

Antimaterie in Medizin und Grundlagenforschung

H.Koch

(Für einen Teil der Folien Dank an meinen Kollegen
R. Landua/CERN)

Gliederung

- Antimaterie in der Phantasie des Menschen
- Was ist Antimaterie?
- Antimaterie im Kosmos/in der Natur
- Erzeugung/Speicherung von Antiteilchen
- Antiteilchen in der Medizin
- Energieerzeugung mit Antiprotonen
- Antiteilchen in der Grundlagenforschung
- Antiprotonen in Deutschland

Antimaterie in der Phantasie

STAR TREK, Starship Enterprise

Antrieb: Antimaterie, 5000kg

Energieverbrauch pro sec: 180TJ

(ca. 10X Energieverbrauch Erde)



Wuminati

Detective story about a secret society which ..

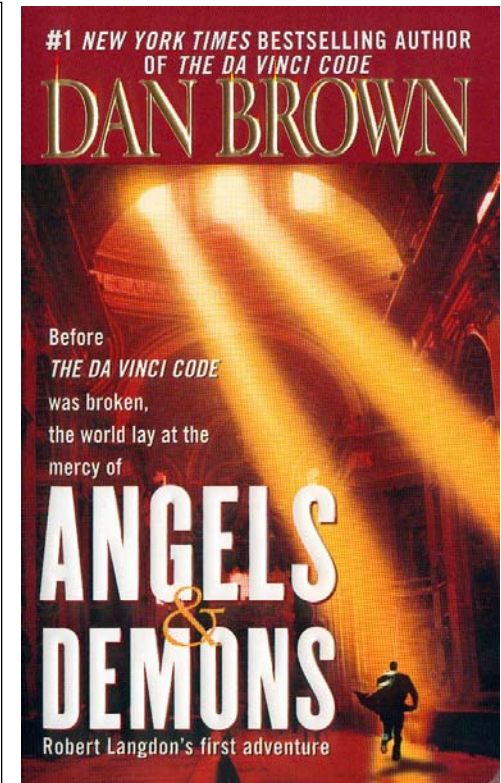
.



... steals 1 g of antimatter from a physicist at the 'LHC' in a place called "CERN" ...



... to blow up the Vatican, an old "enemy of science and CERN".

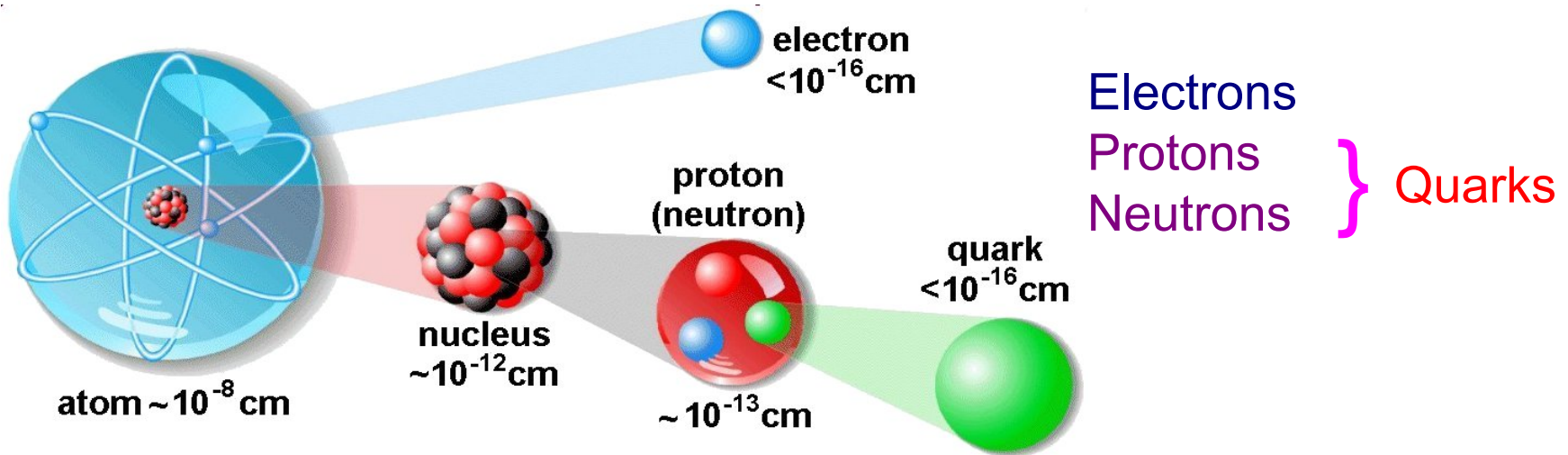


Was ist Antimaterie?

Alles besteht aus Materie

(Wir, Tiere, Pflanzen, Steine)

Hierarchie der Materiestrukturen



Das ganze(sichtbare)Universum ist aus drei Teilchensorten aufgebaut

Teilchen haben spezifische **Ladungen** und **Massen**

Name	Elektrische Ladung [e]	Masse [GeV/c ² *
Electron	- 1	0.0005
Proton	+ 1	0.938
Neutron	0	0.941

*GeV/c²= Giga-Electron Volt/c² = 1,000,000,000 Electron-Volt/c² = 1.8 · 10⁻²⁷ kg

Anti-Teilchen haben verglichen mit Teilchen die gleiche Masse, aber entgegengesetzte Ladung.

Name	Elektr. Ladung[e]	Masse[GeV/c ²]	Elektr. Ladung[e]	Name
Electron	-1	0.0005	+ 1	Positron
Proton	+ 1	0.938	- 1	Antiproton
Neutron	0	0.941	0	Antineutron

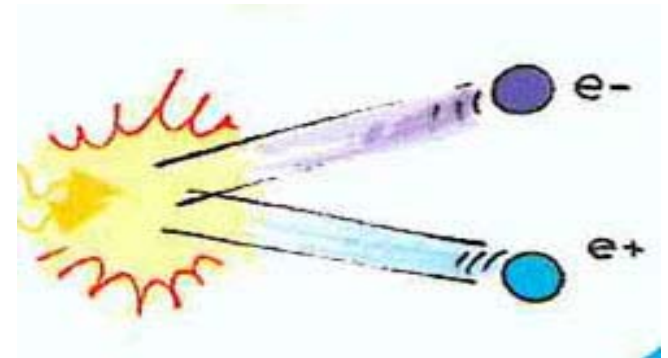
Die Antiteilchen sind stabile(!) Teilchen.

Teilchen und Antiteilchen werden immer paarweise erzeugt..

$$E=mc^2$$

Energie->Masse:

(z.B.: Gamma \rightarrow e^- + e^+)

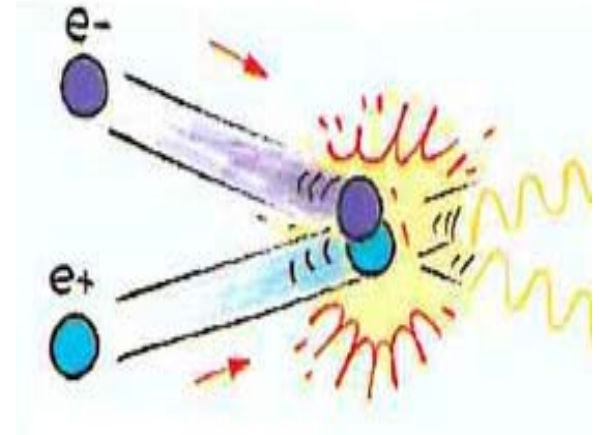


...und sie koennen sich auch annihilieren

$$E=mc^2$$

Masse->Energie:

(z.B.: e^- + e^+ \rightarrow Gamma;
 \bar{p} + p \rightarrow Gamma + Gamma)



Annihilationsreaktion sehr kurzreichweitig, aber auch sehr heftig!

Daher kann Antimaterie nur in extremen Vacua überleben!

Vorsicht bei Begegnung mit E.T.!



Entdeckung von Antimaterie

Positronen=Bestandteil der
Höhenstrahlung(Anderson, 1932)
(Bestätigung der Voraussagen von Dirac)

Antiprotonen/Antineutronen an Beschleuniger
erzeugt(Berkeley, 1954)

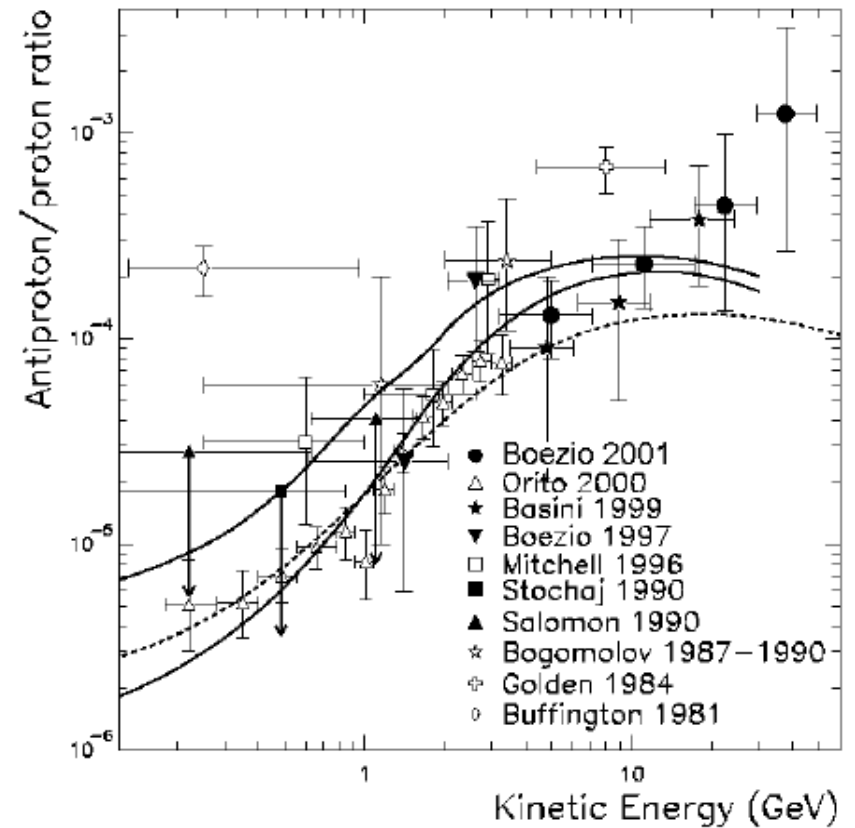
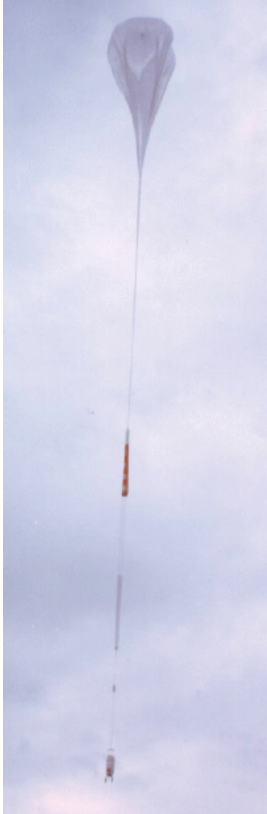
Antimaterie im Kosmos

Höhenstrahlung(Positronen,Antiprotonen)

- **Positronen**
- (aus Myon-Zerfällen: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$)

- **Antiprotonen**
- (Aus Sekundärreaktionen, z.B.
 $p(\text{Höhenstr.}) + p(\text{Interst. Mat.}) \rightarrow$
 $p + p + \bar{p} + p$)

Ballonexperimente

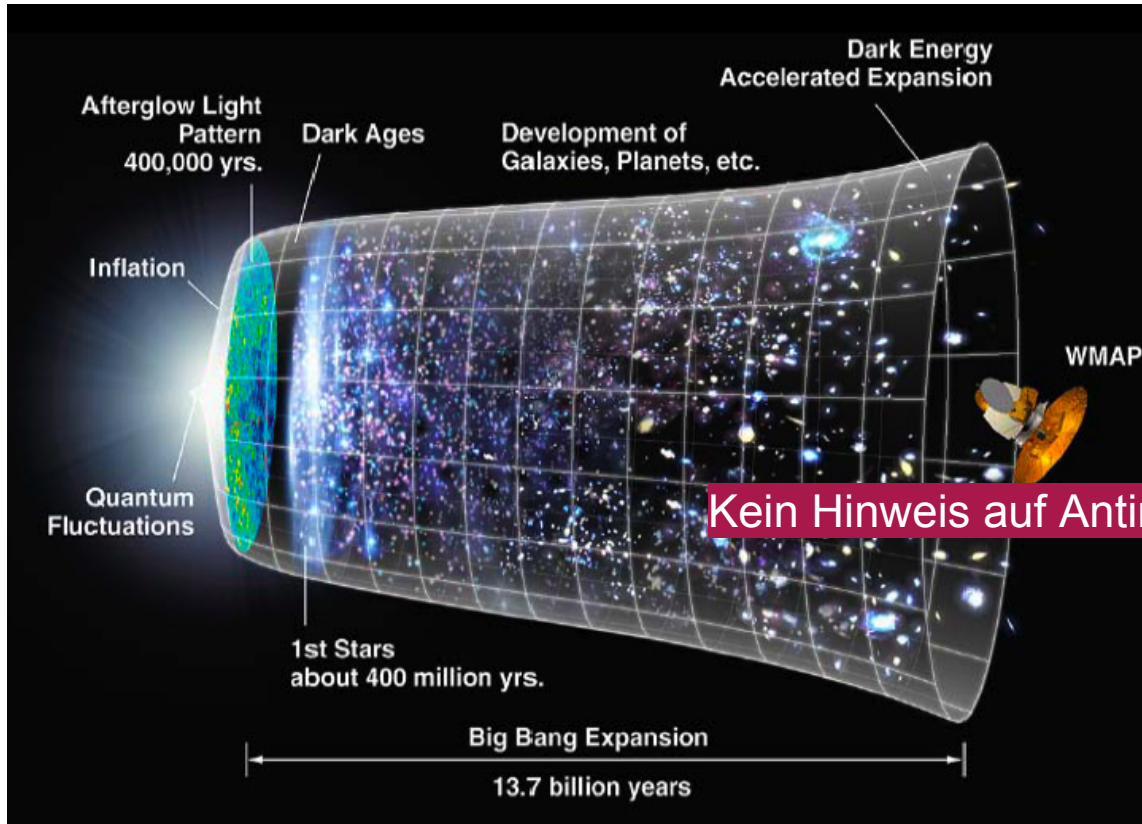


Höhenstrahlung(Schwere Antikerne)

- Solche Kerne können nicht durch Sekundärreaktionen entstehen,sie müssen im Laufe der Evolution(z.B. in Anti-Galaxien) entstanden sein.
- Bisher kein Hinweis auf solche Teilchen
AMS-01-Experiment(Shuttle-Flug,1998)
→ $\text{He}/\text{He} < 1.1 \times 10^{-6}$

AMS-02-Experiment(ISS-Station,2010)

Mysterium der Antimaterie



Kein Hinweis auf Antimaterie

**Urknall-Modell:
Entwicklung
des Kosmos**

Urknall: Energie verwandelt sich in Masse + Antimasse (Gleiche Mengen)

< 1 μ s: Materie = Antimaterie

1 s: nahezu alle Materie/Antimaterie verschwunden (Annihilation)

Aber: Einige Materieteilchen bleiben übrig (Sterne, Planeten, Wir)

Teilchen/Antiteilchen-Asymmetrie!

