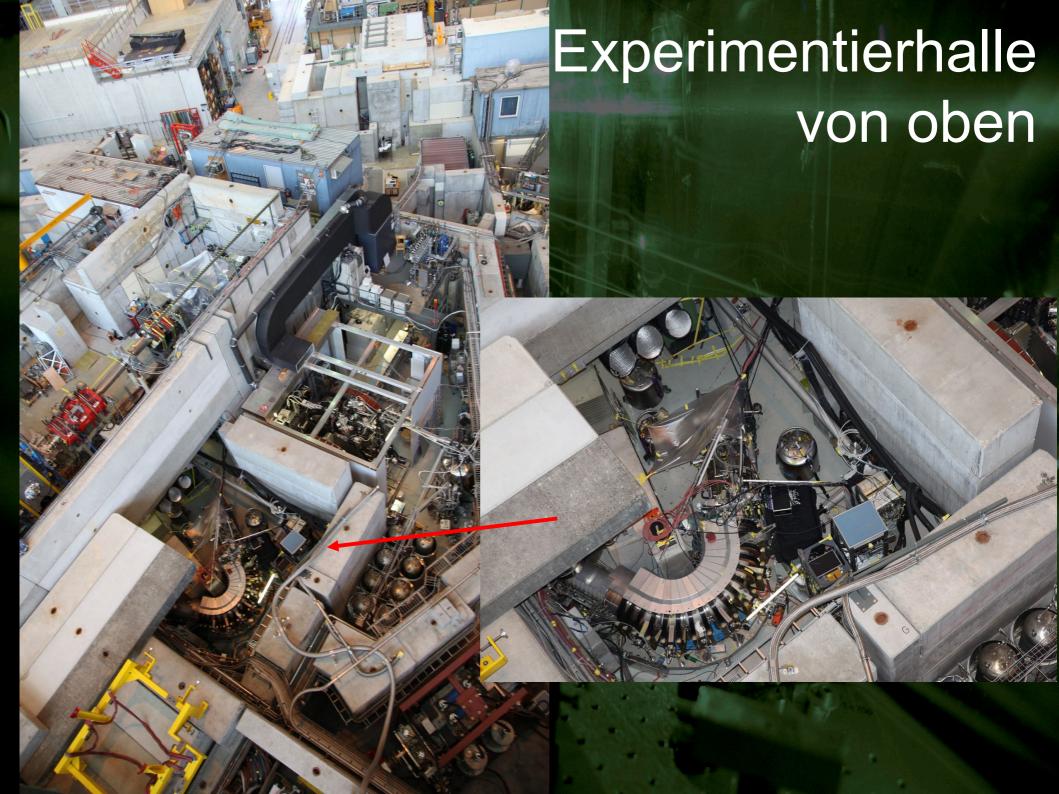


## Paul-Scherrer-Institut



Experimentierhalle





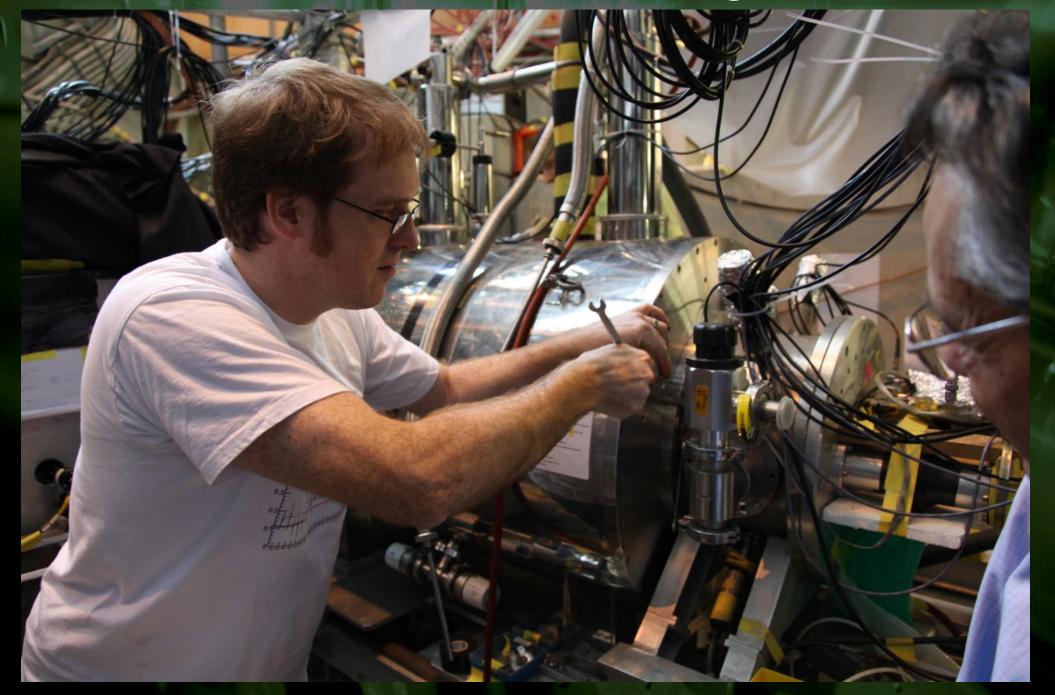
# Strahl-Areal πE5



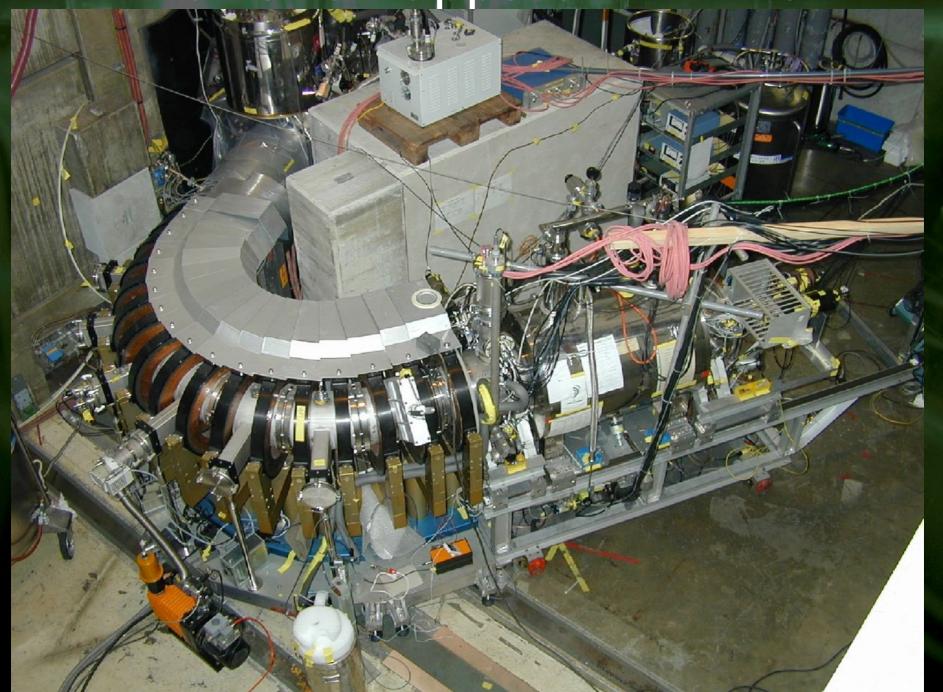
## MEK im πE5



## Letzte Vorbereitungen

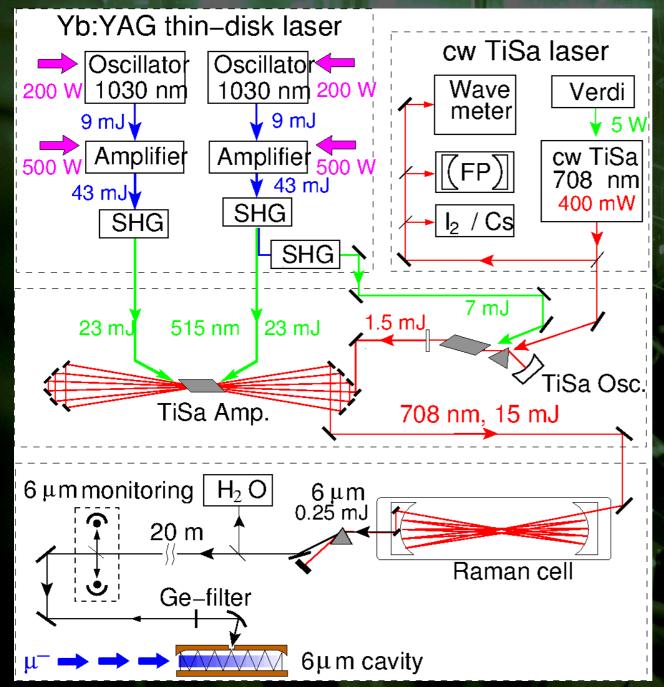


Der Strahlapparat im πE5





#### Das Lasersystem



Yb:YAG Scheibenlaser

→ schnelle Reaktion auf µ

Frequenzverdopplung (SHG)

→ grünes Licht zum Pumpen Von Ti:Saphir-Kristallen

Ti:Saphir cw Laser

→ gibt Laserwellenlänge vor

Ti:Saphir Oszillator/Verstäker

→ hohe Pulsenergie (15 mJ)