Materie/Antimaterie-Asymmetrie

Ursache der Asymmetrie: Bisher unbekannt.
Bekannte Effekte erklären nur sehr kleinen Teil der Asymmetrie.

→ Zukünftige Forschung

- Experimente mit Antiwasserstoff (Unterschiede in Masse, Ladung, magnetischem Moment)
- Experimente zur CP-Verletzung

Antimaterie auf der Erde

Antimaterie(Positronen)auf der Erde

Die uns umgebende Natur, aber auch der menschliche Körper, enthält (in geringen Mengen) ${}_{19}\text{K}^{40}$ – Kerne. Sie sind radioaktiv und strahlen Beta+ Strahlung (Positronen) aus. Die Halbwertszeit ist 1.2 Milliarden Jahre:



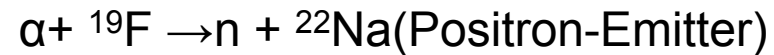
Es gibt weitere Positronenstrahler in der Natur, aber mit kleineren Halbwertszeiten. In grösseren Mengen müssen sie künstlich hergestellt werden, z.B. ${}_{11}\text{Na}^{22}$ (siehe PET)

Erzeugung/Speicherung von Antimaterie

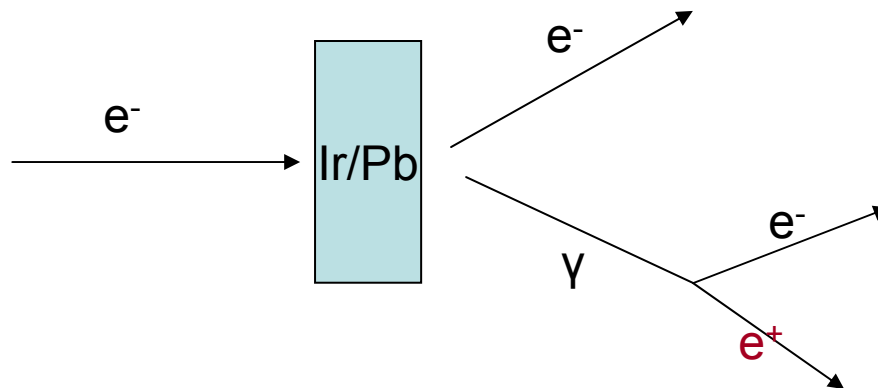
Erzeugung von Positronen

Kleine Energien (PET-Scan, Antiwasserstoff)

Radioaktive Kerne (Positronenemitter) werden mit Zyklotron hergestellt



Grosse Energien (Positronen für Beschleuniger)

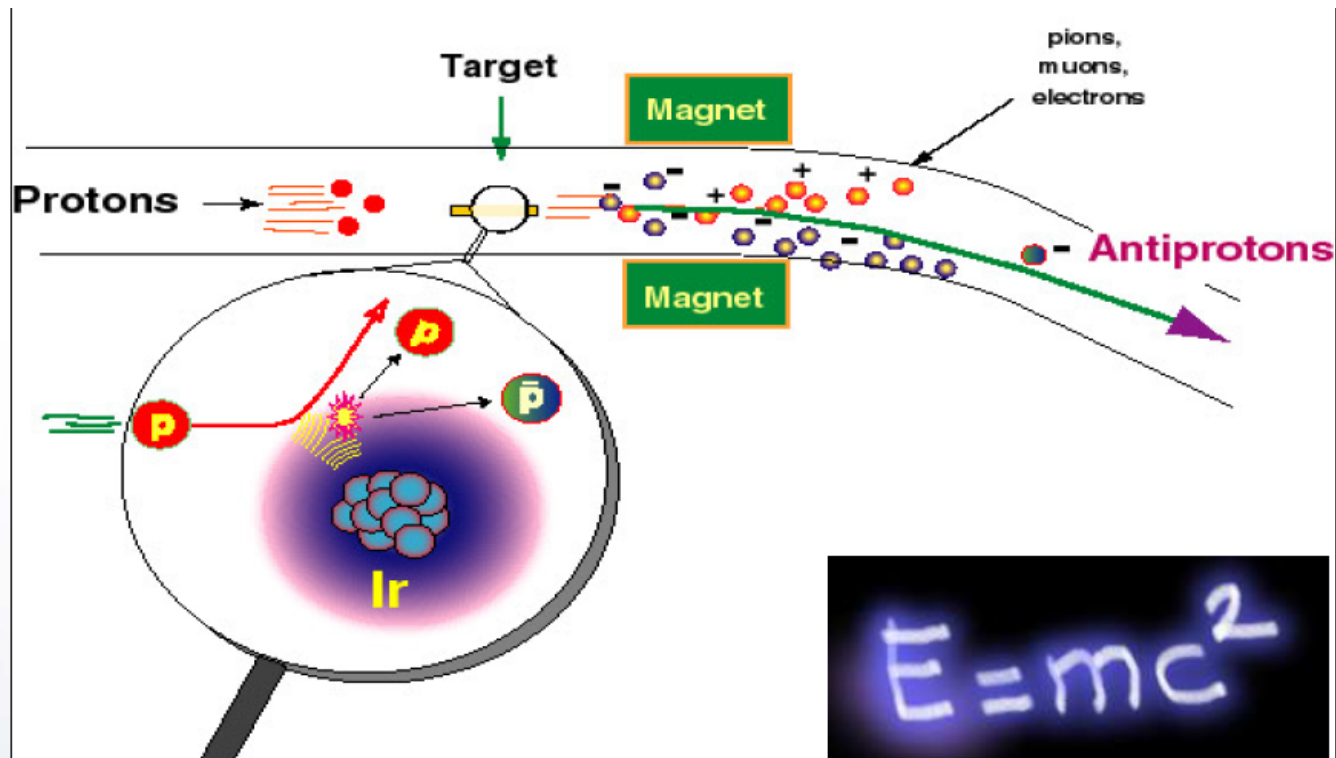


Hochenergetische Elektronen erzeugen durch Streuung an schweren Kernen Gammas, die in e^-/e^+ - Paare zerfallen.

Erzeugung von Antiprotonen

Nur möglich an Hochenergiebeschleunigern, da bei niederen Energien keine bzw. zu wenige Antiprotonen erzeugt werden.

Die Antiprotonen werden erzeugt in Kollisionen von Protonen mit Kernen.



Erzeugung von Antiprotonen, zum ersten Mal in Berkeley am 6 GeV Bevatron (1954)

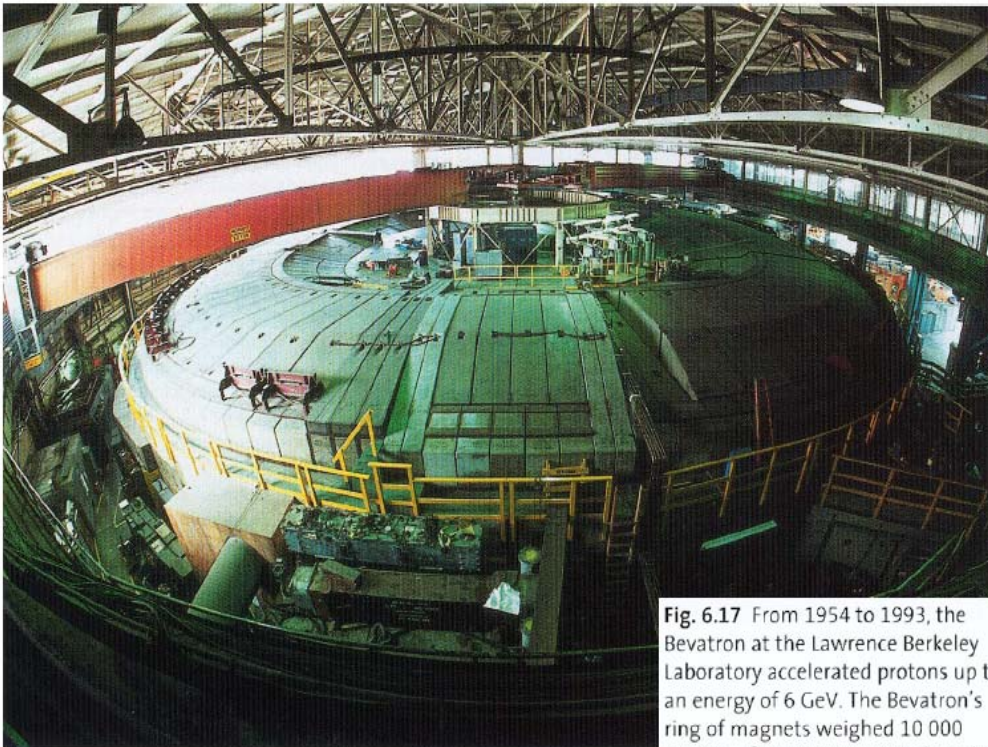
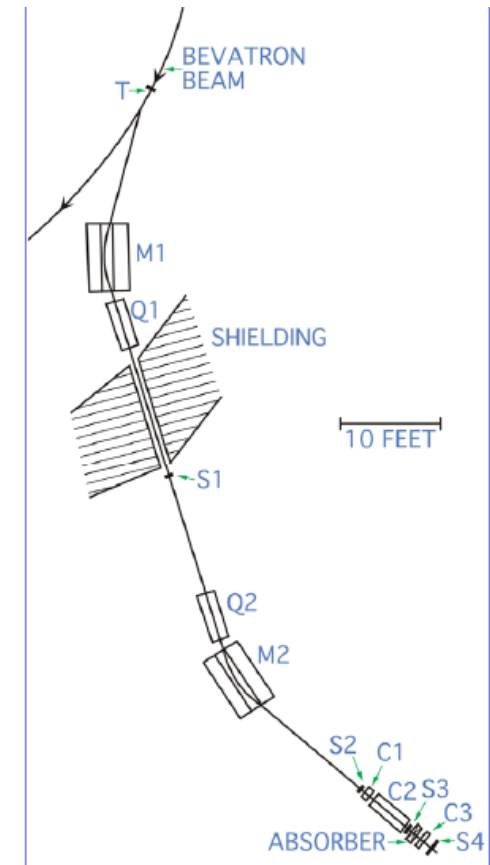


Fig. 6.17 From 1954 to 1993, the Bevatron at the Lawrence Berkeley Laboratory accelerated protons up to an energy of 6 GeV. The Bevatron's ring of magnets weighed 10 000 tonnes – five times greater than the magnet ring in the Cosmotron.

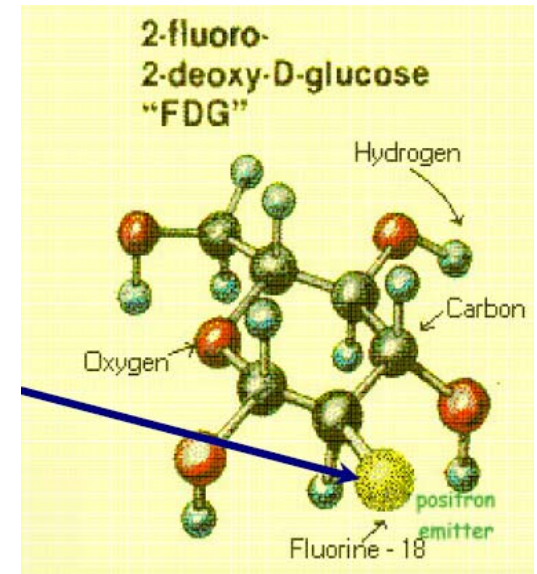


Antimaterie in der Medizin

PET(Positron Emission Tomography)

Prinzip:

- Glukose wird im Körper zur Energieerzeugung benötigt (Tumorzellen verbrauchen auf Grund eines erhöhten Stoffwechsels mehr Glukose)
- Produziere z.B. ^{18}F (Positron-Emitter) mit einem Kompakt-Zyklotron. ^{18}F wird zu Glukose hinzugefügt→FDG ,wirkt im Körper wie Glukose
- Injektion ins Blutsystem
- FDG akkumuliert dort , wo Energie benötigt wird

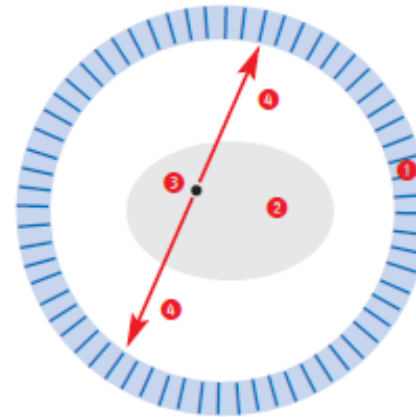


PET(Positron Emission Tomography)

-Positronen werden im Körper erzeugt und annihilieren nach kurzer Laufstrecke in zwei Gammas(γ)



-Beide γ 's werden von Detektoren gemessen.
3-D Bild der FDG-Verteilung im Computer



- 1 Scanner-Ring der PET-Kamera
- 2 Querschnitt durch den Körper des Patienten
- 3 Ort eines Positronenzerfalls
- 4 „Energieteilchen“ fliegen gleichzeitig und im Winkel von 180 Grad zueinander vom Ort des Zerfalls weg.



Bild eines PET-Scanners in klinischer Umgebung

PET(Positron Emission Tomography)

Charakteristika von PET:

- Gewebefunktionen werden sichtbar,insbesondere Gehirnfunktionen
- Effektive Methode zur Früherkennung vieler Tumorarten und Lymphome
- Effektive Methode zur Kontrolle des Verlaufs und des Ansprechens einer Chemo/Strahlentherapie

Konkurrierende Verfahren:

- CT(Computerized Tomography)
- MRT(Magnetic Resonance Tomography)

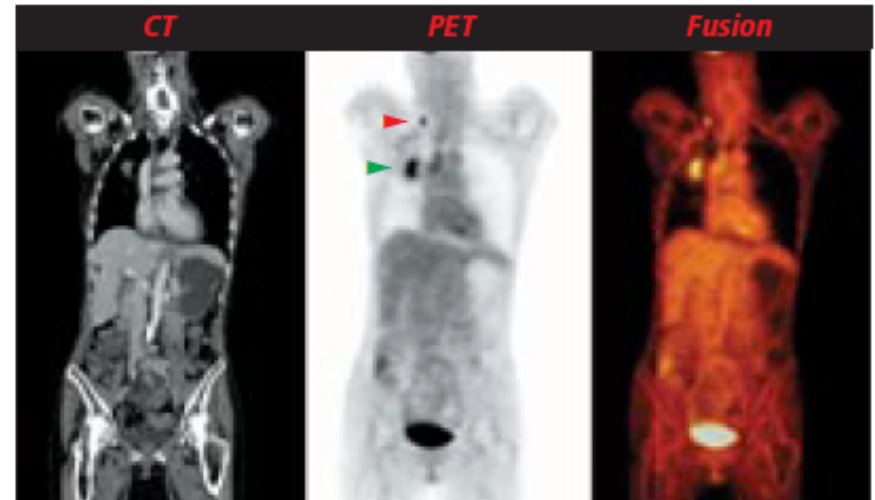
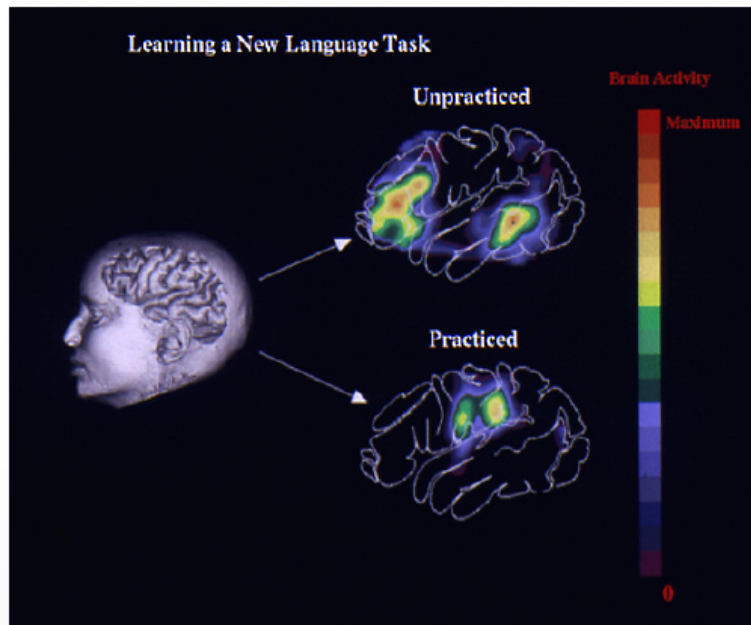
Heute:Kombination von PET mit CT

→Höhere Ortsauflösung



Bild eines PET/CT-Systems mit 16-Zeilen-CT; das deckenmontierte Gerät ist eine Hochdruckspritze für das CT-Kontrastmittel

PET-Scans: Beispiele



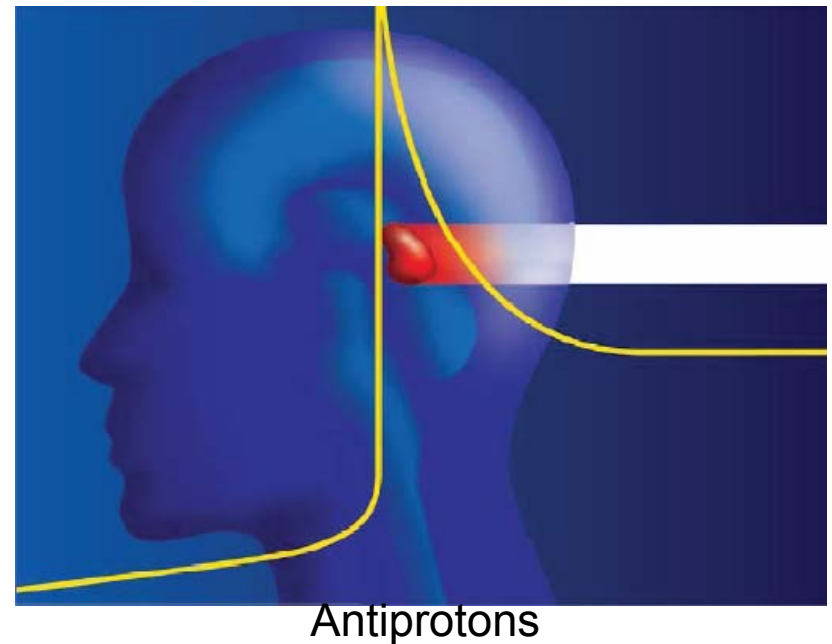
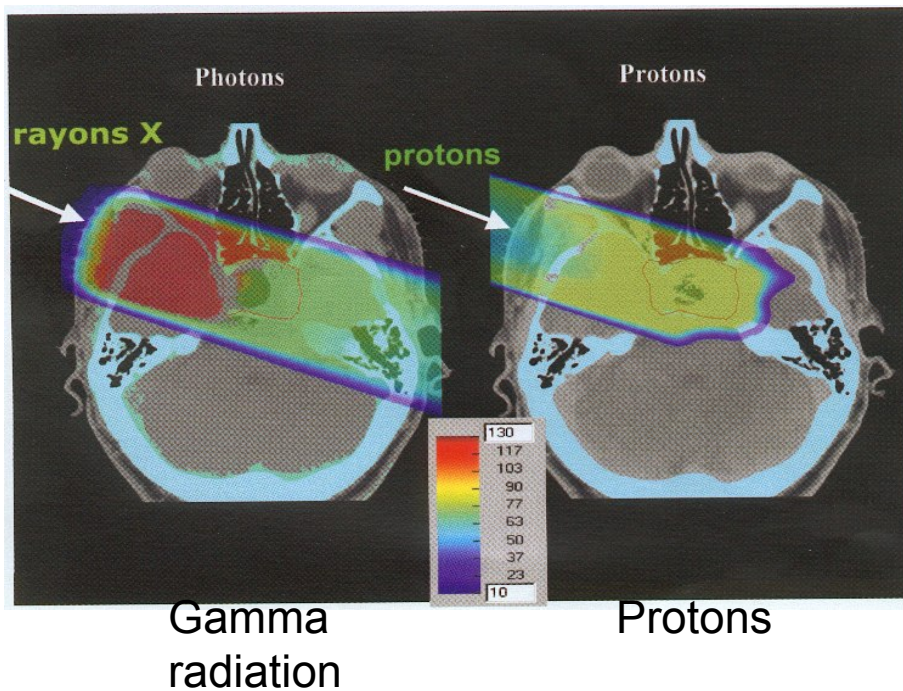
- Bei einer 55-jährigen Patientin wurde ein Lungentumor rechts festgestellt (←). Bei der PET/CT-Untersuchung zeigte sich, dass ein weit entfernter Lymphknoten am Schlüsselbein ebenfalls befallen war (→). Eine sofortige Operation war daher nicht sinnvoll, sodass zunächst eine Chemotherapie eingeleitet wurde. (E)

Tumor-Therapie mit Antiprotonen

Gamma Strahlung zerstört viele gesunde Zellen

Protonen deponieren die Strahlung spezifischer an Tumorzellen

Antiprotonen wären 3mal effizienter als Protonen(Annihilation);Kosten!



Energieerzeugung mit Antiprotonen

Dan Brown: Antimaterie ist die Energiequelle der Zukunft

NEIN!

Antimaterie-Produktion verbraucht sehr viel Energie, 1,000,000,000 mal mehr als erzeugt wird

Beispiele

-Betrieb einer 60 Watt-Glühbirne für einige Tage

0.2 μg Antiprotonen ,600 Mio Euro

-Bombe a la Hiroshima(22 kT TNT)

9×10^{13} Joule, 0,5 g Antiprotonen, 1000 Bill Euro

Lieferzeit: 1 Milliarde Jahre

Einzigste Hoffnung: **Antimaterie aus Antigalaxien?**

Antimaterie in der Forschung

Materieteilchen und ihre Wechselwirkungen

Quarks

Quarks (q)	Masse [MeV/c ²]	Ladung/e
u	5	+ 2/3
d	7	- 1/3
s	95	- 1/3
c	1250	+ 2/3
b	4200	- 1/3
t	174200	+ 2/3

+ Antiquarks
($\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$)

Quarks kommen nur in Zweier ($q\bar{q}$) und Dreier-Kombinationen (qqq) vor (Hadronen)

Baryonen: qqq

Proton = uud

Antiproton = $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$

Mesons : $q\bar{q}$

$\pi^+ = u\bar{d}$

$\pi^- = \bar{u}d$

Radien der Quarks: $< 10^{-19}$ m

Radien der Hadronen: $\approx 10^{-15}$ m

Nur Proton/Antiproton stabil, Neutron stabil im Kern

Marieteilchen und ihre Wechselwirkungen

Leptonen	Masse	Ladung/e
Elektron Neutrino ν_e	$< 17 \text{ eV}/c^2$	0
Elektron e^-	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1
Myon Neutrino ν_μ	$< 0.25 \text{ MeV}/c^2$	0
Myon μ^-	$105 \text{ MeV}/c^2$	-1
τ -Neutrino ν_τ	$< 35 \text{ MeV}/c^2$	0
τ -Lepton τ^-	$1784 \text{ MeV}/c^2$	-1

+ Anti-Teilchen
 $(\bar{\nu}_e, e^+, \bar{\nu}_\mu, \mu^+, \bar{\nu}_\tau, \tau^+)$

Radien: $< 10^{-19} \text{ m}$

Nur Elektron/Positron stabil (Neutrinos wandeln sich ineinander um)

Mittlerteilchen

Photonen (γ) (Elektromagnetische Wechselwirkung)

Intermediäre Bosonen (W^\pm, Z^0) (Schwache Wechselwirkung)

Gluonen (g) (Starke Wechselwirkung)

Gravitonen (G) (Schwerkraft)

Higgs-Teilchen (H)

Verantwortlich für

Masse der Quarks

Anteilchen hoher Energien

Beinahe alle bedeutenden Entdeckungen in der Teilchen/Hadronenphysik in den letzten Jahrzehnten wurden unter Einsatz von Anteilchen-Strahlen gemacht.

$e^+ e^-$ Speicherringe:

Entdeckung des Charm-Quarks (SPEAR/Stanford)

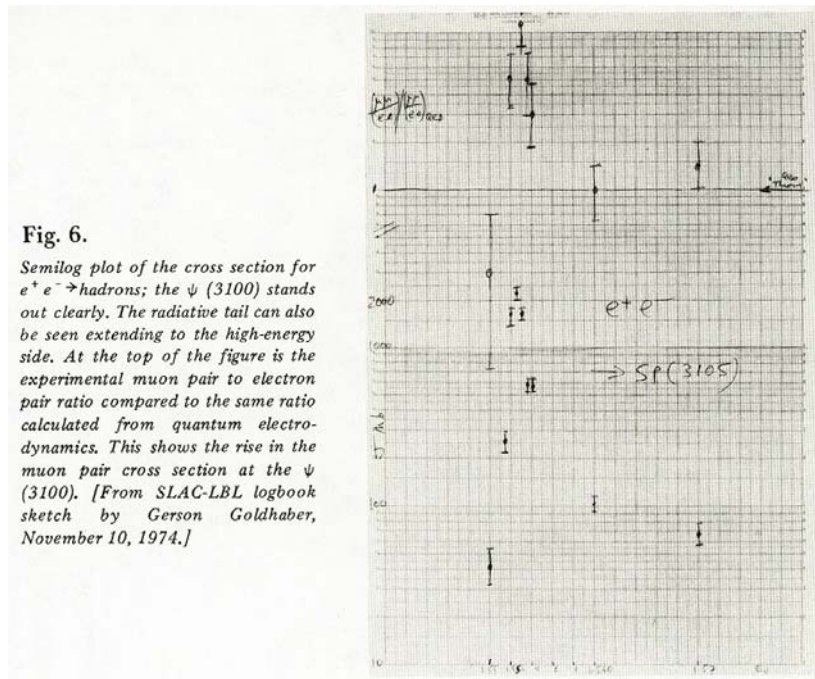
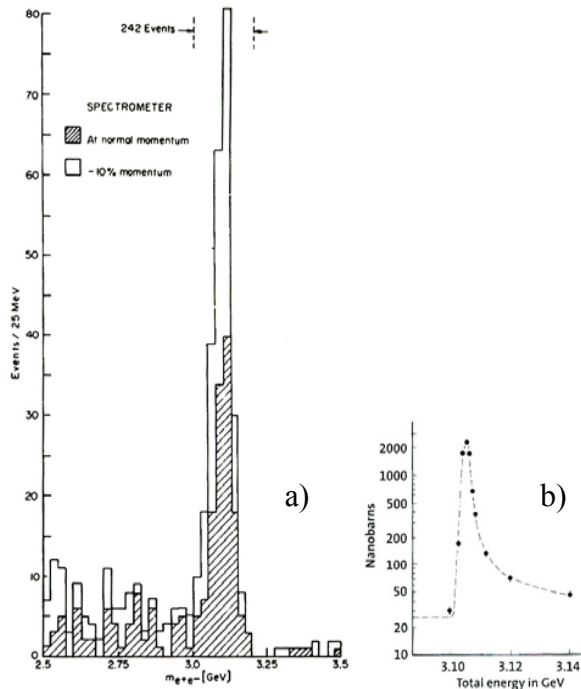


Fig. 6.