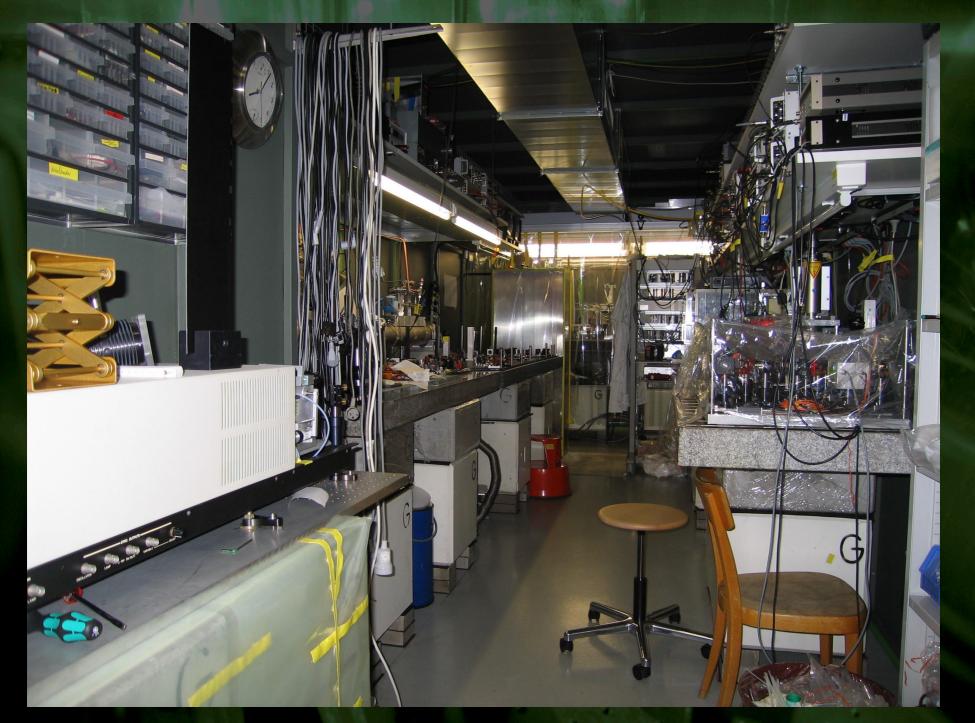
Ramanzelle

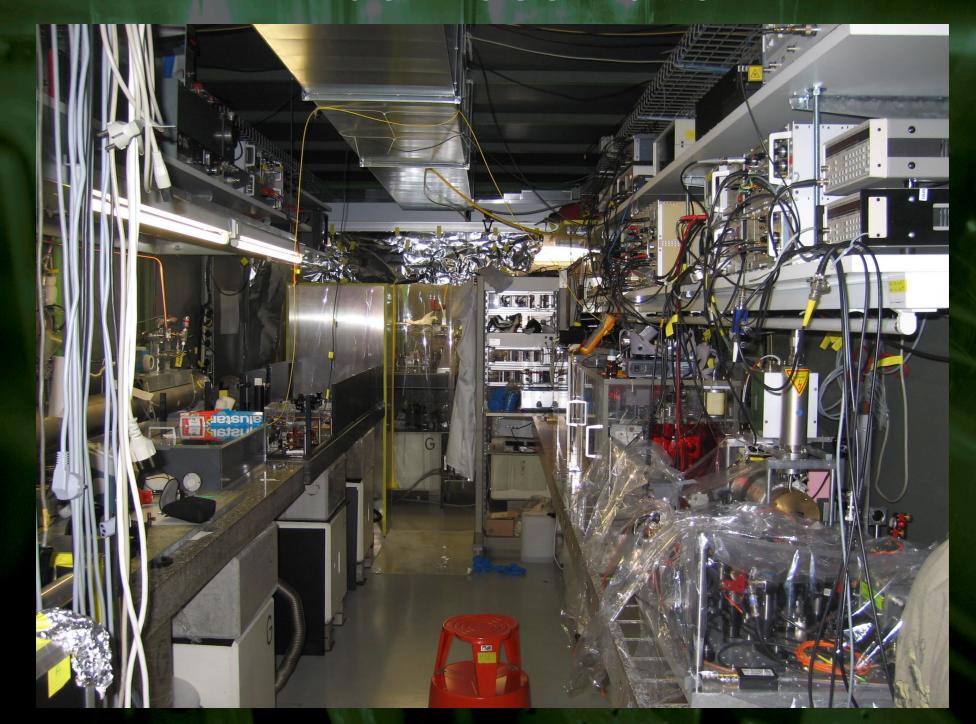
→ 3fache Änderung der Laserwellenlänge → 6 μm

**Target Cavity** 

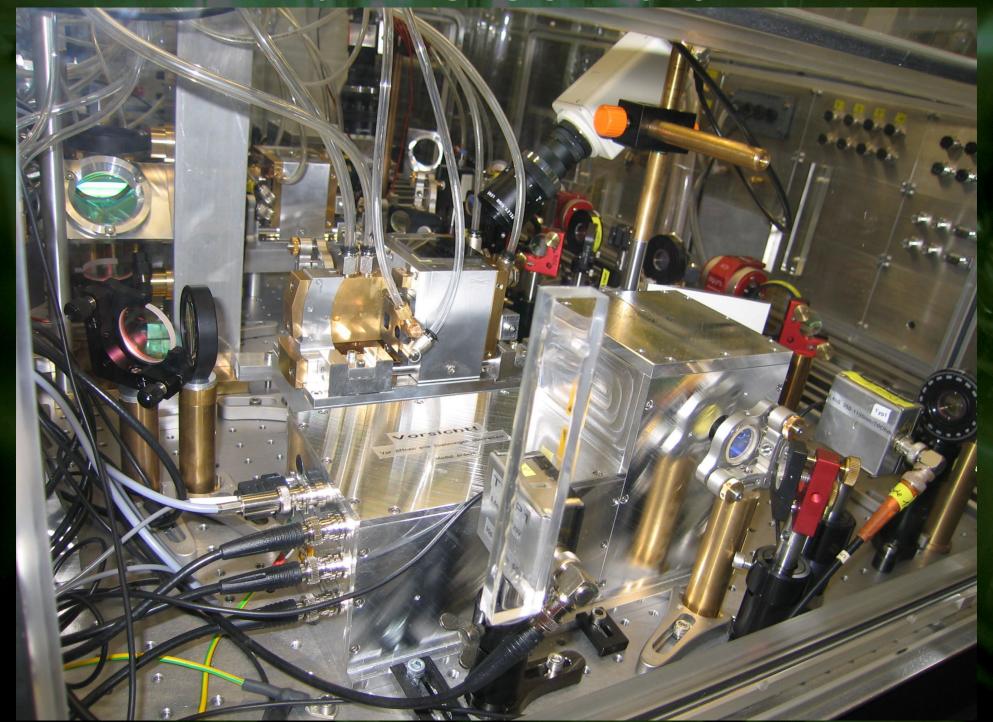
→ Spiegelsystem umschliesst Das Myonen-Stopvolumen