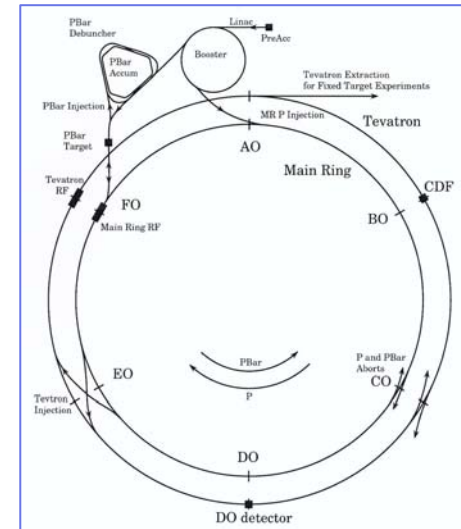
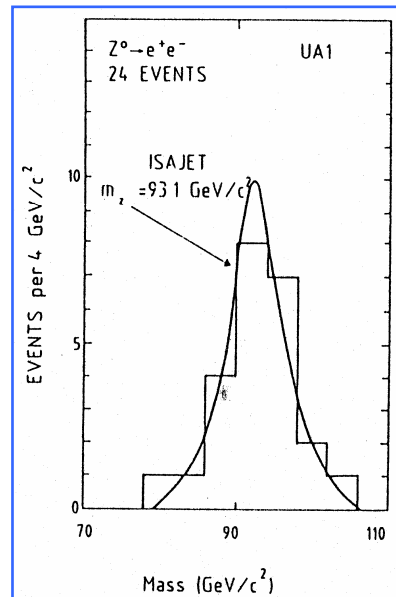
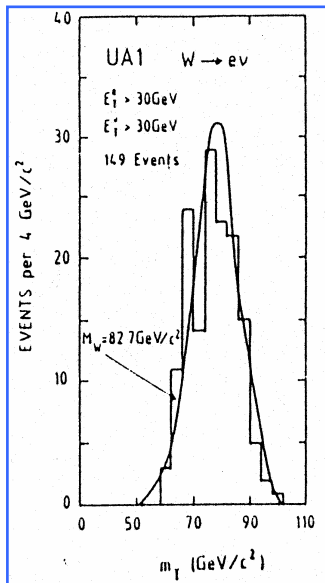
Semilog plot of the cross section for $e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$; the $\psi(3100)$ stands out clearly. The radiative tail can also be seen extending to the high-energy side. At the top of the figure is the experimental muon pair to electron pair ratio compared to the same ratio calculated from quantum electrodynamics. This shows the rise in the muon pair cross section at the $\psi(3100)$. [From SLAC-LBL logbook sketch by Gerson Goldhaber, November 10, 1974.]

$$M(J/\Psi) = 3096.916 \pm 0.011 \text{ MeV}/c^2$$

Antiproton-Proton Speicherringe

Entdeckung der W/Z-Bosonen(CERN/Genf)

Entdeckung des schwersten Quarks (t-Quark) (FermiLab/Chicago)

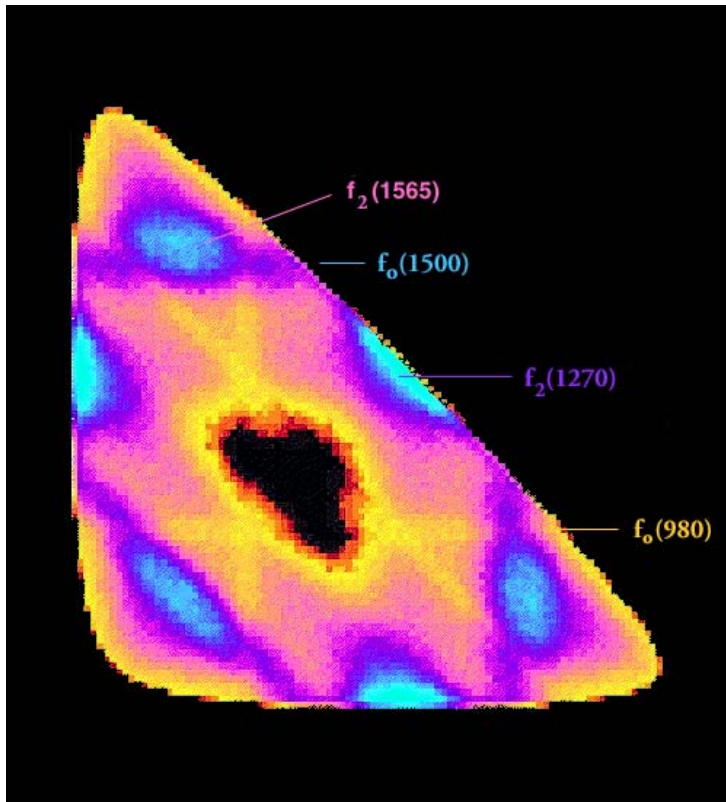


$$M_W = 80.398 \pm 0.025 \text{ GeV}/c^2$$

$$M_t = 171.2 \pm 2.1 \text{ GeV}/c^2$$

Antiprotonen mittlerer Energie (LEAR/CERN)

Suche nach exotischen Quark-Kombinationen/Gluonen-Bällen



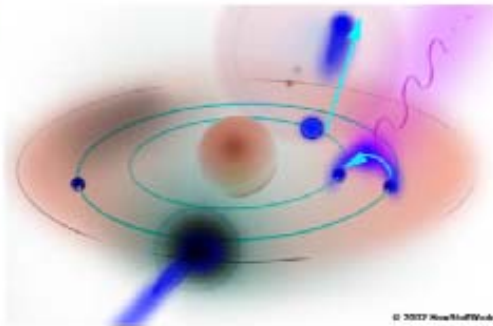
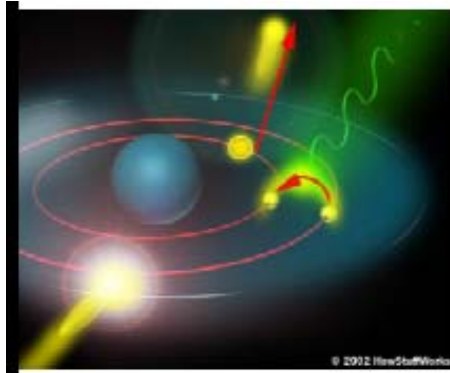
Dalitz-Plot der Reaktion
Antiproton Proton $\rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$

\rightarrow Signal für $f_0(1500)$ -Meson)

Erster Kandidat für ein exotisches Meson/
Gluonen-Ball

Positronen und Antiprotonen sehr kleiner Energie (AD/CERN)

Aktuelles Beispiel: Untersuchungen an **Antiwasserstoff**



Wasserstoff: Proton+e⁻

Antiwasserstoff: Antiproton+e⁺

Vergleich der Eigenschaften von Wasserstoff und Antiwasserstoff mit grosser Präzision: Ladungen, Masse, Magnetische Momente, Energieniveaus, ...

Abweichung einiger Messgrößen (Verletzung der CPT-Symmetrie) könnte Hinweis auf Materie/Antimaterie-Unsymmetrie im Kosmos geben.

Produktion von Antiwasserstoff

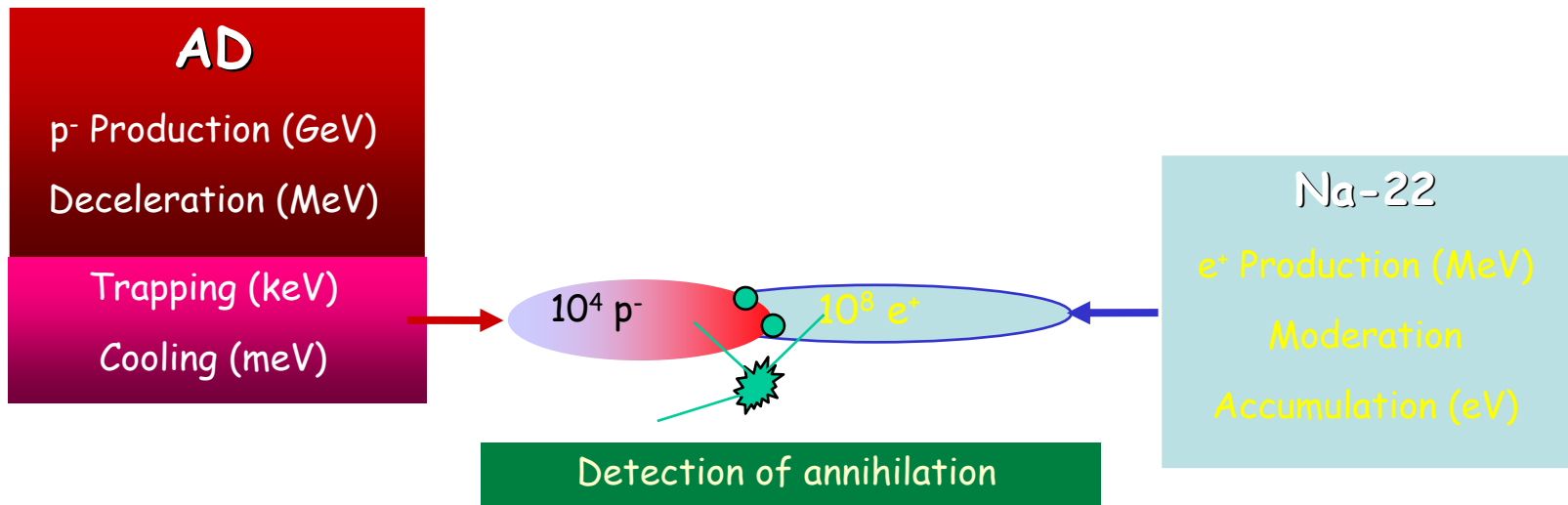
AD-Ring/CERN: Vier Experimente (Alpha, Atrap, Asacusa, Aegis)

Ausserordentliche experimentelle Probleme:

Hohes Vakuum (Verhinderung der Annihilation)

Sehr tiefe Temperaturen (nahe absol. Nullpunkt)

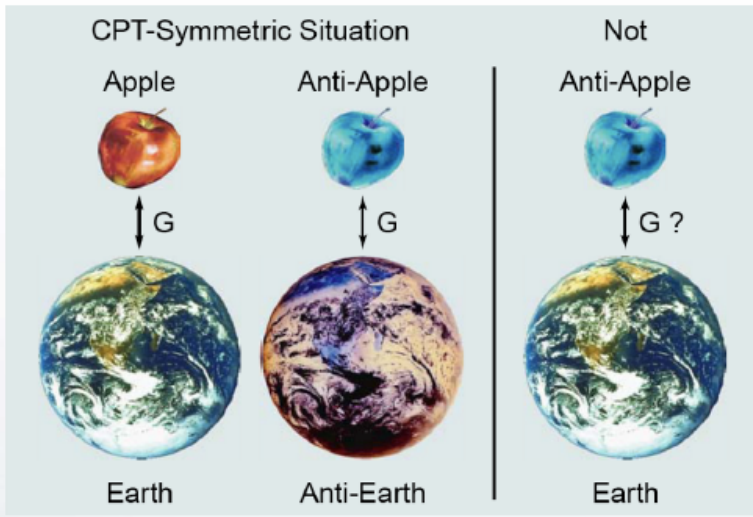
Speicherung von e^+ / p^- und des Antiwasserstoffs in elektromagnetischen Fallen (Penning; Ioffe; Cusp)



18

Antiwasserstoff/Aegis-Experiment(AD)

Test der Gravitationswechselwirkung von Antimaterie



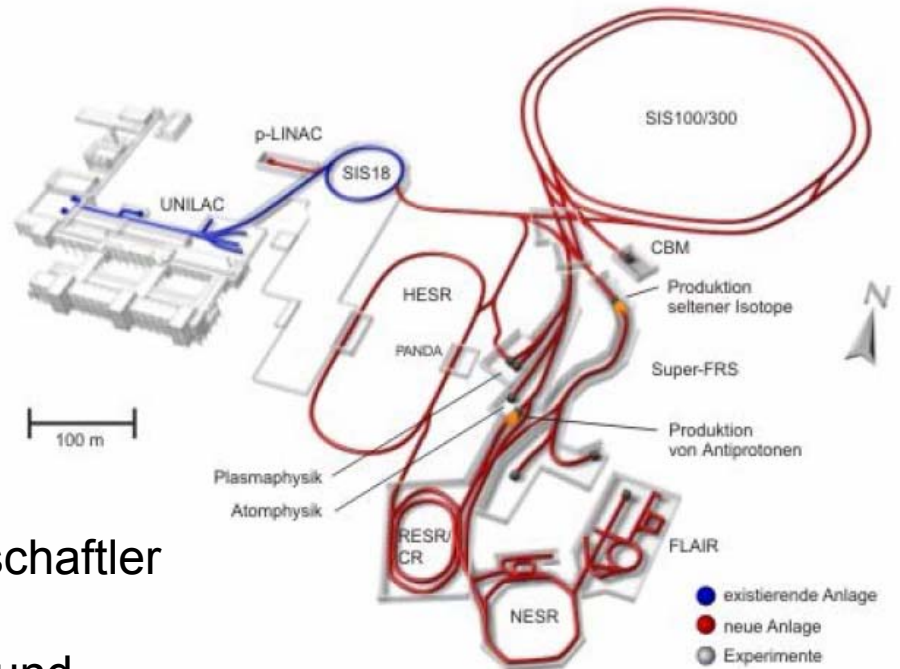
Die Grösse und das Vorzeichen von Materie-Antimaterie-Gravitation sind nicht bekannt