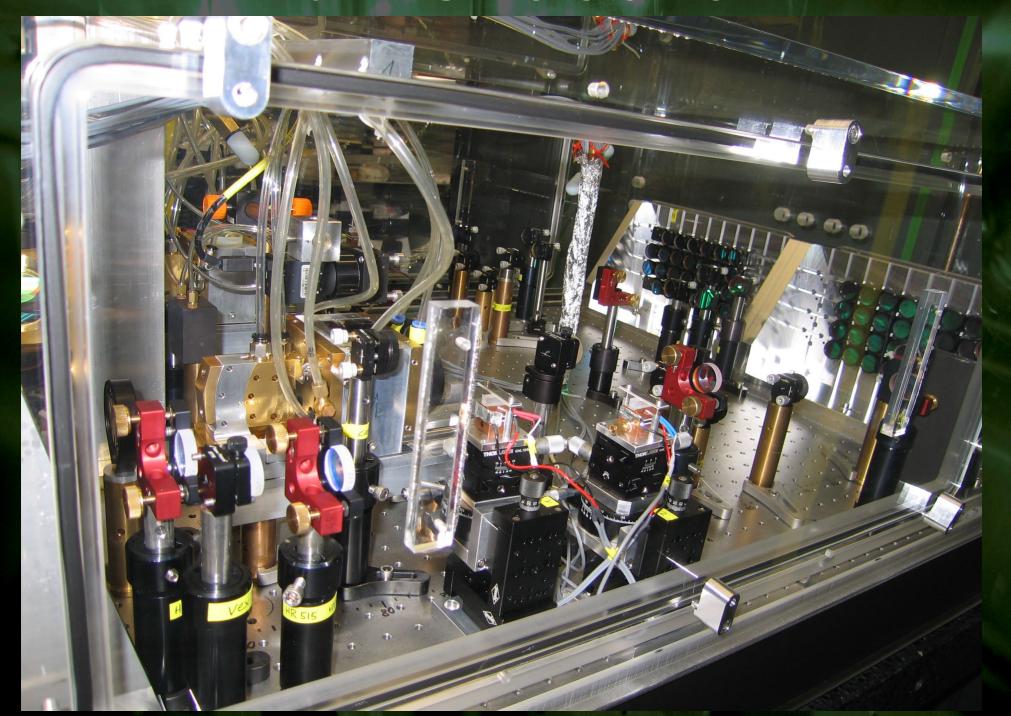


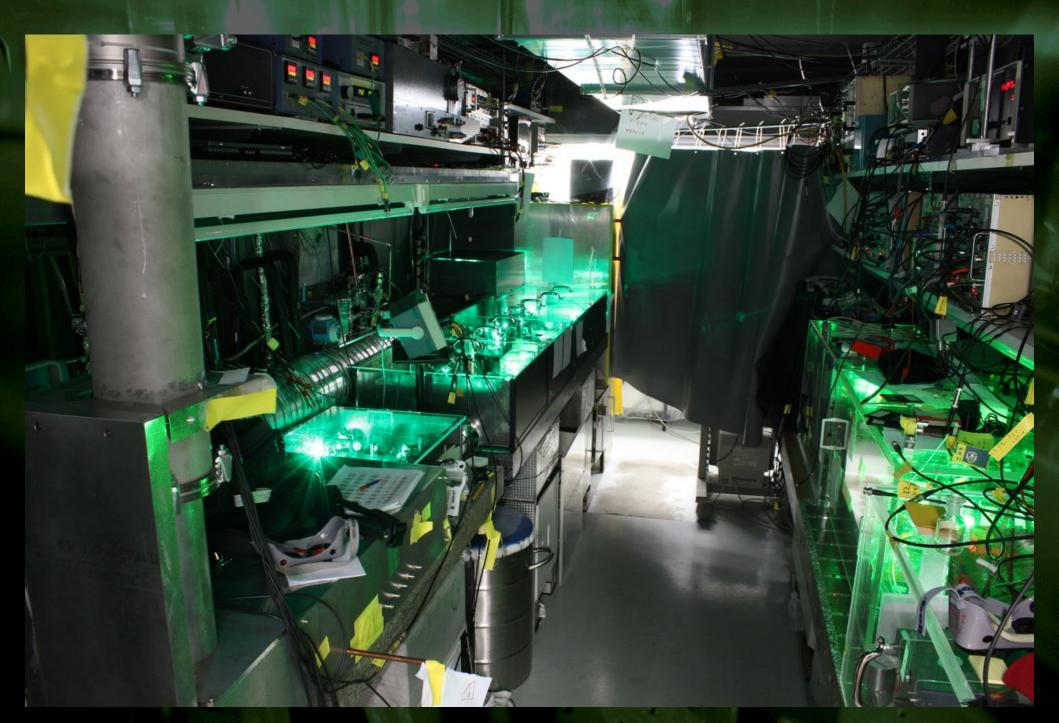


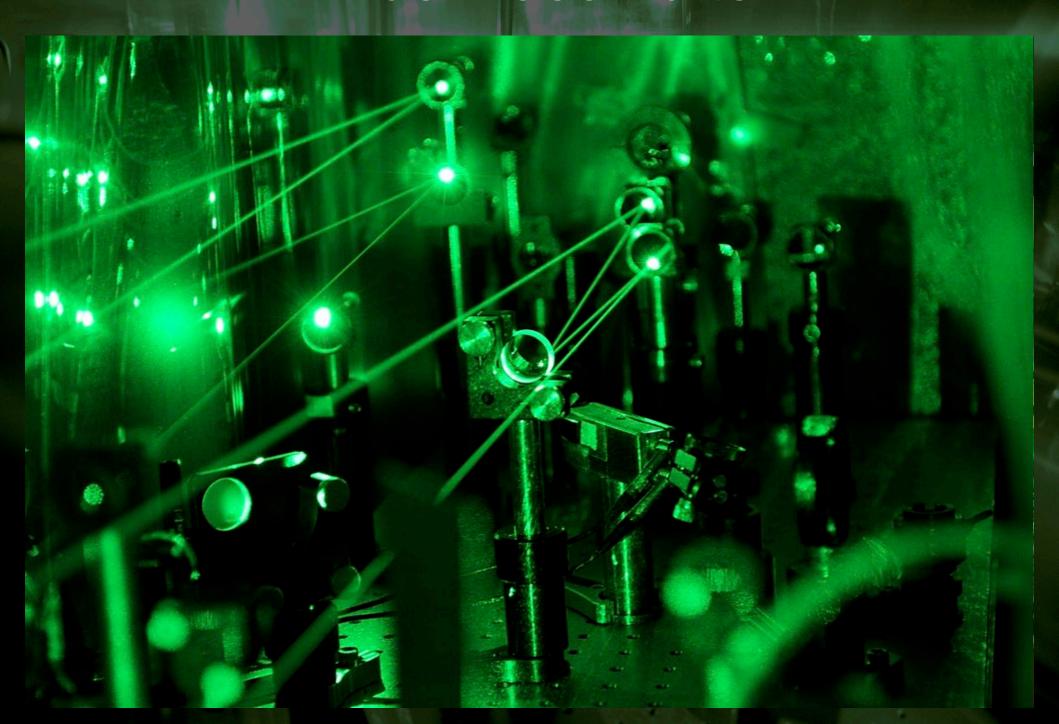
## Yb:YAG Oszillator

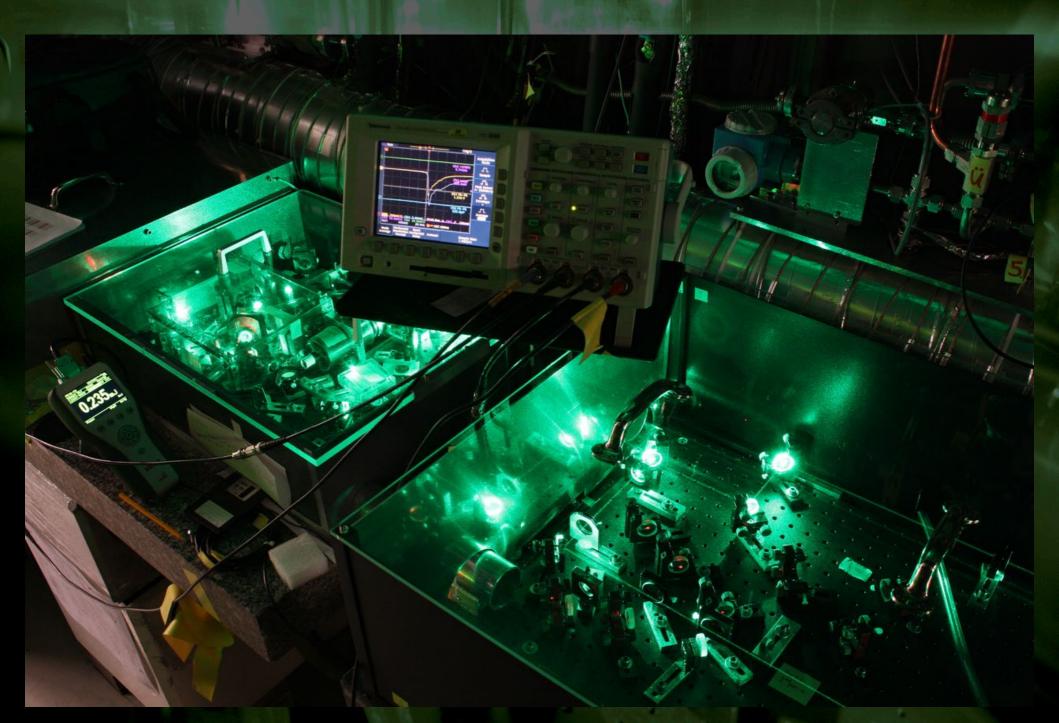


#### Yb:YAG Verstärker

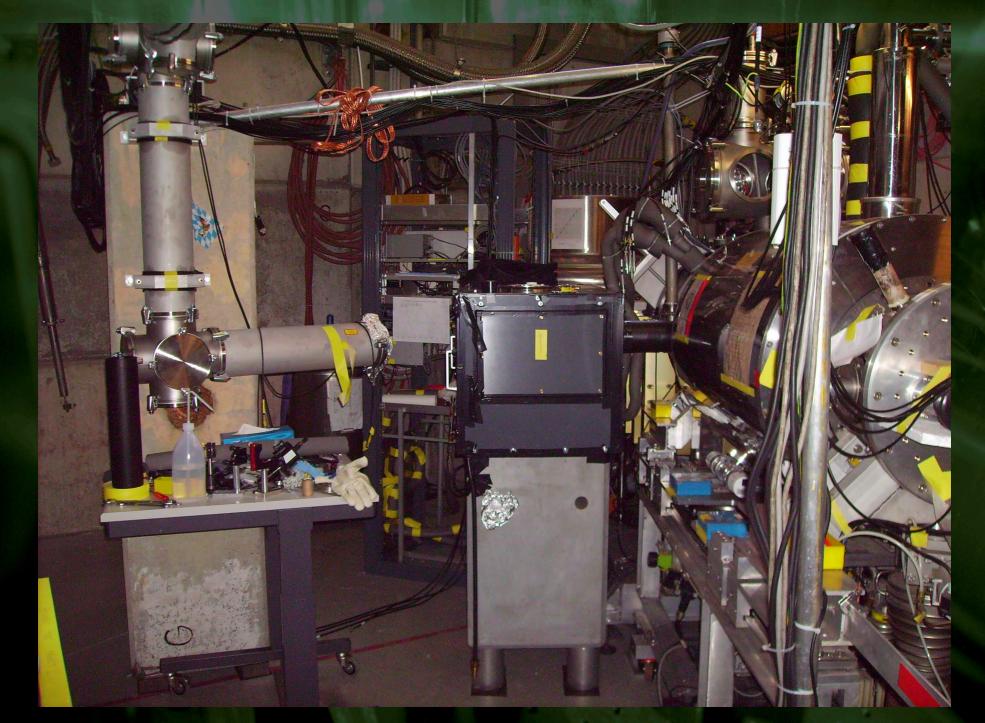




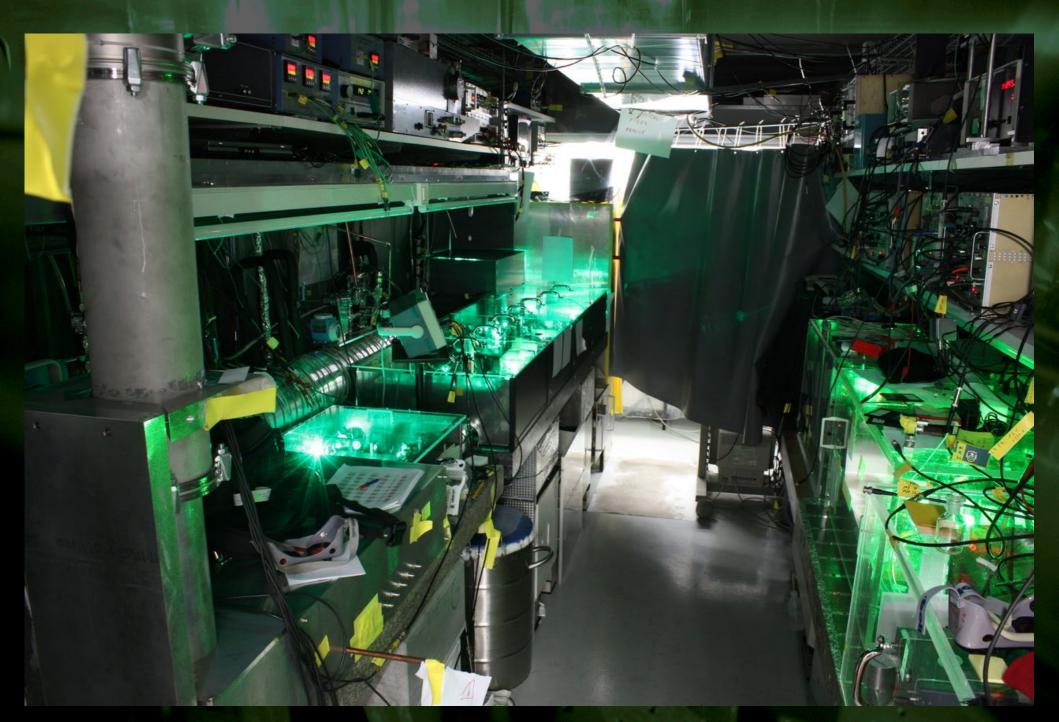




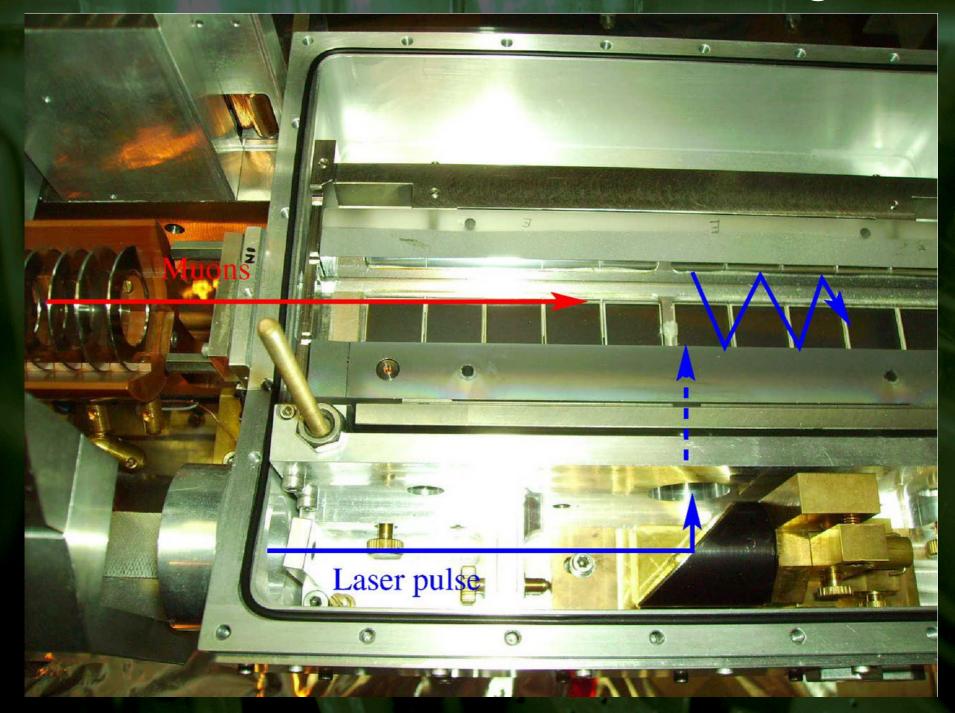
#### Licht durch die Röhre



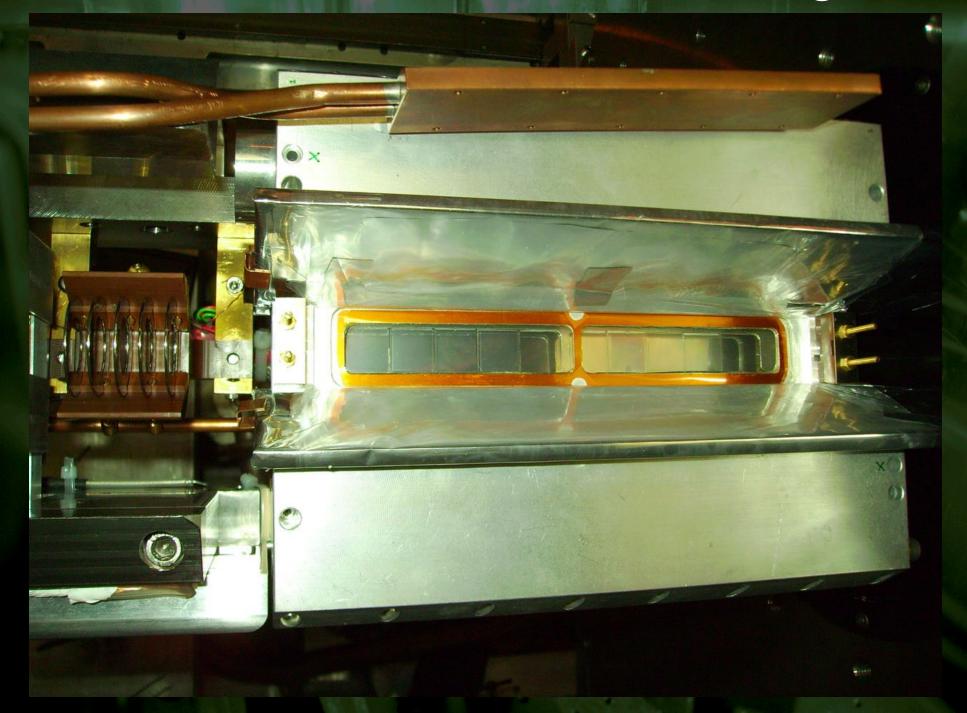
## Laserhütte



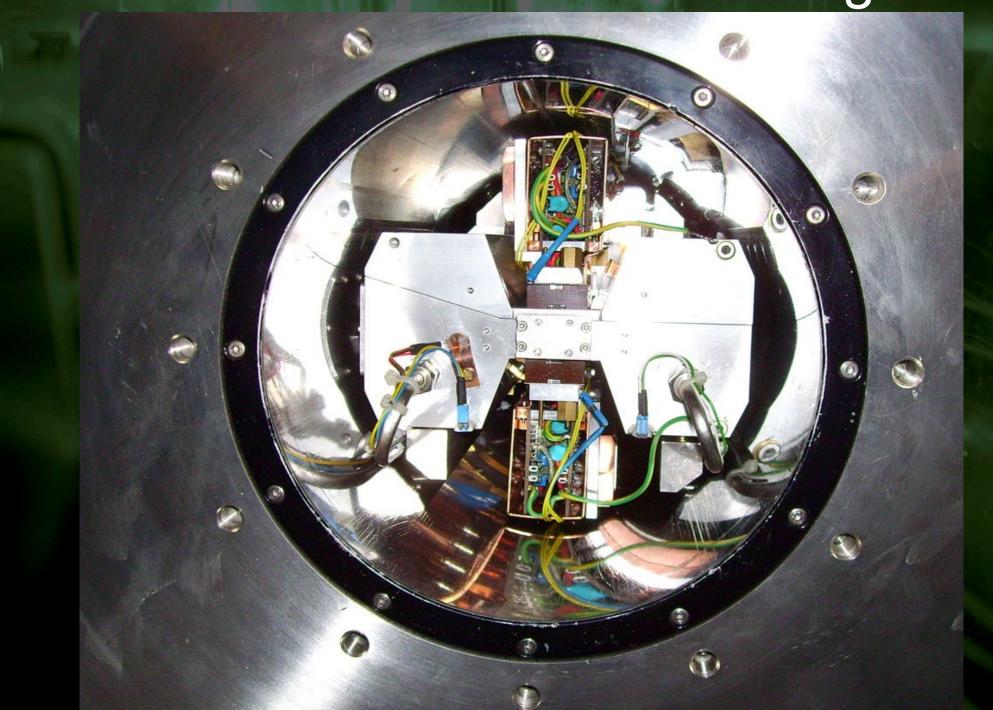
#### Das Herz des Aufbaus - Target



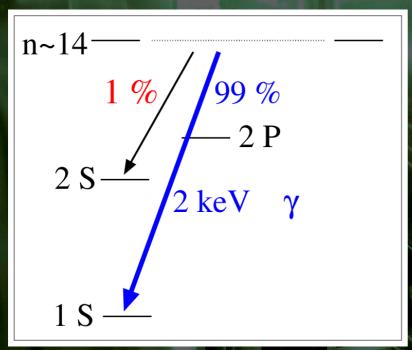