→Aegis-Experiment(AD)
(Noch keine Resultate)

Antiprotonen in Deutschland

FAIR=Facility for Antiprotons and Heavy Ion Research in Darmstadt

Erweiterung der bisher bestehenden Forschungseinrichtung GSI

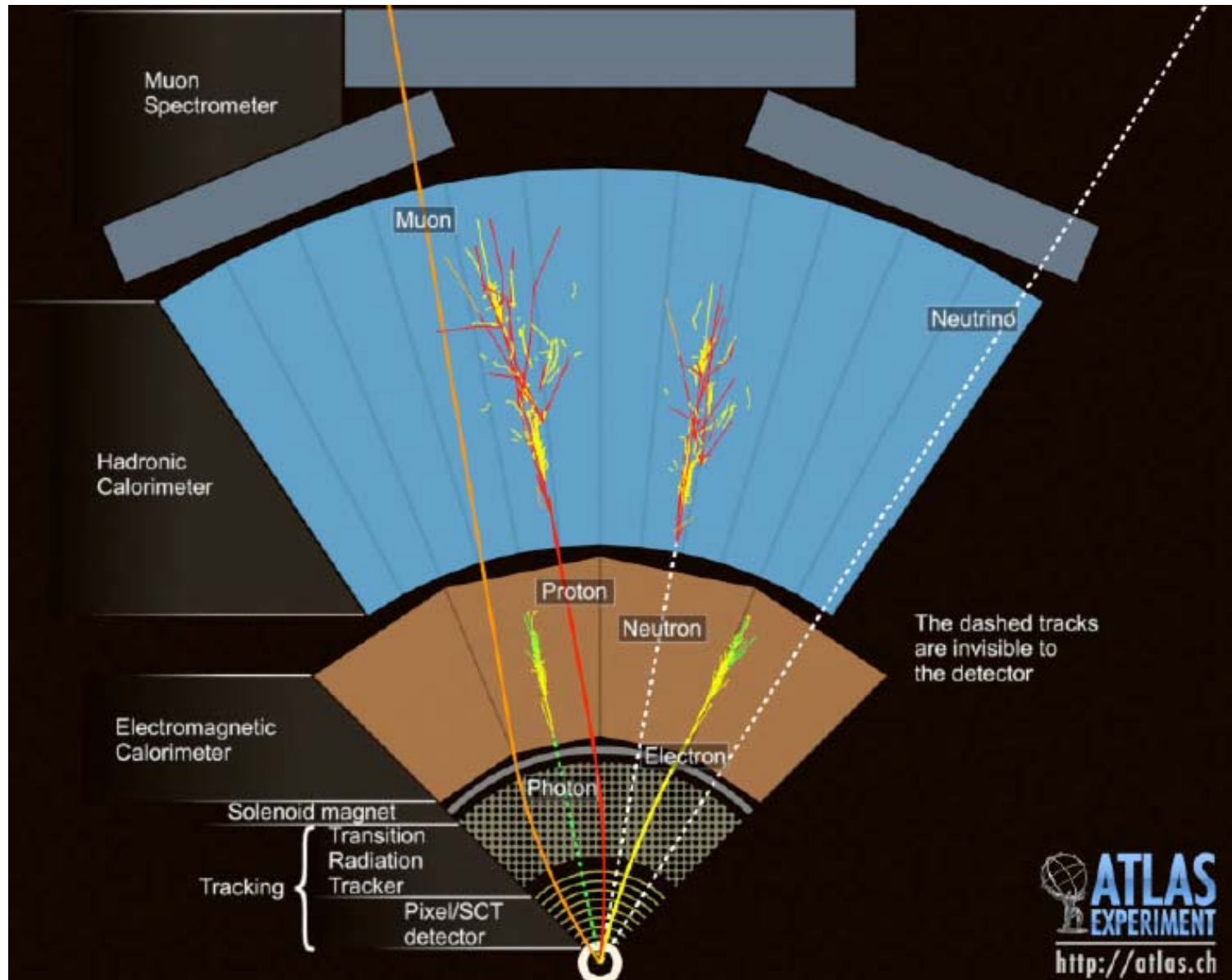


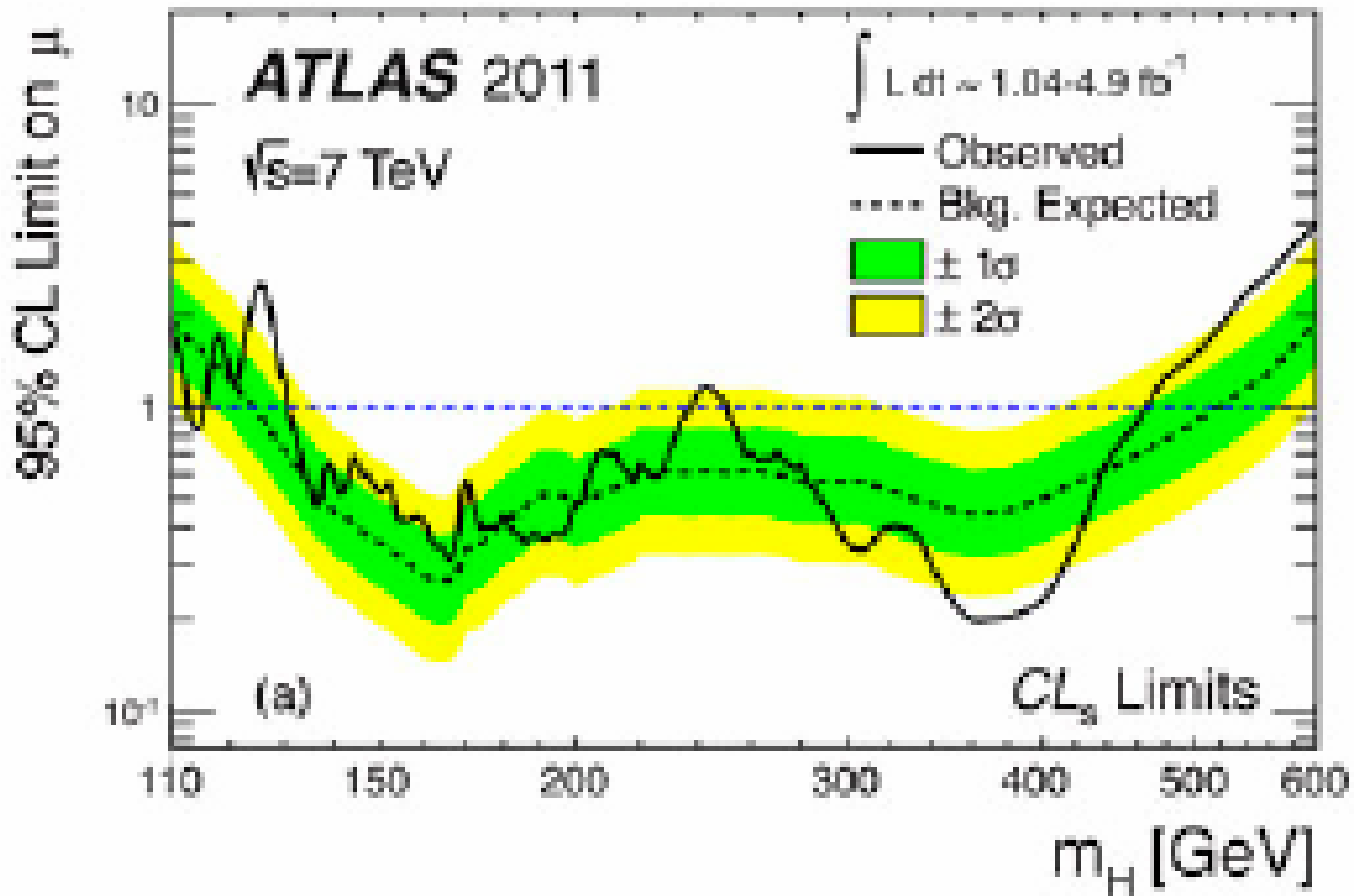
16 teilnehmende Staaten, 3000 Wissenschaftler
aus 40 Ländern, Fertigstellung 2017.
Grundlagenforschung mit Antiprotonen und
Schweren Ionen

Zusammenfassung

- Antimaterie ist nicht so exotisch wie man oft denkt
- Antimaterie lässt sich in mikroskopischen Dosen heute routinemässig erzeugen
- Positronen sind nützlich in der Medizin
- Antimaterie ist von grossem Nutzen in Studien von Teilchenreaktionen und der dabei erwarteten neuen Phänomene

Reserve





Explanatory Figures for the Higgs Boson Exclusion Plots

Explanatory figure (not actual data)

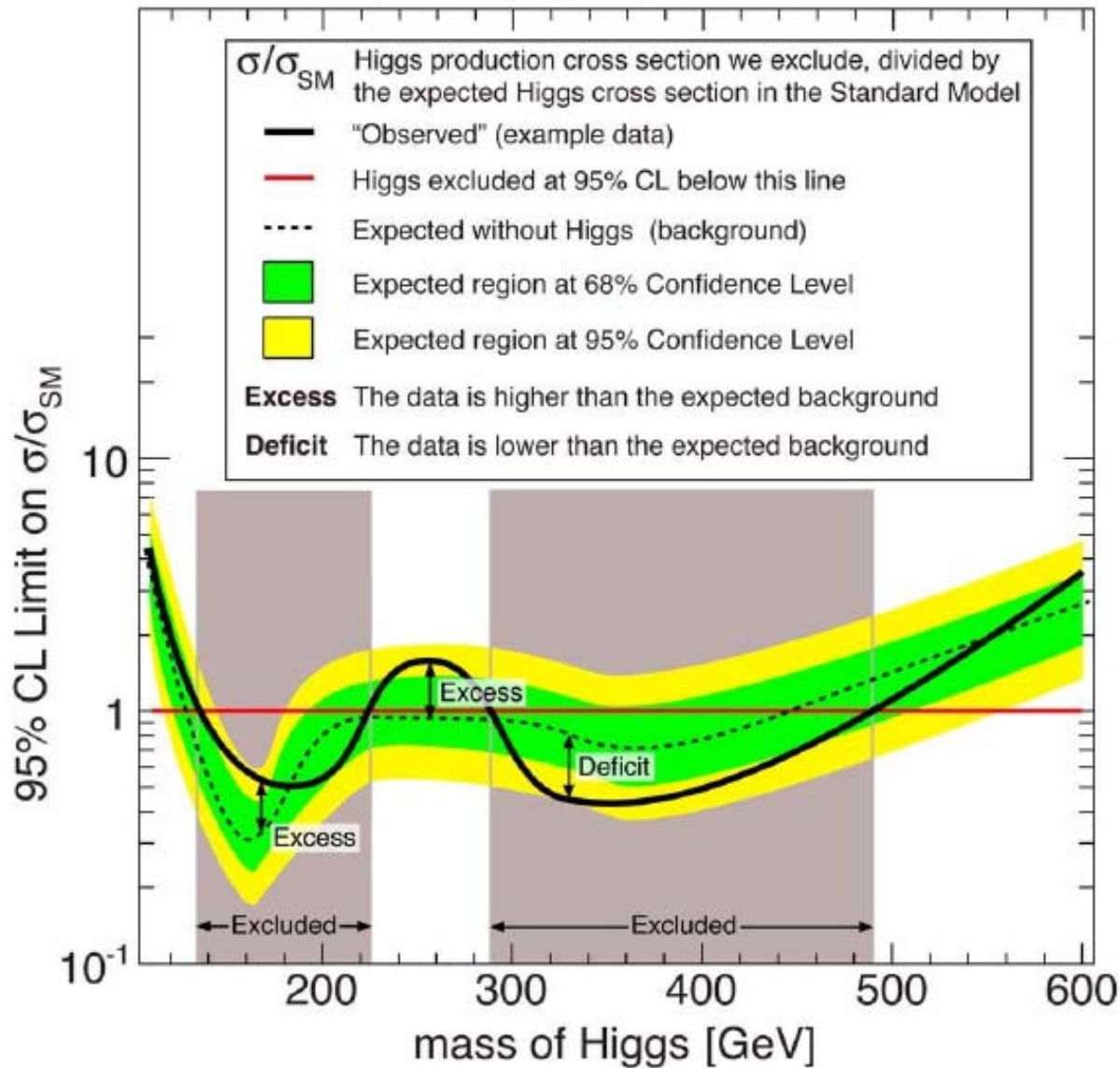
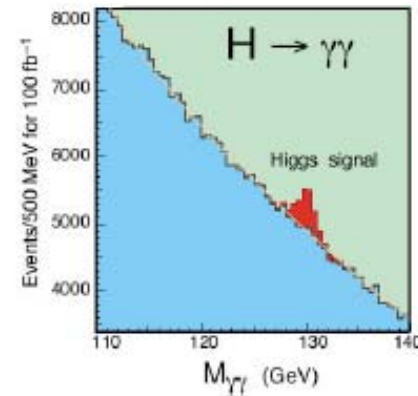
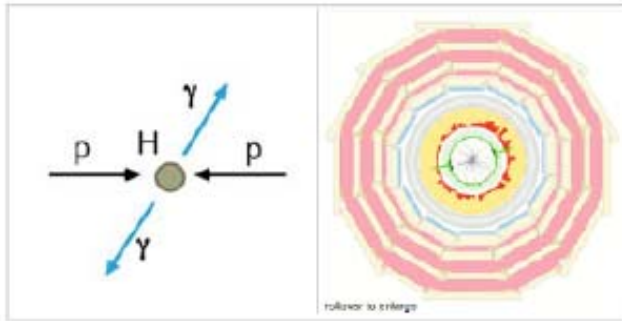


Figure A

VI. Gesuchte Ereignisse (Simulationen)

Suche nach Higgs-Teilchen:

$$m_{\text{Higgs}} < 140 \text{ GeV}/c^2 \quad : \quad H \rightarrow \gamma\gamma$$



$$150 \leq m_{\text{Higgs}} \leq 180 \text{ GeV}/c^2$$

$$140 \leq m_{\text{Higgs}} \leq 180 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_{\text{Higgs}} > 500 \text{ GeV}/c^2$$

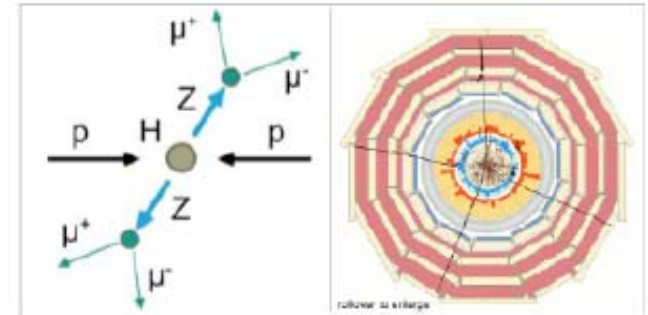
$$: \quad H \rightarrow W^+W^-$$

$$: \quad H \rightarrow ZZ$$

$$\hookrightarrow \hookrightarrow \ell^+\ell^-$$

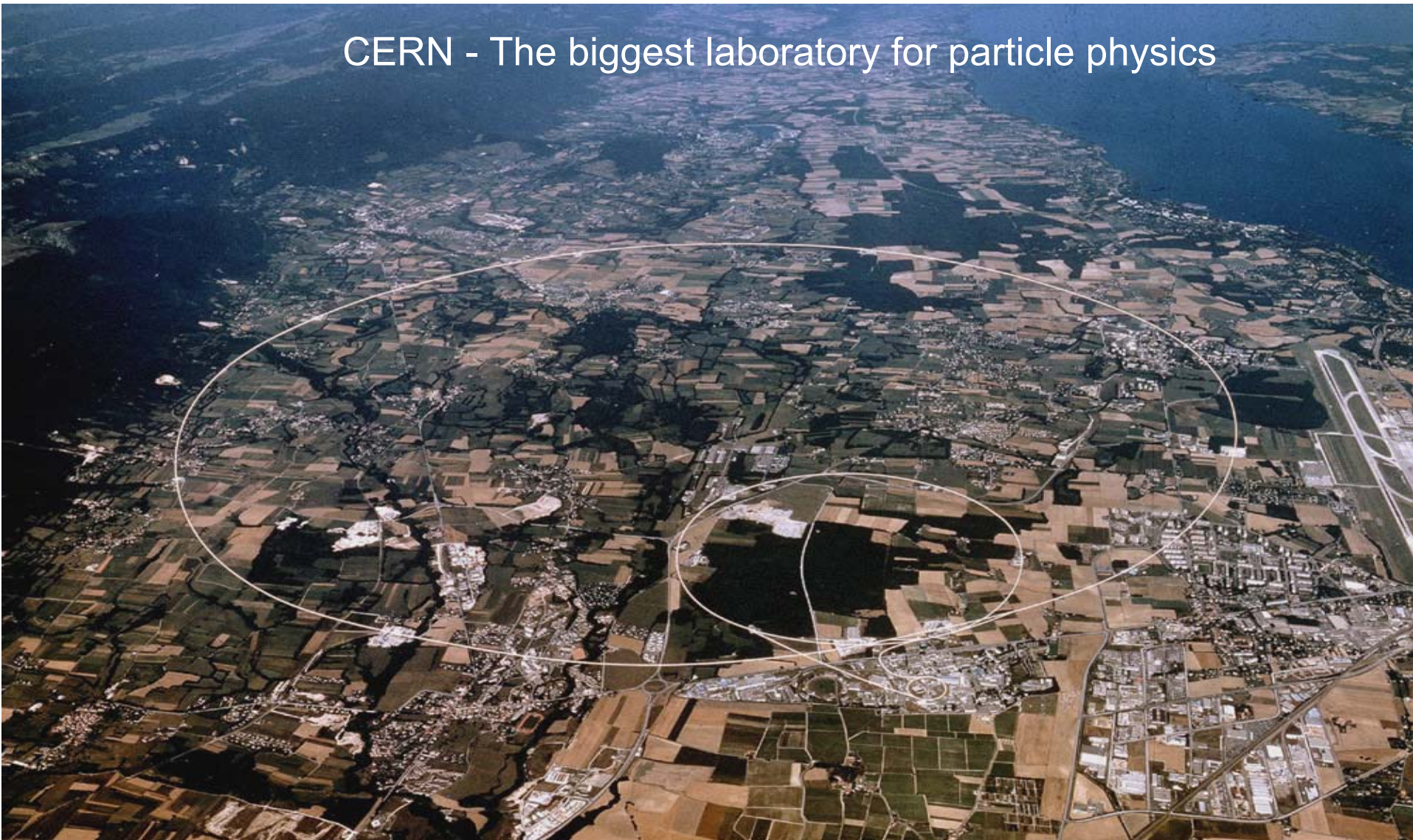
$$: \quad H \rightarrow Z + Z$$

$$\hookrightarrow \ell^+\ell^- \quad \hookrightarrow q\bar{q}$$



Präzisionsuntersuchungen an W/Z-Bosonen

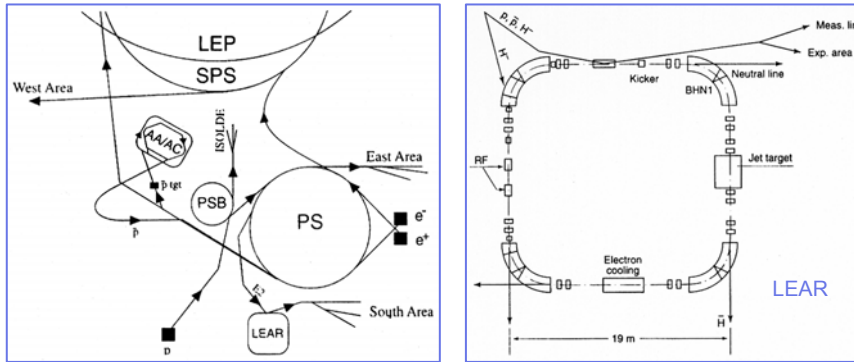
CERN - The biggest laboratory for particle physics



Produktion of Antiprotonen heute

➤ SPSC/LEAR @ CERN

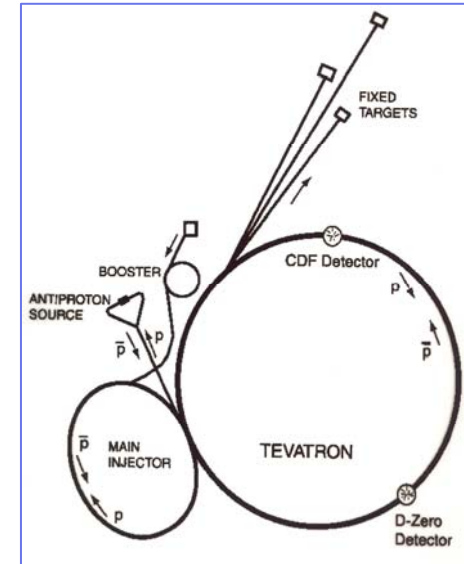
1981-1996



➤ Fermilab (Antiproton Source) / ISR @ CERN

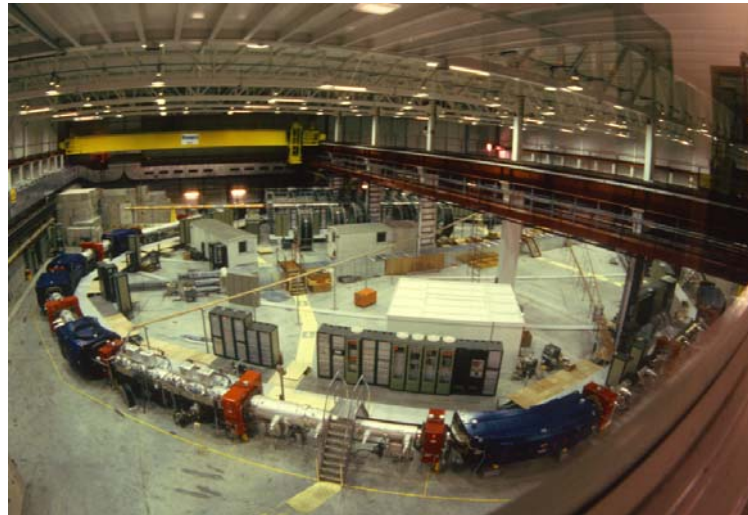
1986-2011

1981/83



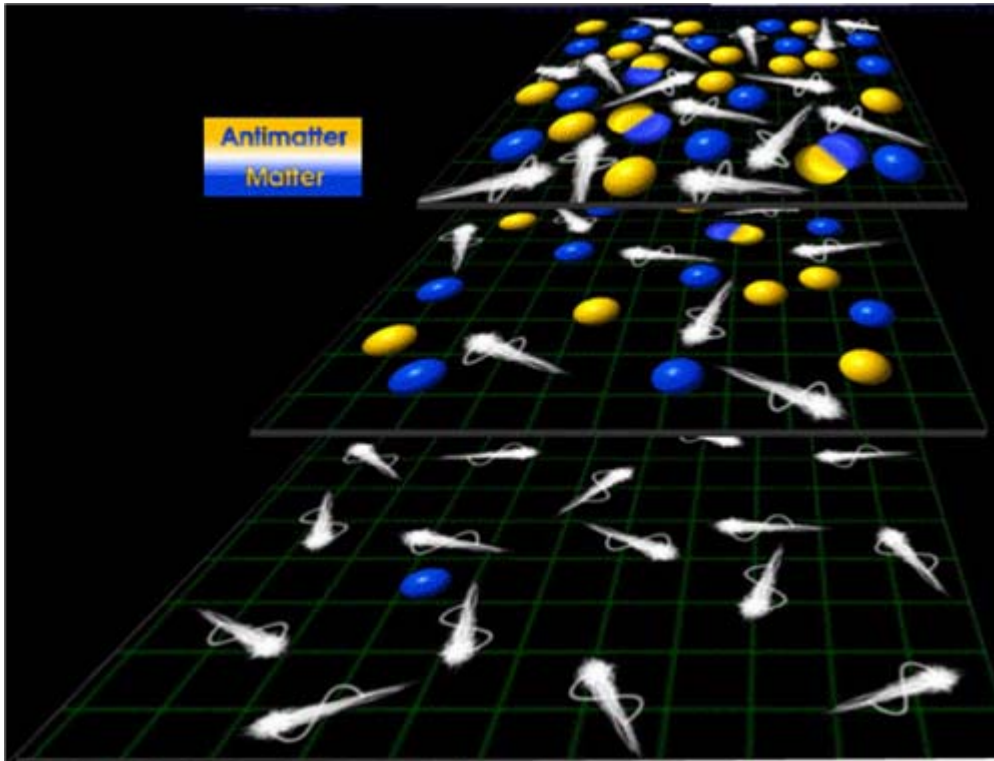
➤ AD @ CERN

2001-today



Antimaterie im Kosmos/in der Natur

Mysterium der Antimaterie



Urknall: Energie verwandelt sich in Masse

< 1 μ s: Materie = Antimaterie

Annihilation

1 s : Alle Antimaterie verschwunden

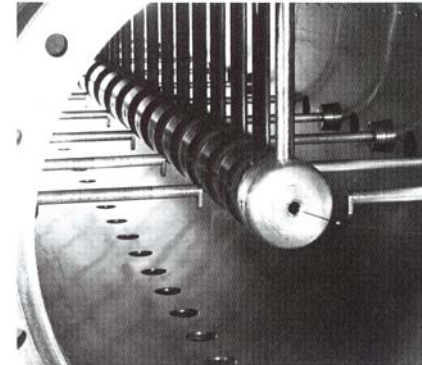
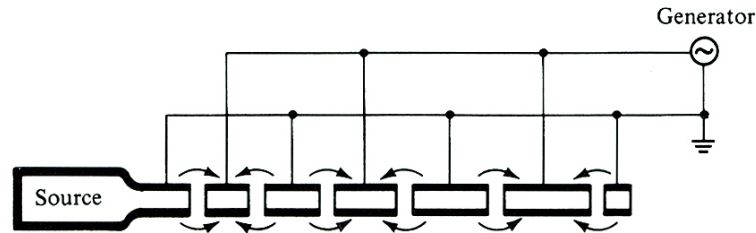
**Einige Materieteilchen übrig (Sterne/Planeten/Wir)
+ Viele Lichtteilchen**

Kosmos gefüllt mit Licht (Kosmischer Mikrowellen Hintergrund)

Erzeugung/Speicherung von Antimaterie

Beschleuniger

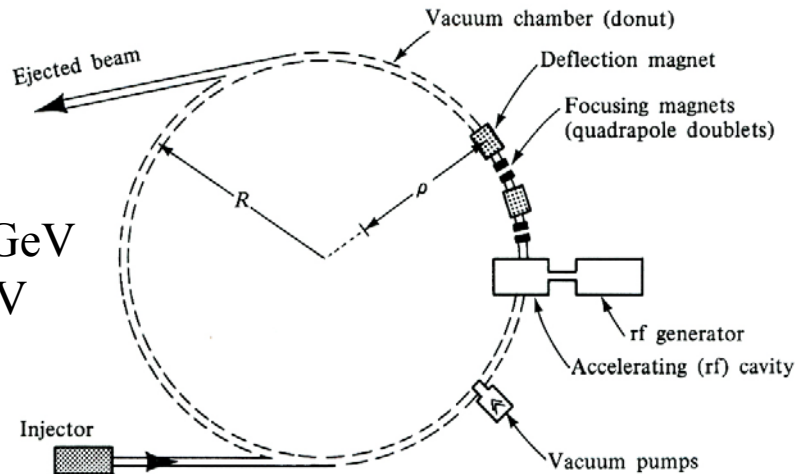
Linearbeschleuniger



SLAC: 2 miles accelerator : e^+ , e^- bis 40 GeV

Synchrotronbeschleuniger

Fermilab/Chicago : p , \bar{p} bis 1000 GeV
CERN/Genf : p bis 7000 GeV



Experimente mit festem Target

Experimente im Kollisions-Mode

Erzeugung/Speicherung von Antimaterie

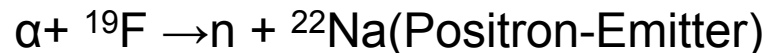
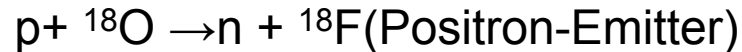
Beschleuniger

Prinzip: Verwandlung von Energie in Masse ($E=mc^2$)

Kleine Beschleuniger (Kernphysik): Elektronen, Protonen, ...