## Das Herz des Aufbaus - Target

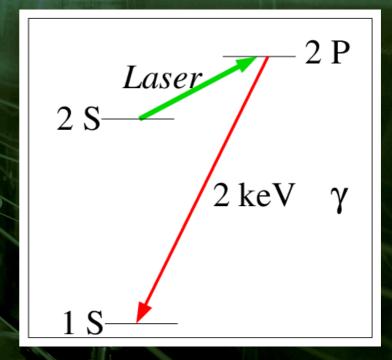


## Das Herz des Aufbaus - Target



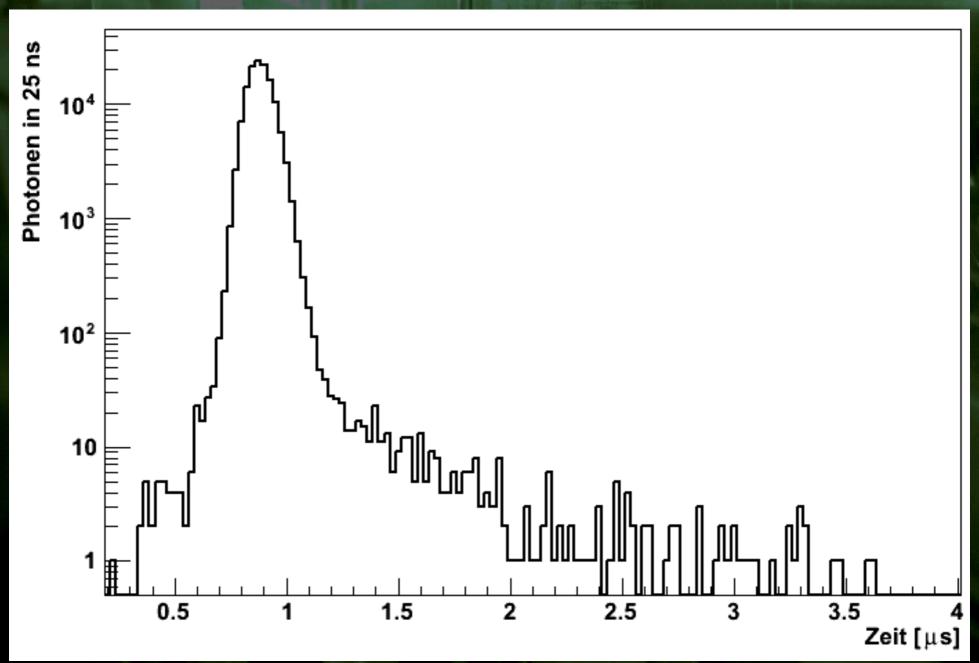
## Prinzip der Messung

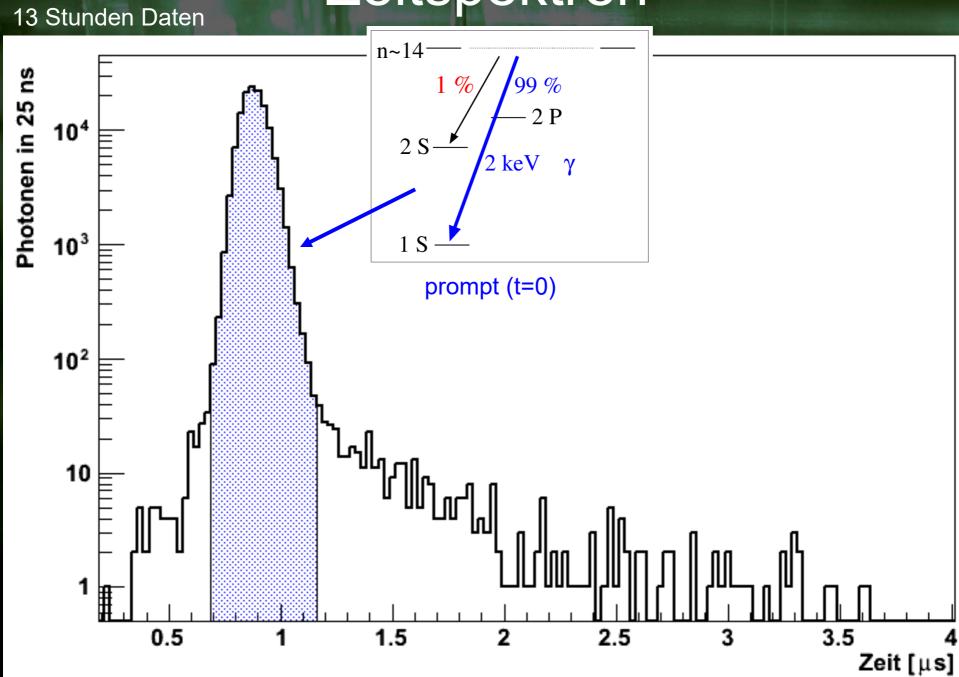


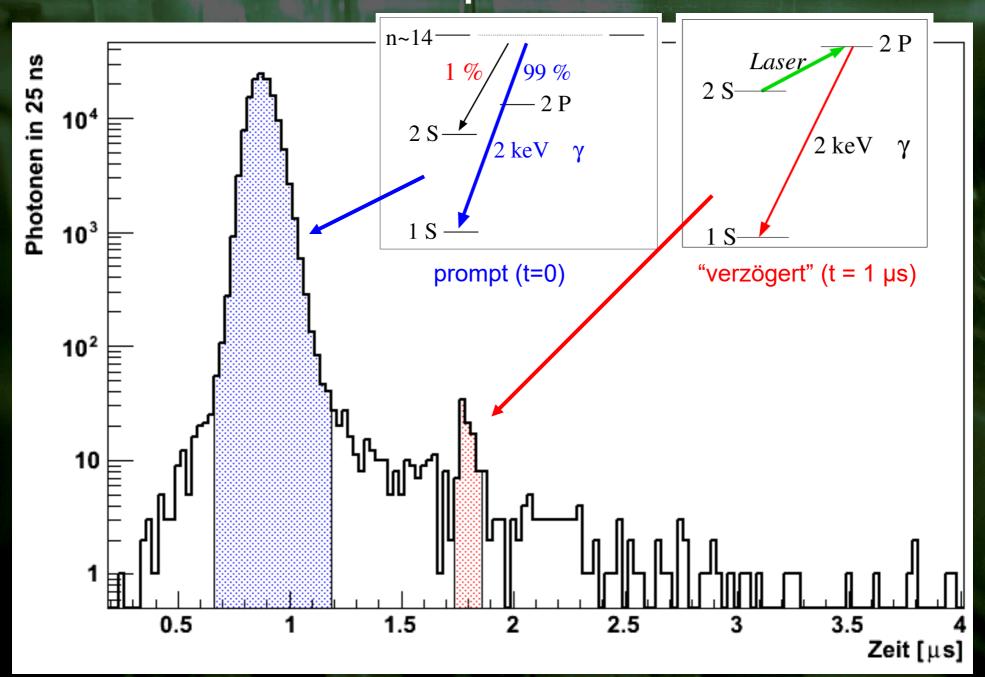


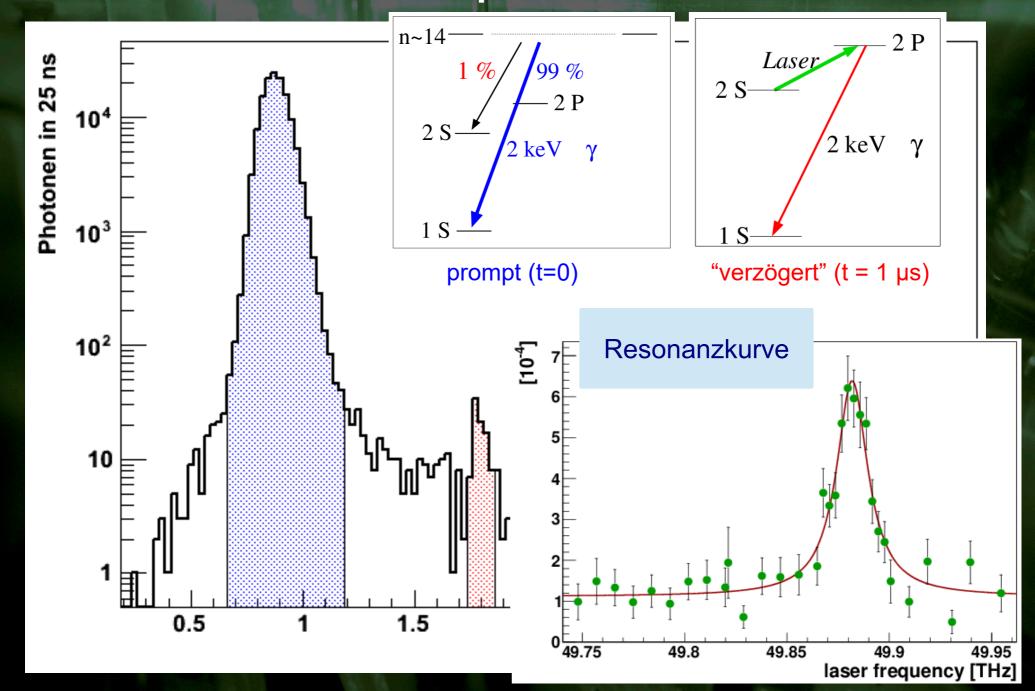
- "prompt" (t=0):
- \* Einfang des Myons bei n~14
- \* Kaskade
- \* 99% enden im Grundzustand
- → "prompte" Röntgenquanten

- "später" (t ~ 1µs):
- \* 1% der Myonen sind im 2S-Zustand
- \* Laser auf Resonanz (λ=6μm)
- \*  $2S \rightarrow 2P \rightarrow 1S$
- → "verzögerte" Röntgenquanten

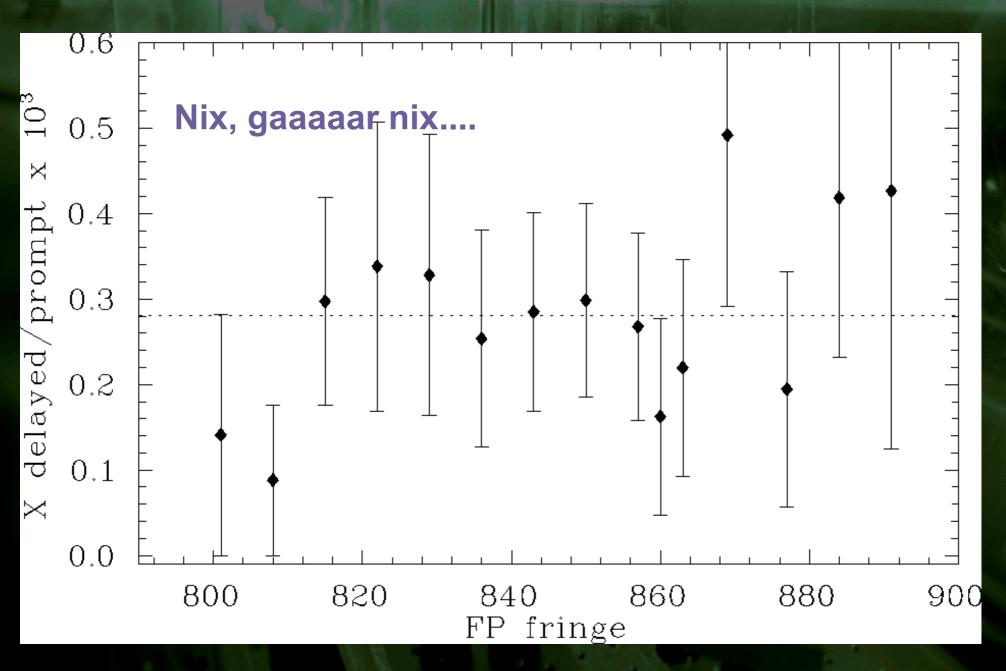


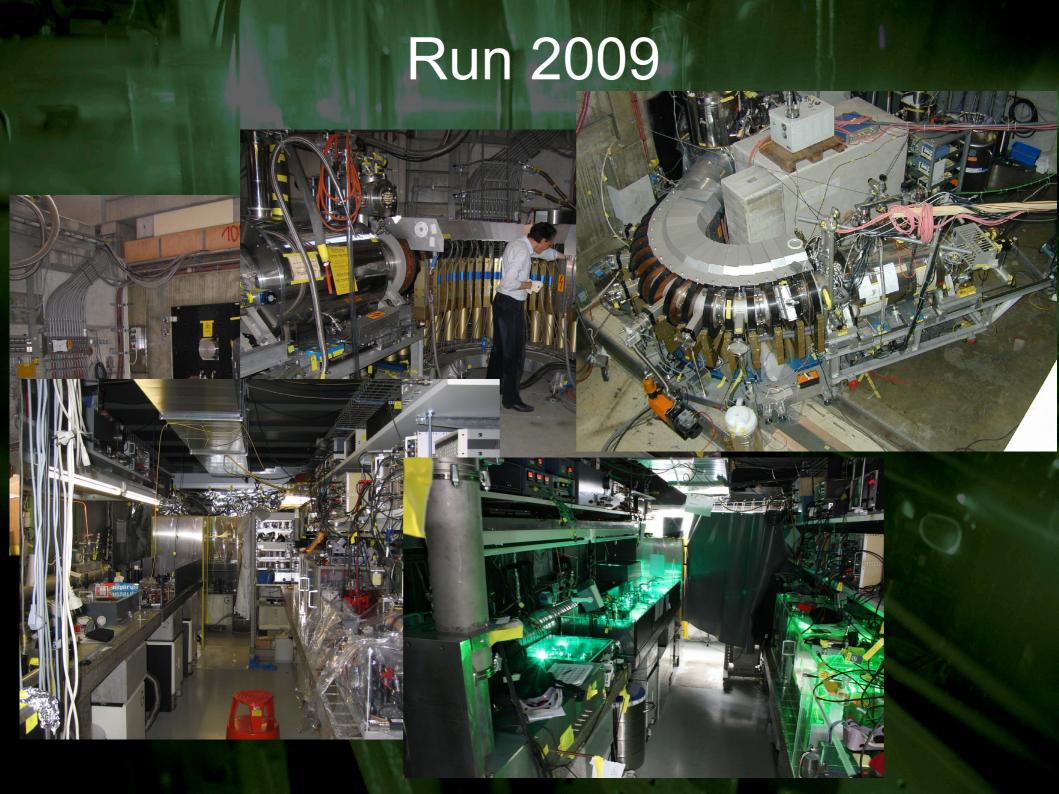




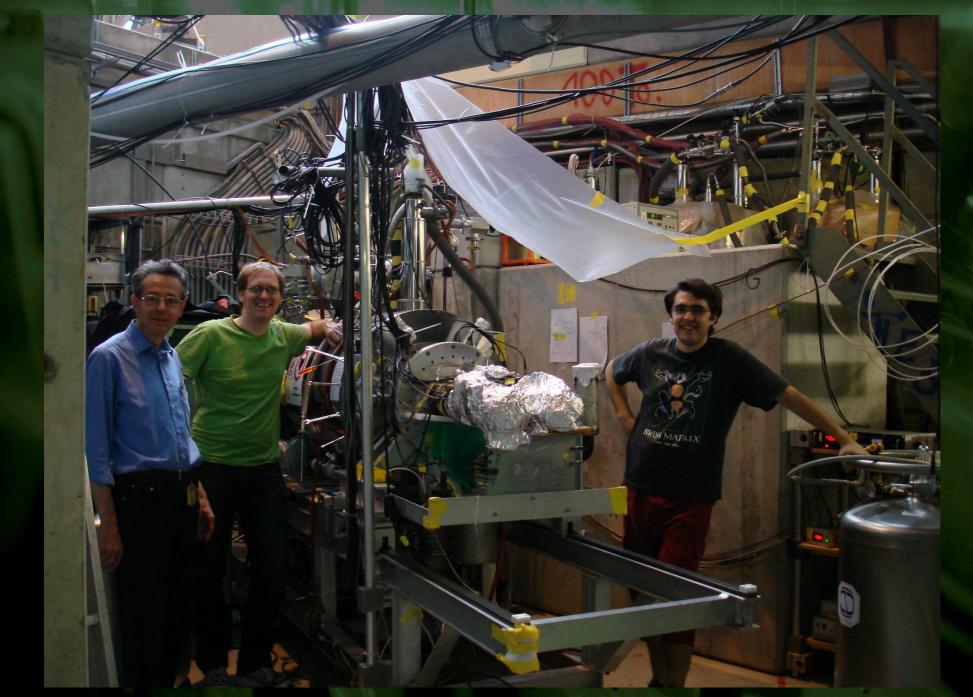


#### 1997 - 2008



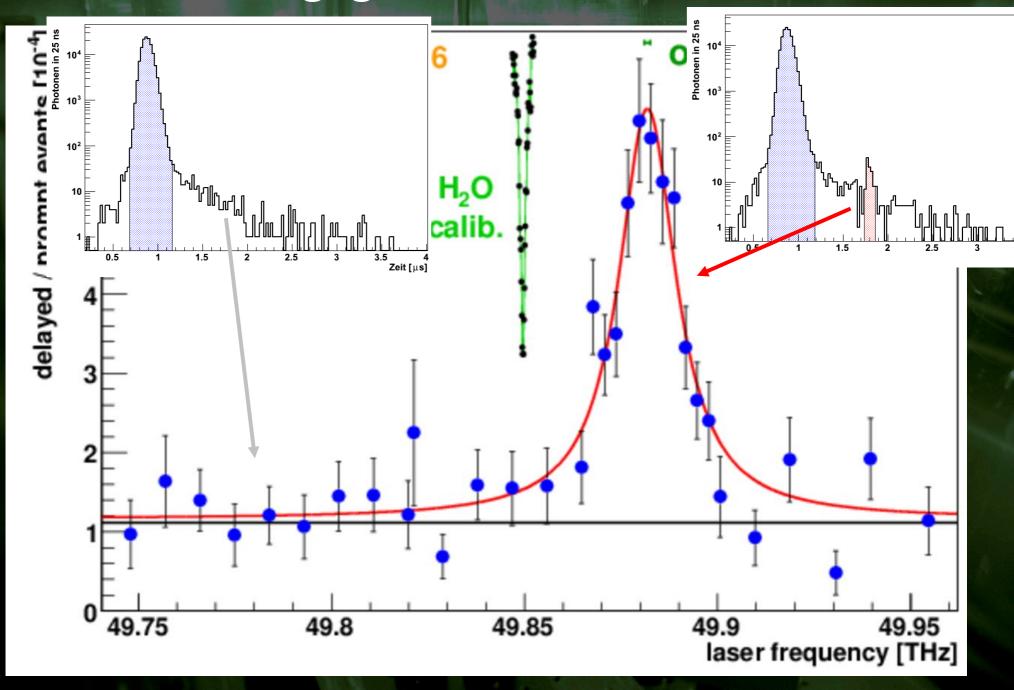


## Fertig aufgebaut





#### Die lang gesuchte Resonanz



# Yeah!



# Auf die Resonanz!



### Die Resonanz auf die Linie

8 July 2010 | www.nature.com/nature \$10 THE INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE

Das Proton ist 4% kleiner als gedacht!