$E_{\text{Max}} \approx 30 \text{ MeV} = 30 \text{ Millionen eV}$

Umwandlung von Atomkernen, z.B.:



(Manchmal werden auch Neutronen aus
Reaktoren zur Kernumwandlung benutzt)



Kompaktzyklotron

Erzeugung/Speicherung von Antimaterie

Beschleuniger

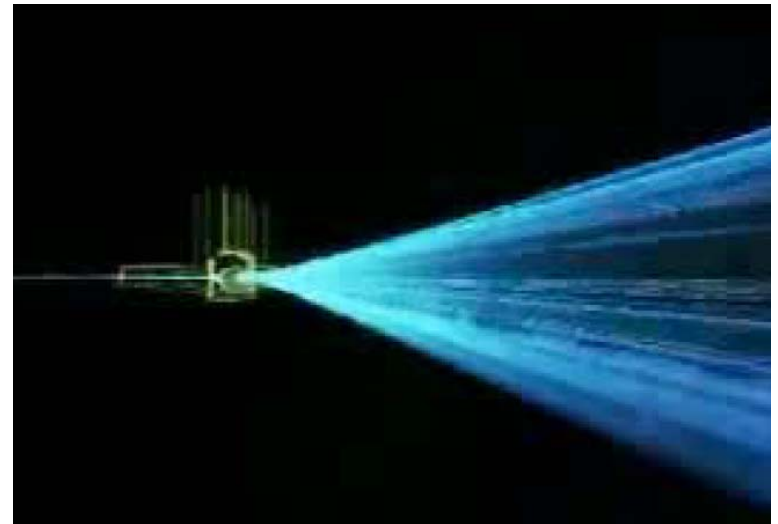
Grosse Beschleuniger(Teilchen/Hadronenphysik):
Elektronen,Protonen,Antiprotonen,Schwere Ionen,

$$E_{\text{Max}} \approx 7 \times \text{TeV} = 7 \times \text{Million} \times \text{Million eV}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow J/\Psi \text{ (Schweres Teilchen)}$$

$$p + p \rightarrow \text{Higgs(Schweres Teilchen)+....}$$

$$p + p \rightarrow p + p + p + \text{anti-p}$$



Erzeugung/Speicherung von Antimaterie

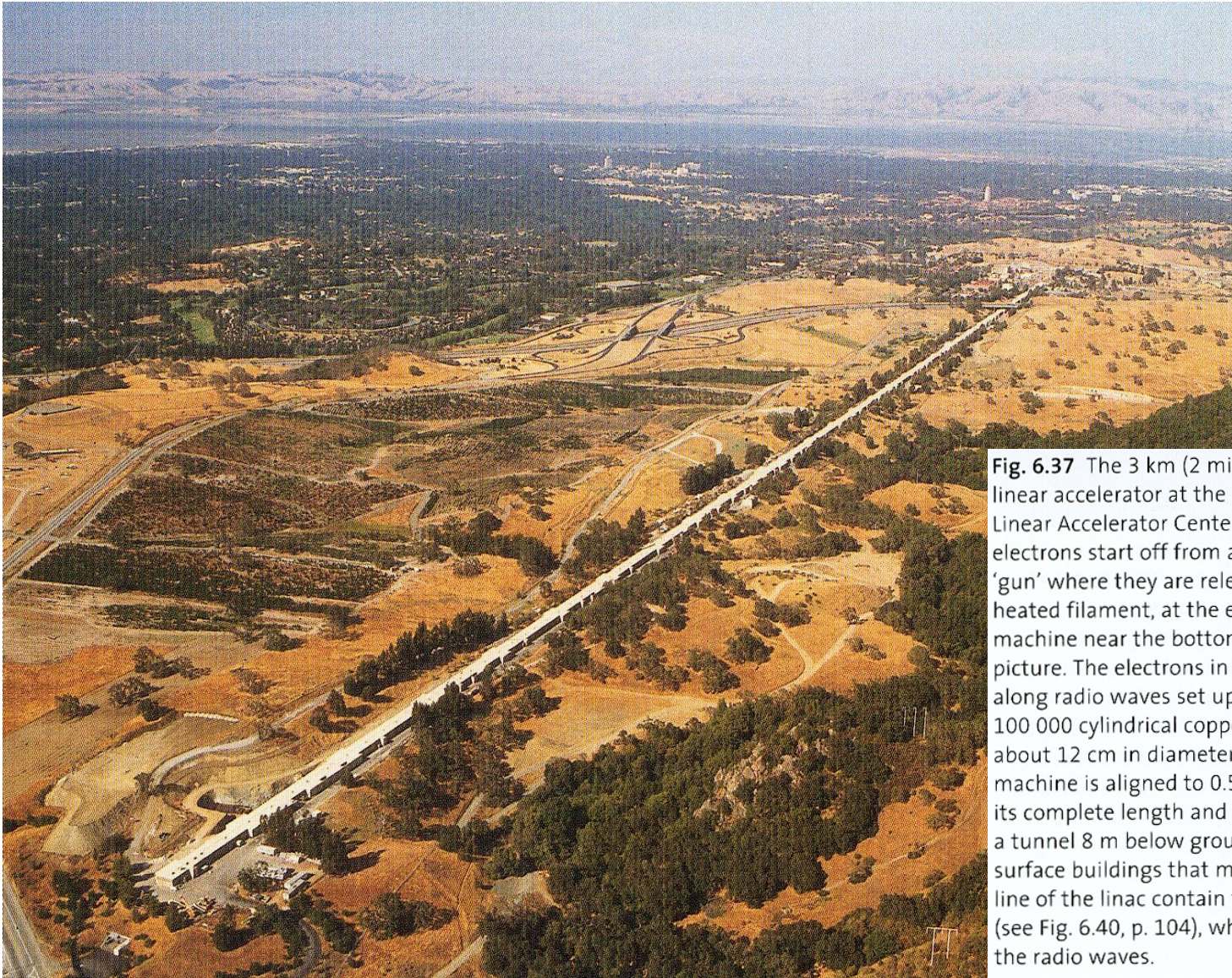


Fig. 6.37 The 3 km (2 mile) long linear accelerator at the Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). The electrons start off from an electron 'gun' where they are released from a heated filament, at the end of the machine near the bottom left of the picture. The electrons in effect surf along radio waves set up in a chain of 100 000 cylindrical copper 'cavities', about 12 cm in diameter. The machine is aligned to 0.5 mm along its complete length and is situated in a tunnel 8 m below ground. The surface buildings that mark out the line of the linac contain the klystrons (see Fig. 6.40, p. 104), which provide the radio waves.

Erzeugung/Speicherung von Antimaterie

Abbremsen und Speichern von Antiprotonen

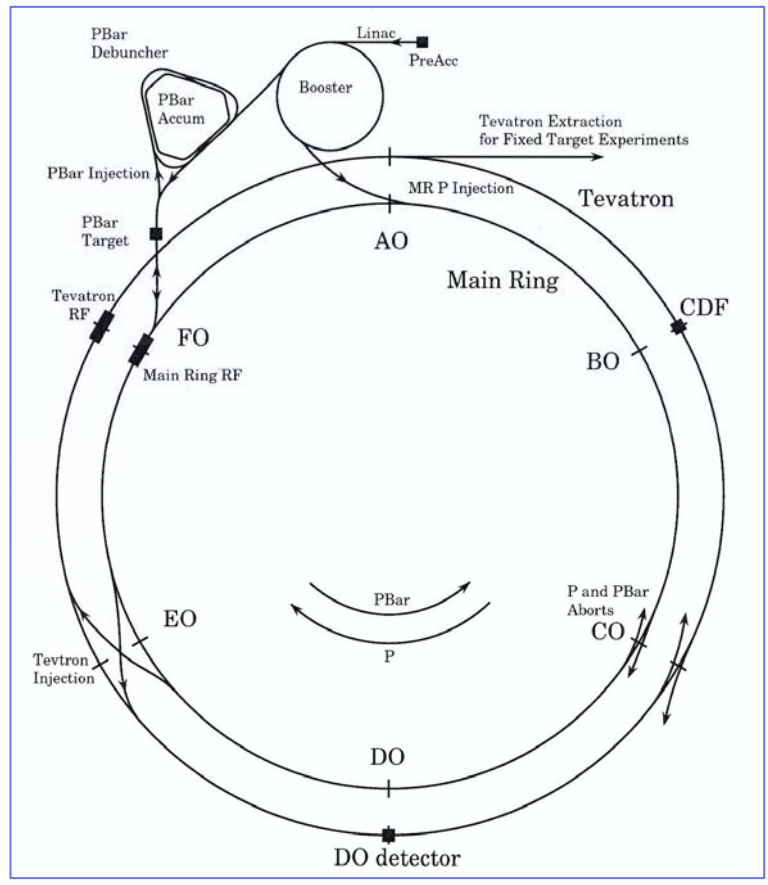
Antiproton Decelerator am CERN(AD)



Produziert 100.000.000 Antiprotonen/min

Bremst die Antiprotonen ab auf 10% der Lichtgeschwindigkeit

Run 1: pp ($E_{CM} = 1.8 \text{ TeV}$); $L_{Peak} = 2 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$; $\int L dt = 162(\text{pb})^{-1}$
 (1992-96)



Run 2: Main Ring → Main Injector ($L \rightarrow 8 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$); Recycler ($L \rightarrow 2 \times 10^{32}$);
 (2001→) 1.8 TeV → 2.0 TeV

Detector Upgrades: DO: Central magnetic field; Si-Vertex-Det.; Scint. Fiber Tracker