 $0.84184 \pm 0.00067 \, \text{fm}$  statt

 $0.8768 \pm 0.0069$  fm

**OIL SPILLS** 

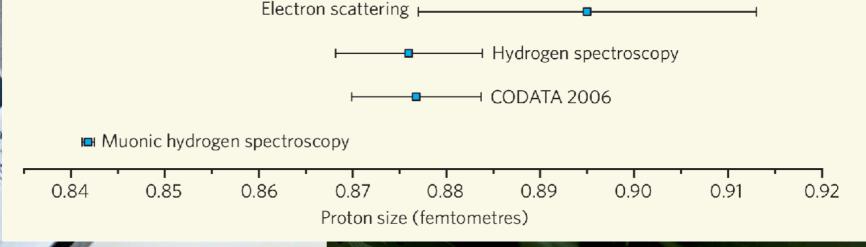
There's more to come

**PLAGIARISM** 

It's worse than you think

**CHIMPANZEES** 

The battle for survival



### SHRINKING THE PROTON

New value from exotic atom trims radius by four per cent



NATURE OBS Researchers for hire

### Die Resonanz auf die Linie



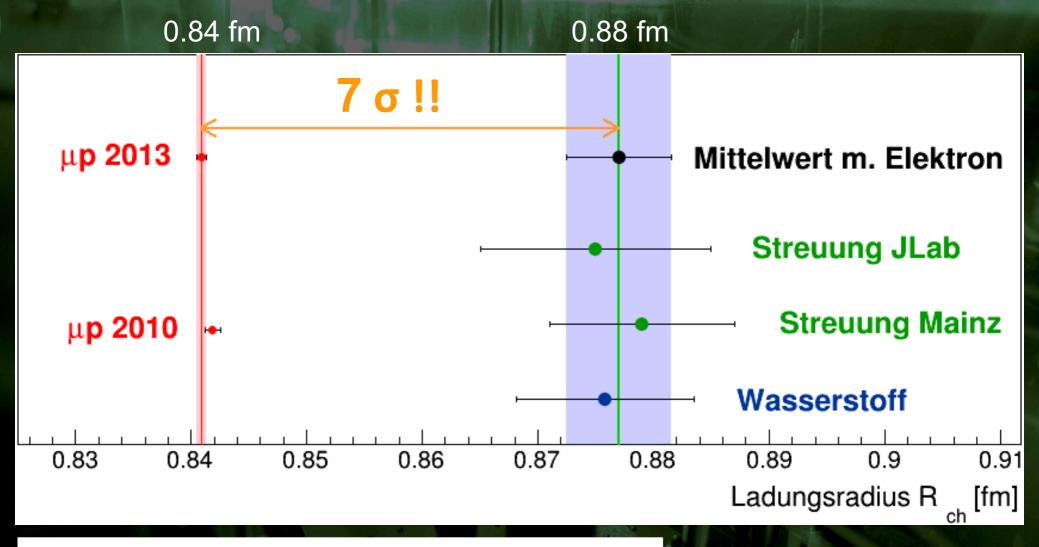








### Das "Proton Radius Puzzle"



myonischer Wasserstoff:  $0.8409 \pm 0.0004$  fm elektronischer Wasserstoff:  $0.876 \pm 0.008$  fm Elektronen-Streuung:  $0.879 \pm 0.008$  fm

20x genauer!

### Workshop: The "Proton Radius Puzzle"



ECT\* Trento, Okt. 2012

47 Teilnehmer
Theorie + Experiment
Atomphysik
Kernphysik
Teilchenphysik
Elektronenstreuung
"Beyond Standard Model"

38 Vorträge 3 "Fighting Sessions"

Am Schluss: Abstimmung (!)

→ Meßfehler

Wir brauchen neue Daten.

Folge-Konferenzen

- \* Mainz 2014
- \* Trento 2016
- \* Mainz 2018

# Erklärungsversuche

### Meßfehler

myonischer Wasserstoff

oder

Wasserstoff UND

Elektronenstreuung

**Theoriefehler** 

 $\Delta E = 209.998 - 5.226 \, \mathbf{R_p}^2$ 

Fehler im Standard-Modell der Teilchenphysik!

### Zusammenfassung

Das Rätsel um das geschrumpfte Proton ist spannend....

Vielleicht will uns das Myon etwas sagen?

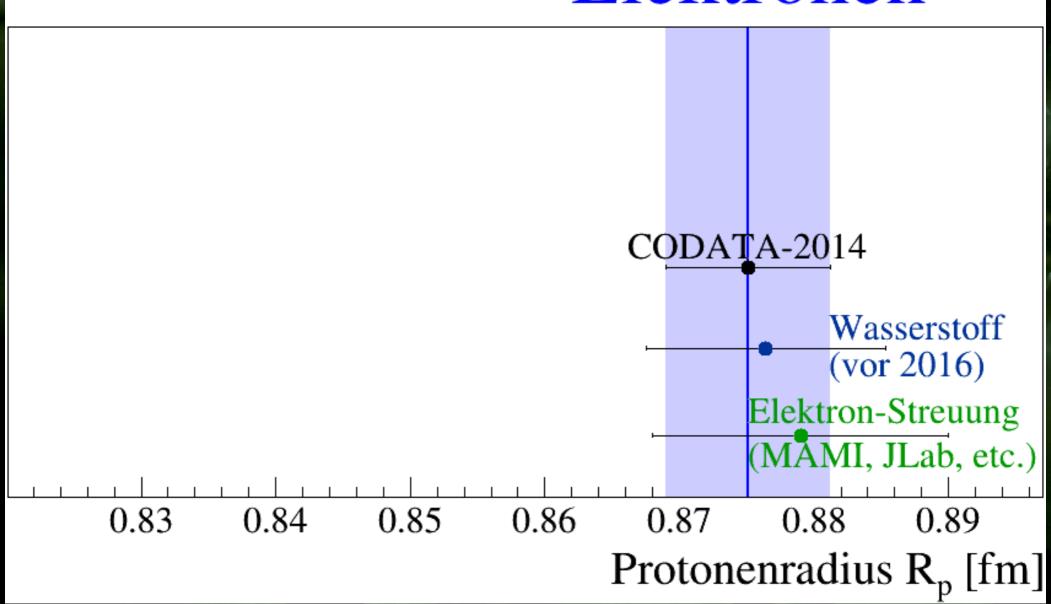
Oder ein Meßfehler?

Eine Menge neuer Experimente sind auf dem Weg.

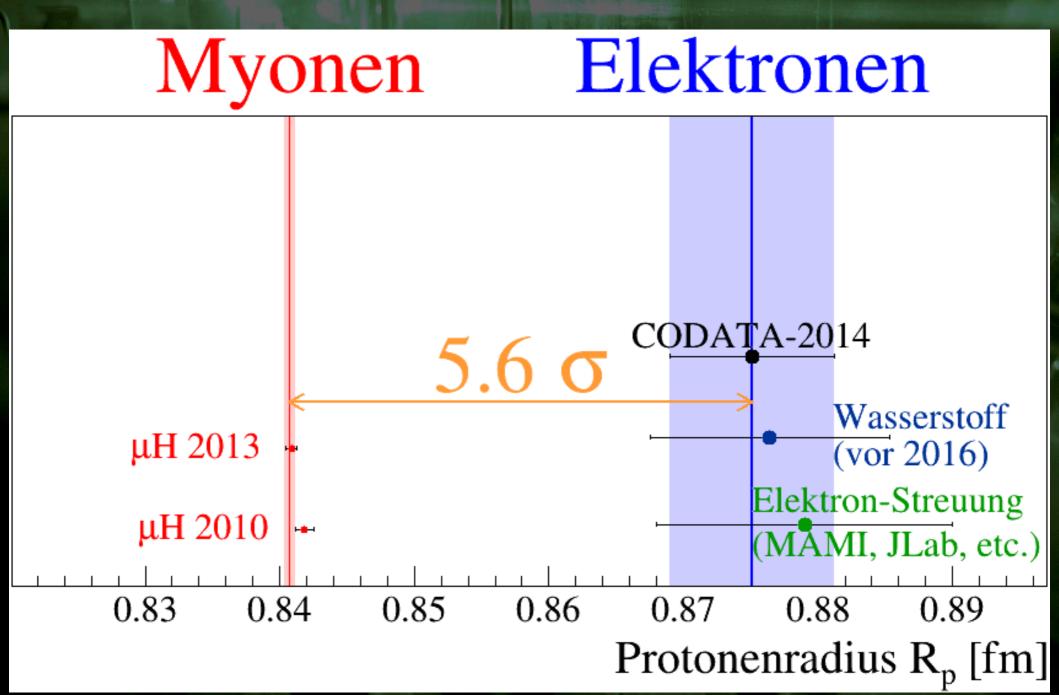
Zum Beispiel Myonisches Deuterium, etc.
Normaler Wasserstoff
Elektronenstreuung
Myonenstreuung

### Die "alten" Messungen

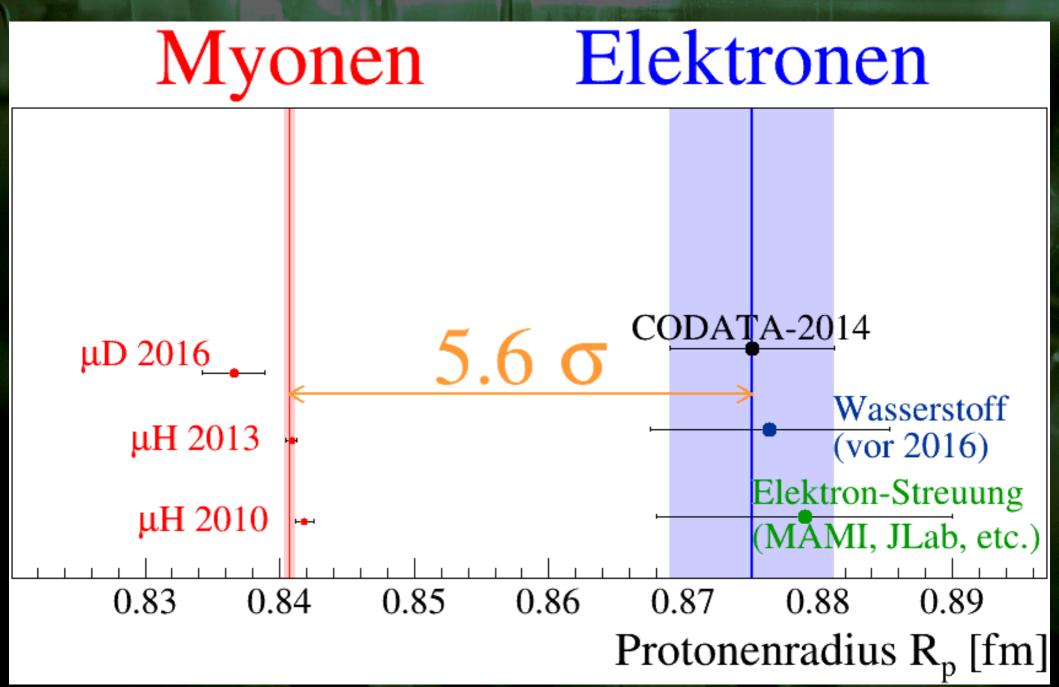




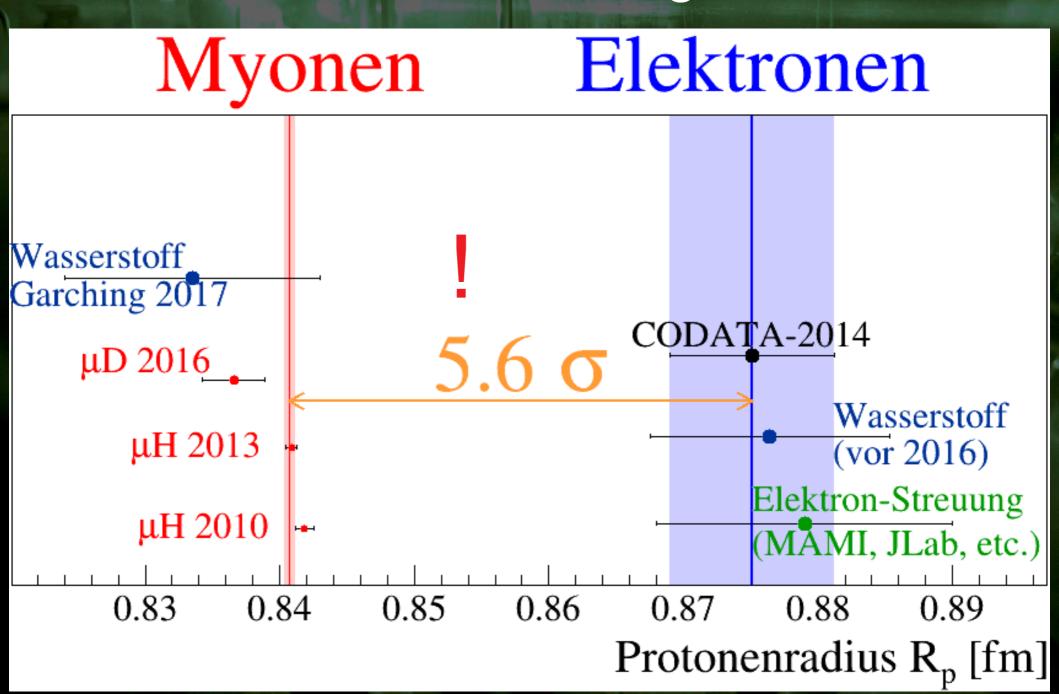
### Das "Proton Radius Puzzle"



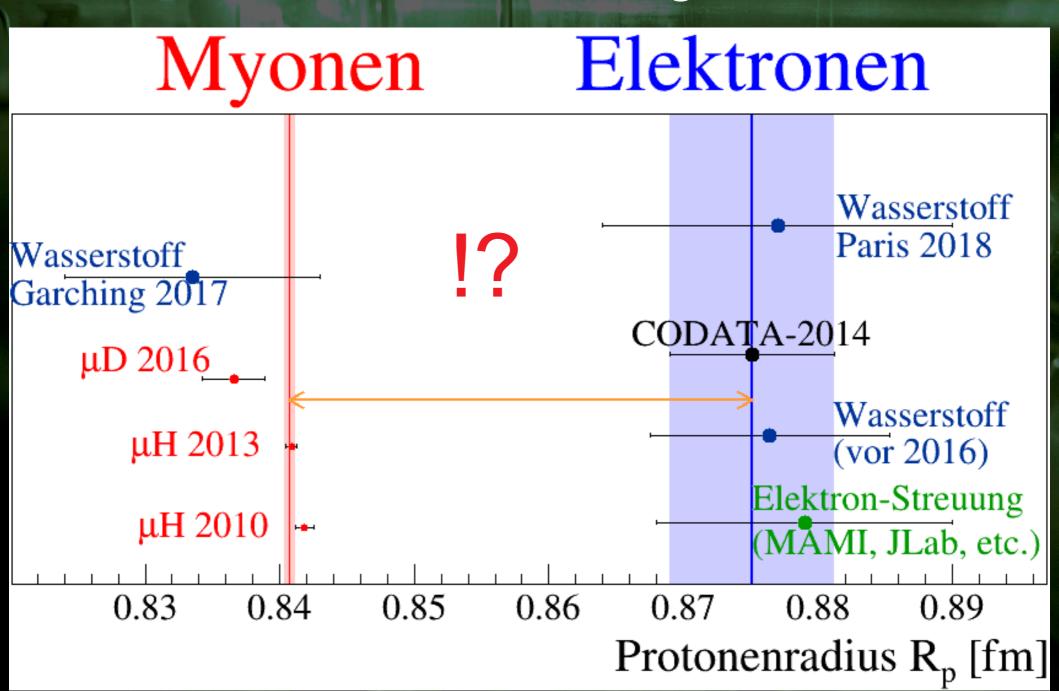
### Das "Proton Radius Puzzle"



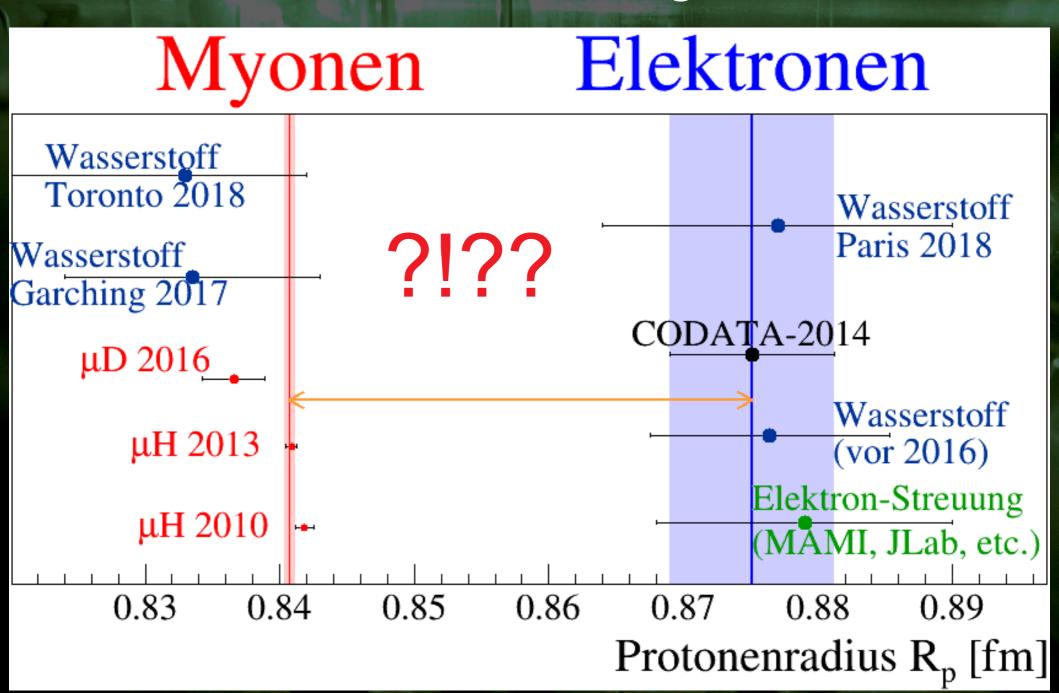
### Neue Messungen



### Neue Messungen



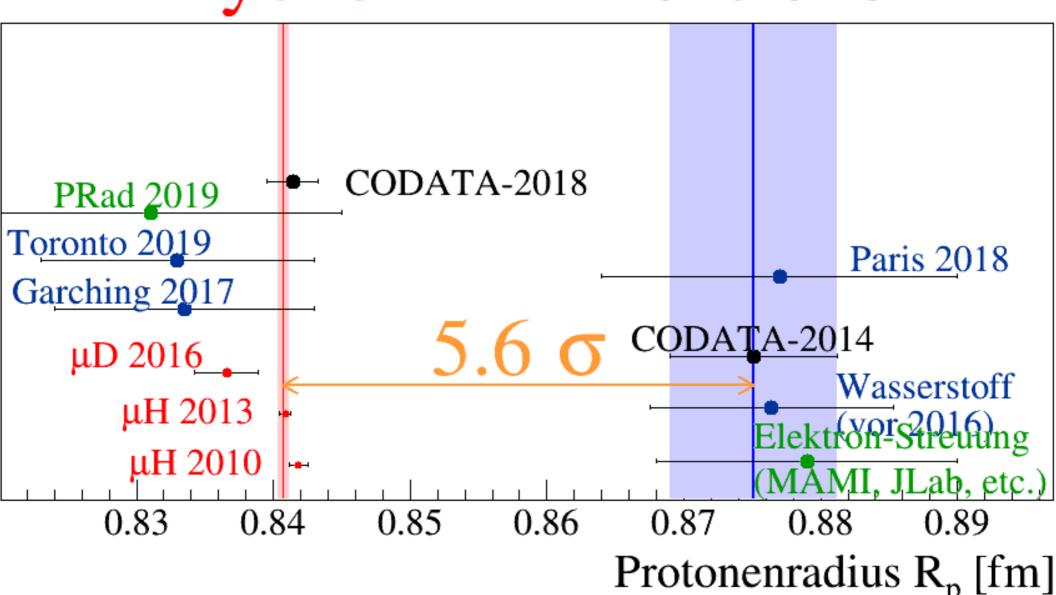
### Neue Messungen



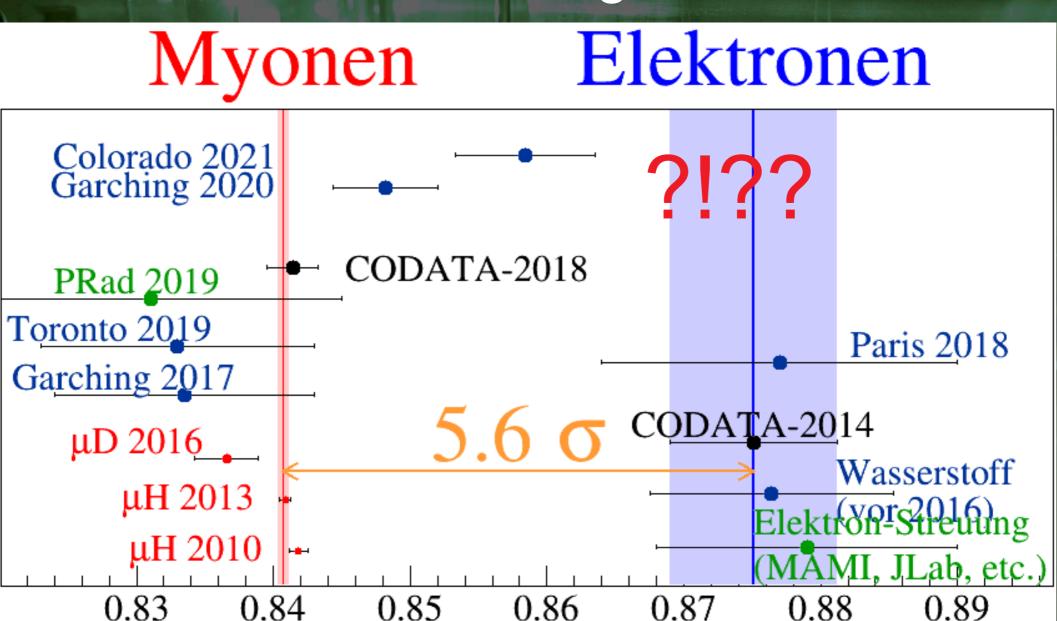
### Alle Messungen.....



# Elektronen



### Alle Messungen.....

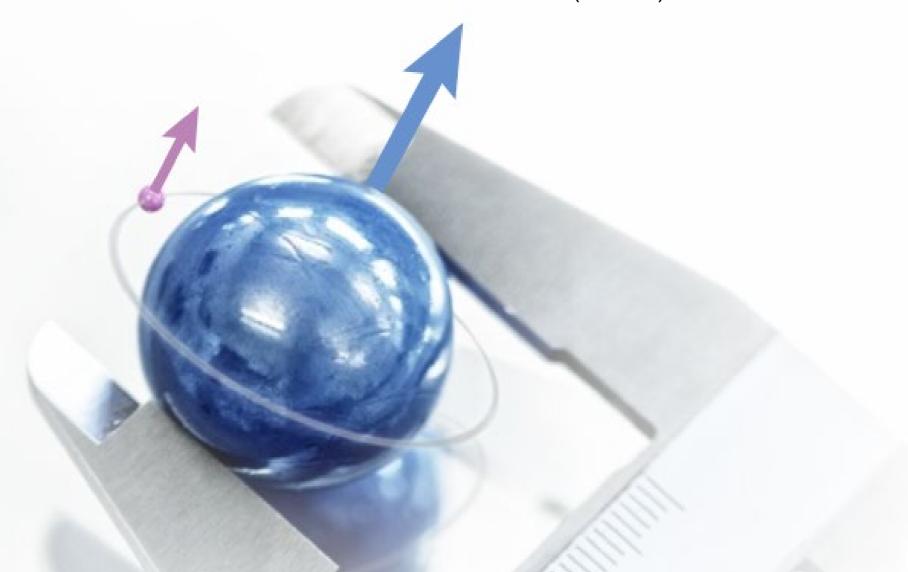


Protonenradius R<sub>p</sub> [fm]



# Hyperfeinstruktur in myonischem Wasserstoff

CREMA-3 / HyperMu at PSI (R16.02)



# Wasserstoff im Himmel

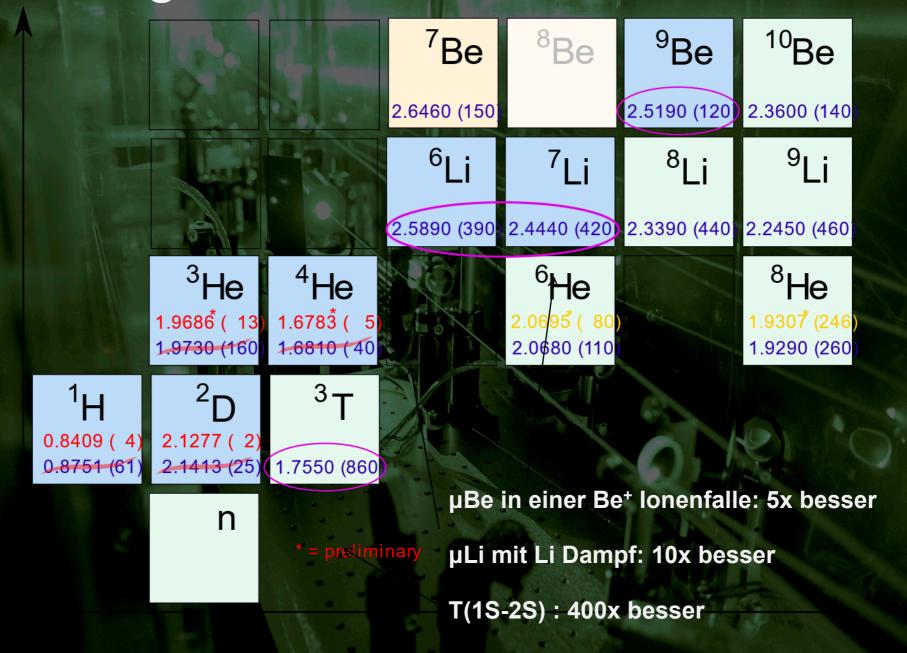
### Hyperfein - Struktur in H / µp

Die 21 cm - Linie in Wasserstoff (1S Hyperfine-Aufspaltung) wurde vor 50 Jahren(!) auf 12 Stellen genau gemessen (0.001 Hz):

QED - Test limitiert auf 6 Stellen (800 Hz) wegen der magnetischen Struktur des Protons

Eides et al., Springer Tracts 222, 217 (2007)

### Ladungsradien: Die Zukunft





Proton Size Investigators thank you for your attention



### Zusammenfassung

Das "Proton Radius Puzzle"









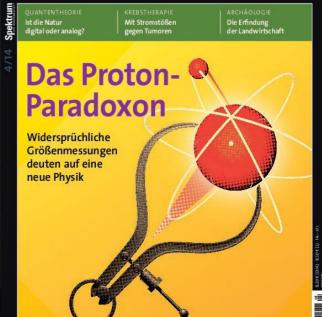








APPH 2014



www.spektrum.de









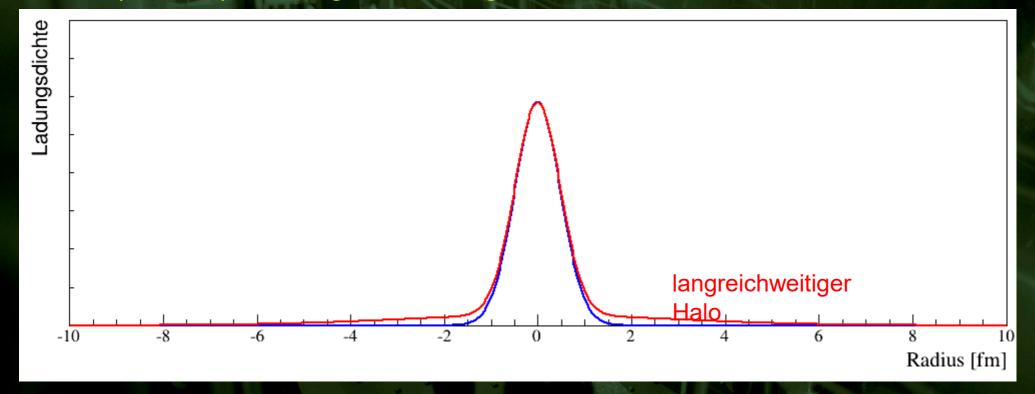
# AG Pohl



### Das Proton schaut anders aus!

Das Proton ist keine feste Kugel.

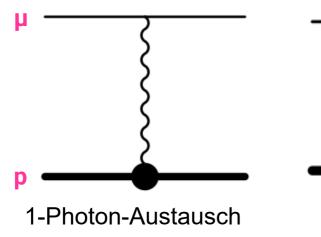
Die (radiale) Ladungsverteilung schaut anders aus!



Würde die Diskrepanz erklären! Ist jedoch im Widerspruch zu Messungen des Halos (e-p Streuung).

3. Zemach moment:  $37 \text{ fm}^3 \text{ vs. } 2.7 \pm 0.1 \text{ fm}^3$ 

### Das Myon verändert das Proton



2-Photonen-Austausch (elastisch)

2-Photonen-Austausch (inelastisch)

Ladungsradius

Proton-"Halo"

Protonen-Polarisierbarkeit

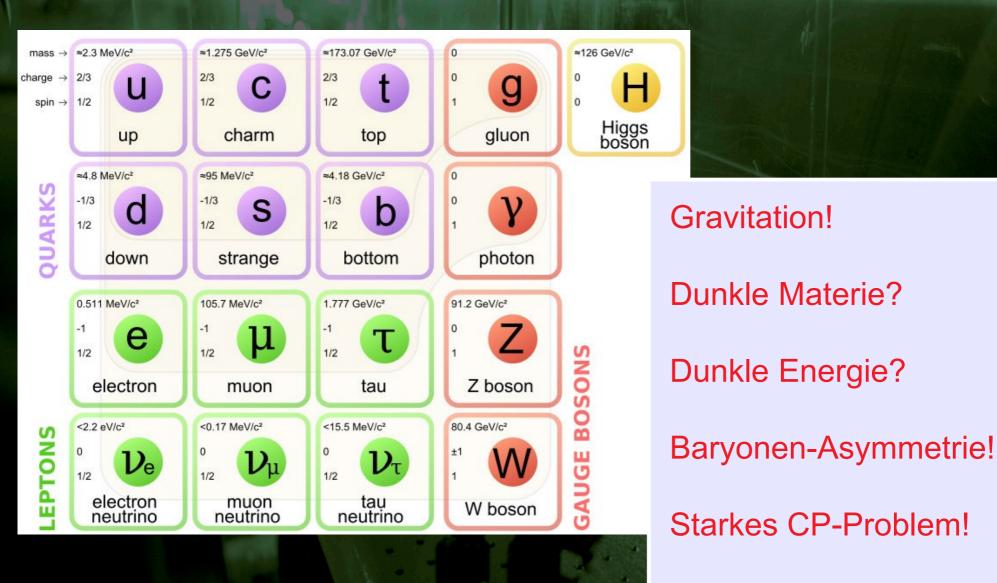
Ja! Die sog. "Polarisierbarkeit des Protons"

Aber der Effekt ist schon berücksichtigt und viel zu klein!

Diskrepanz: 0.31 meV

Polarisierbarkeit: 0.0127 ± 0.0005 meV

### Ein neues Teilchen!



### Ein neues Teilchen!

Physik jenseits des Standardmodells

könnte im Prinzip für die Diskrepanz verantwortlich sein!

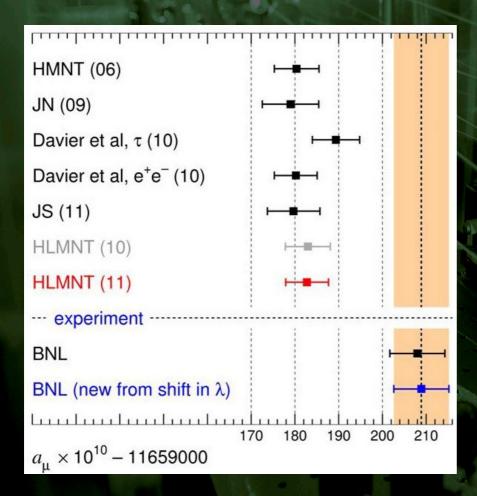
Das wäre ein neues Teilchen, das eine neue Kraft überträgt!

Diese Teilchen muß aber in das Korsett bestehender Messungen passen!

Schwierig......

### Das Myon macht uns zwei Probleme!

Anomales magnetisches Moment des Myons (g-2)



Seit 10 Jahren existiert eine ca. 3.6 σ Diskrepanz zum Standardmodell

# Das neue Myon g-2 Experiment





Umzug: Sommer 2013

Messung: 2017/18

Resultate: 7. April 2021!