CDF: Expanded Vertex Detector

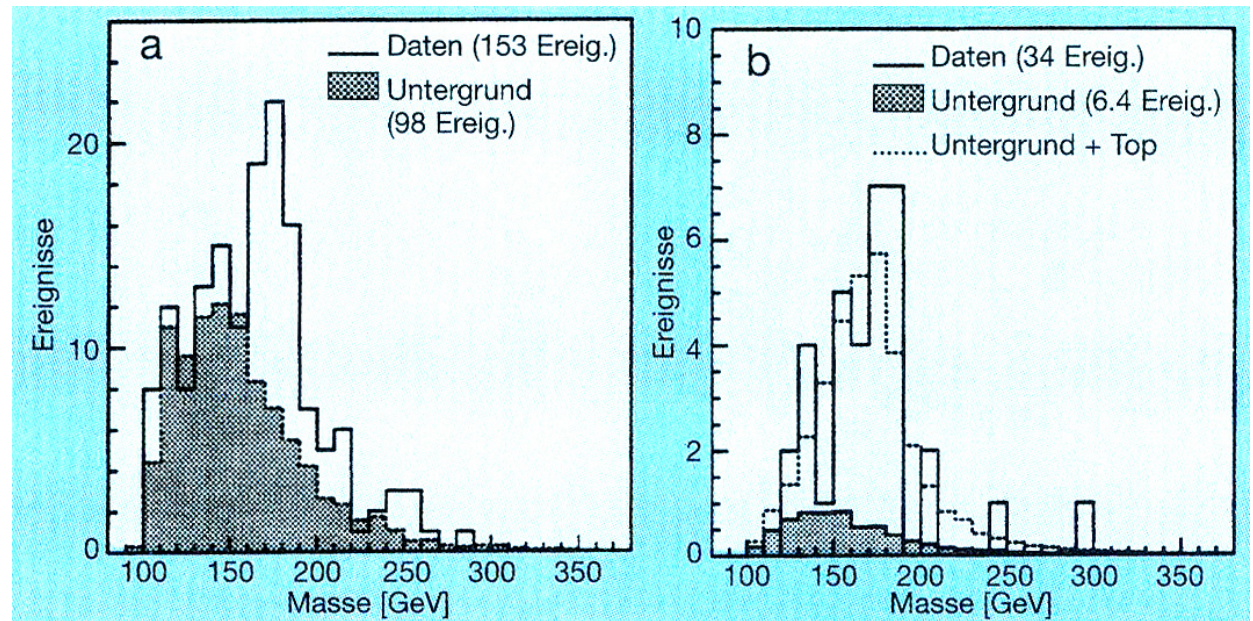
All Jet-Channels

b-Jet; b-Jet; 2q-Jets; 2q-Jets

Cuts as above + highly sophisticated topologies

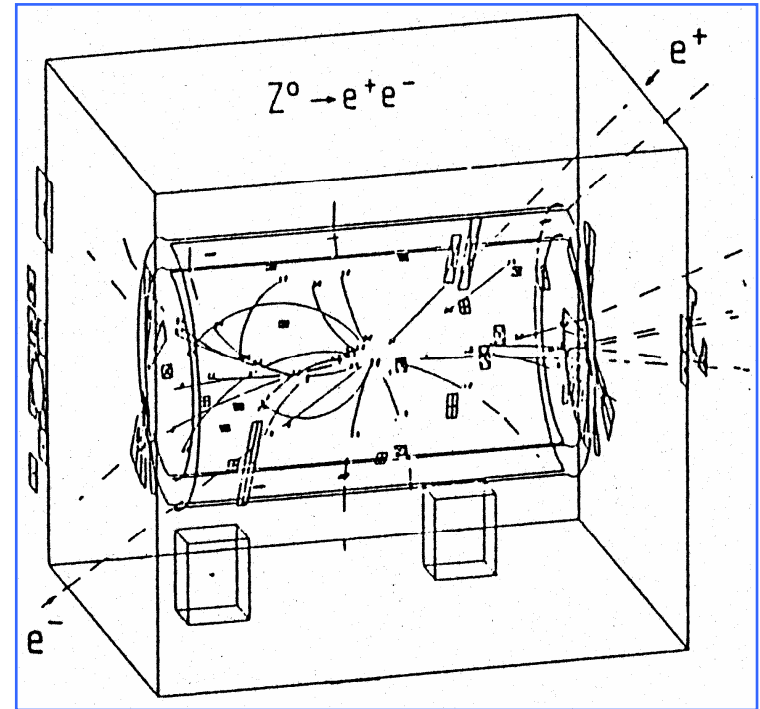
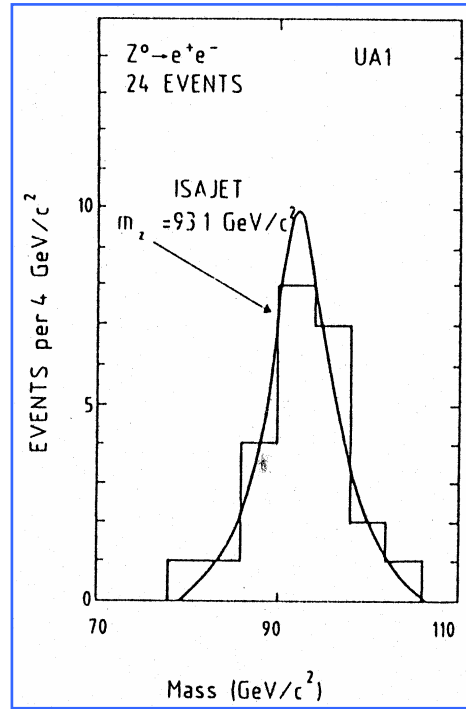
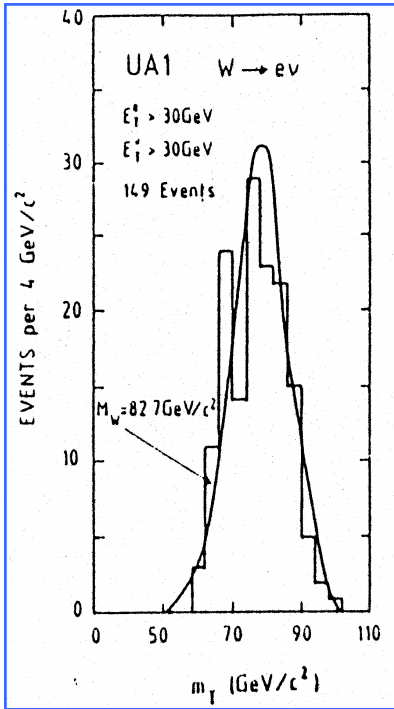
Observed events	Est. Background
187 (DVT)	142 ± 12
157 (SLT)	120 ± 18

Resulting Spectra (CDF)



No *b*-Tag

b-Tag



$$m_{W^\pm} = (80.2 \pm 0.6 \pm 0.5 \pm 1.3) \text{ GeV}/c^2 \text{ (UA1)}$$

$$(82.7 \pm 1.0 \pm 2.7) \text{ GeV}/c^2 \text{ (UA2)}$$

$$m_{Z^0} = (93.1 \pm 1.0 \pm 3.1) \text{ GeV}/c^2 \text{ (UA1)}$$

$$(91.4 \pm 1.2 \pm 1.7) \text{ GeV}/c^2 \text{ (UA2)}$$

$$\Gamma_W \leq 5.4 \text{ GeV}/c^2 ; J_P(W) = 1^-$$

$$\Gamma_{Z^0} = (2.7^{+1.2}_{-1.0} \pm 1.3) \text{ GeV}/c^2 \text{ (UA1)}$$

$$(2.7 \pm 2.0 \pm 1.0) \text{ GeV}/c^2 \text{ (UA2)}$$

In the meantime: More data from from FNAL and LEP

$$\rightarrow m_{W^\pm} = (80.423 \pm 0.039) \text{ GeV}/c^2 ; \Gamma_{W^\pm}$$

$$= (2.118 \pm 0.042) \text{ GeV}/c^2$$

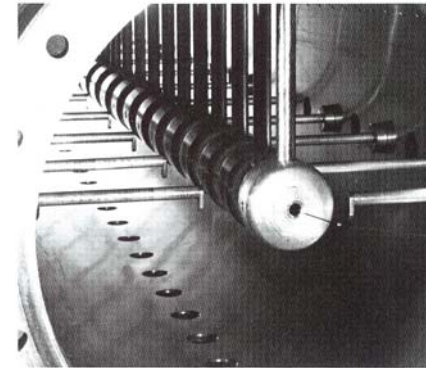
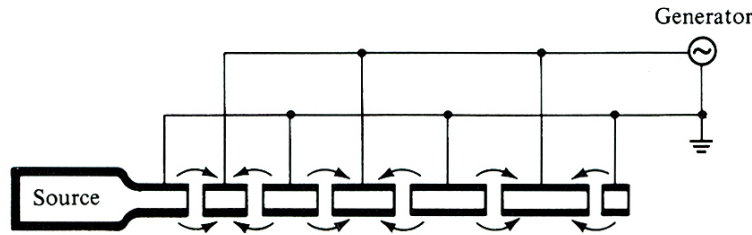
12.06.2012

H.Koch, EvKiGe Enkirch

$$m_{Z^0} = (91.1876 \pm 0.0021) \text{ GeV}/c^2 ; \Gamma_{Z^0}$$

Beschleunigung von Elementarteilchen

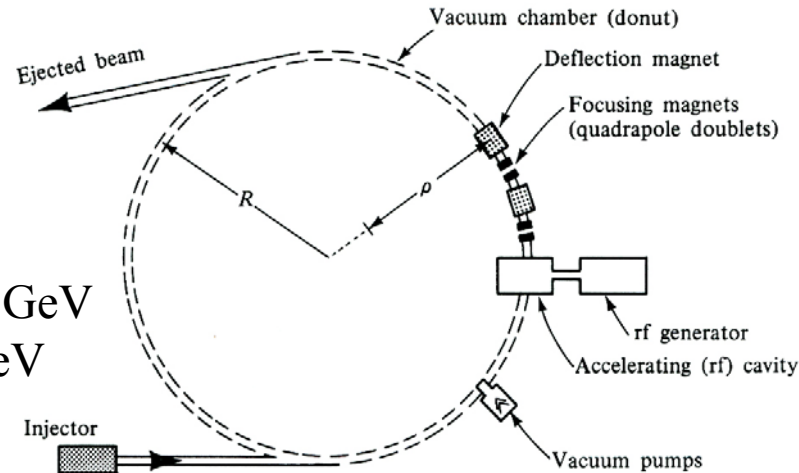
Linearbeschleuniger



SLAC: 2 miles accelerator : e^+ , e^- bis 40 GeV

Synchrotronbeschleuniger

Fermilab/Chicago : p , \bar{p} bis 1000 GeV
 CERN/Genf : p bis 7000 GeV



Experimente mit festem Target

Hohe Reaktionsraten

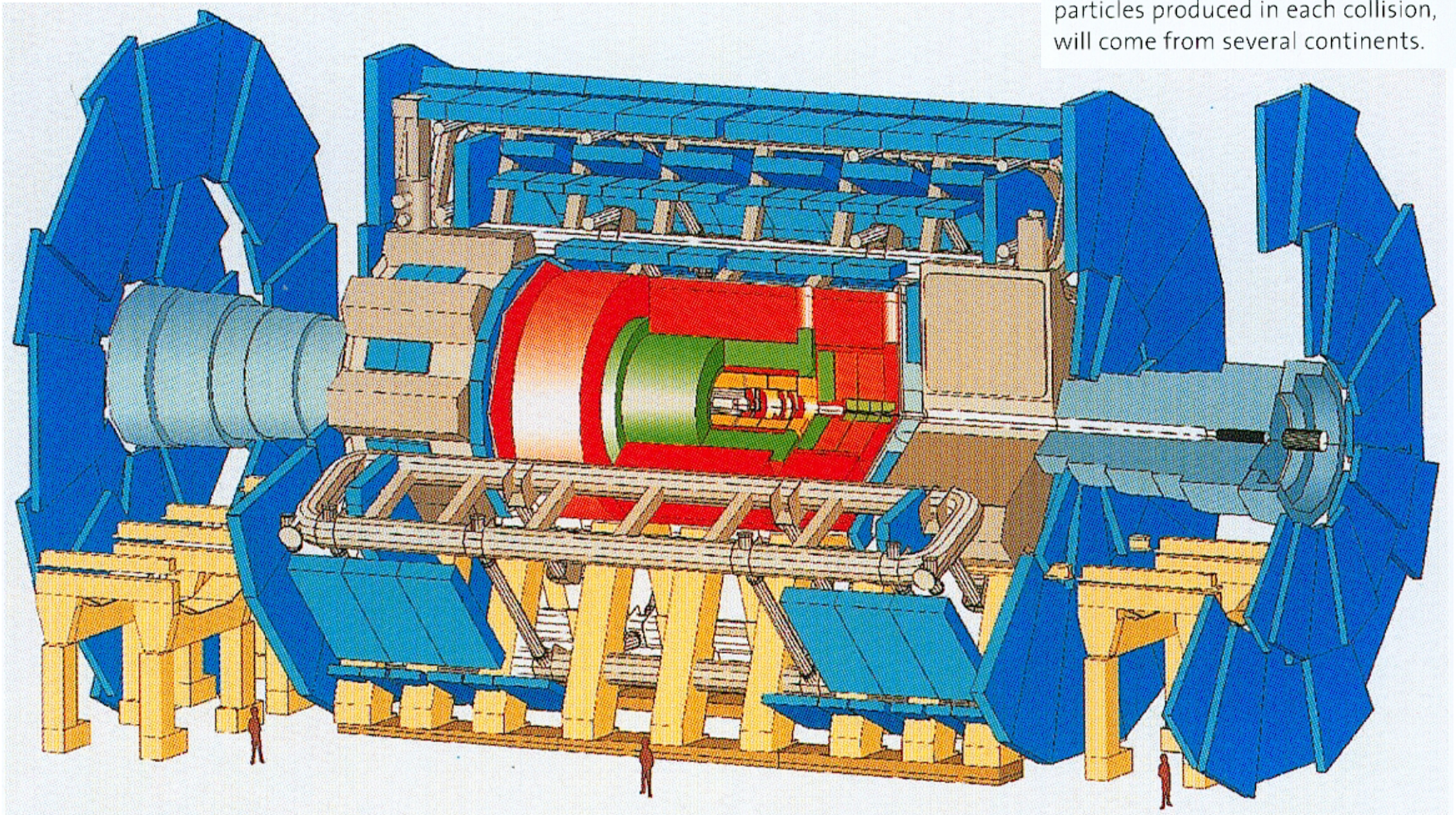
Kleine Schwerpunktsenergien

Experimente im Kollisions-Mode

Kleine Reaktionsraten

Große Schwerpunktsenergien

Fig. 11.3 A cut-away diagram of the ATLAS detector being constructed to record proton–proton collisions in the LHC at CERN. The mammoth detector will have an overall diameter of 22 m – the height of a five-storey building – and will weigh 7000 tonnes. Its various component layers, designed to provide as much information as possible to identify the hundreds of particles produced in each collision, will come from several continents.



November-Revolution: Entdeckung des J/ψ (Nov. 1974)

Vorher: Heisenberg: Ende der Teilchenphysik

Nachher: Entdeckung der schweren Quarks

↳ Vielzahl neuer Erkenntnisse (Standard-Modell, CP-Verletzung, ...)

Gleichzeitige Entdeckung in Brookhaven/Long Island und SLAC/Stanford

Brookhaven (S. Ting et al.) : $p + Be \rightarrow \mu^+ \mu^- + X$

J-Teilchen }
 ψ -Teilchen } $\rightarrow J/\psi$

SLAC (B. Richter et al.) : $e^+ e^- \rightarrow \psi$

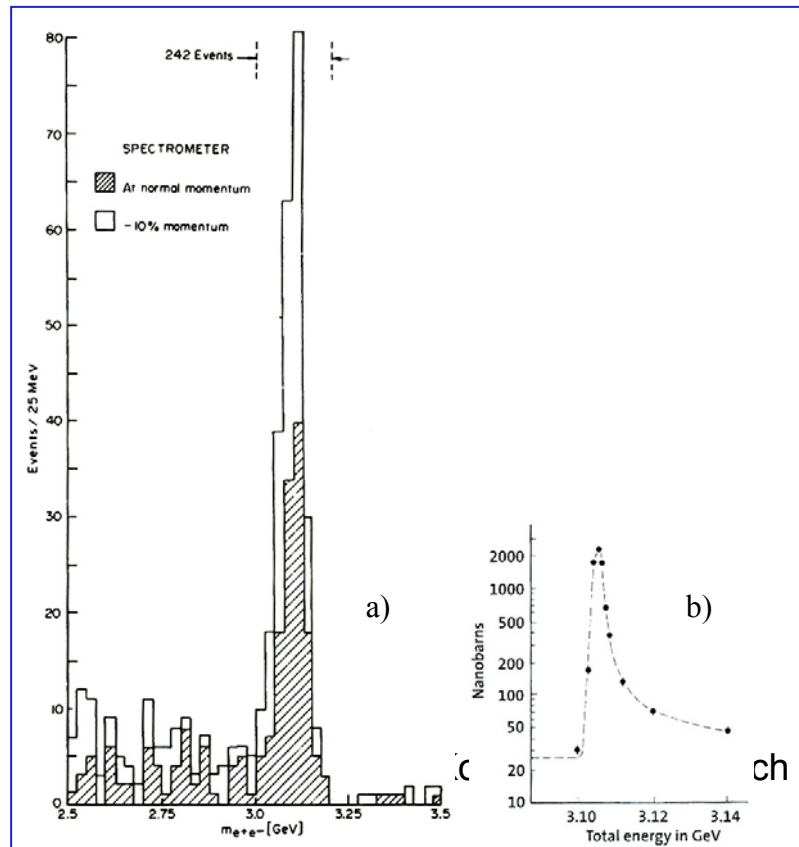
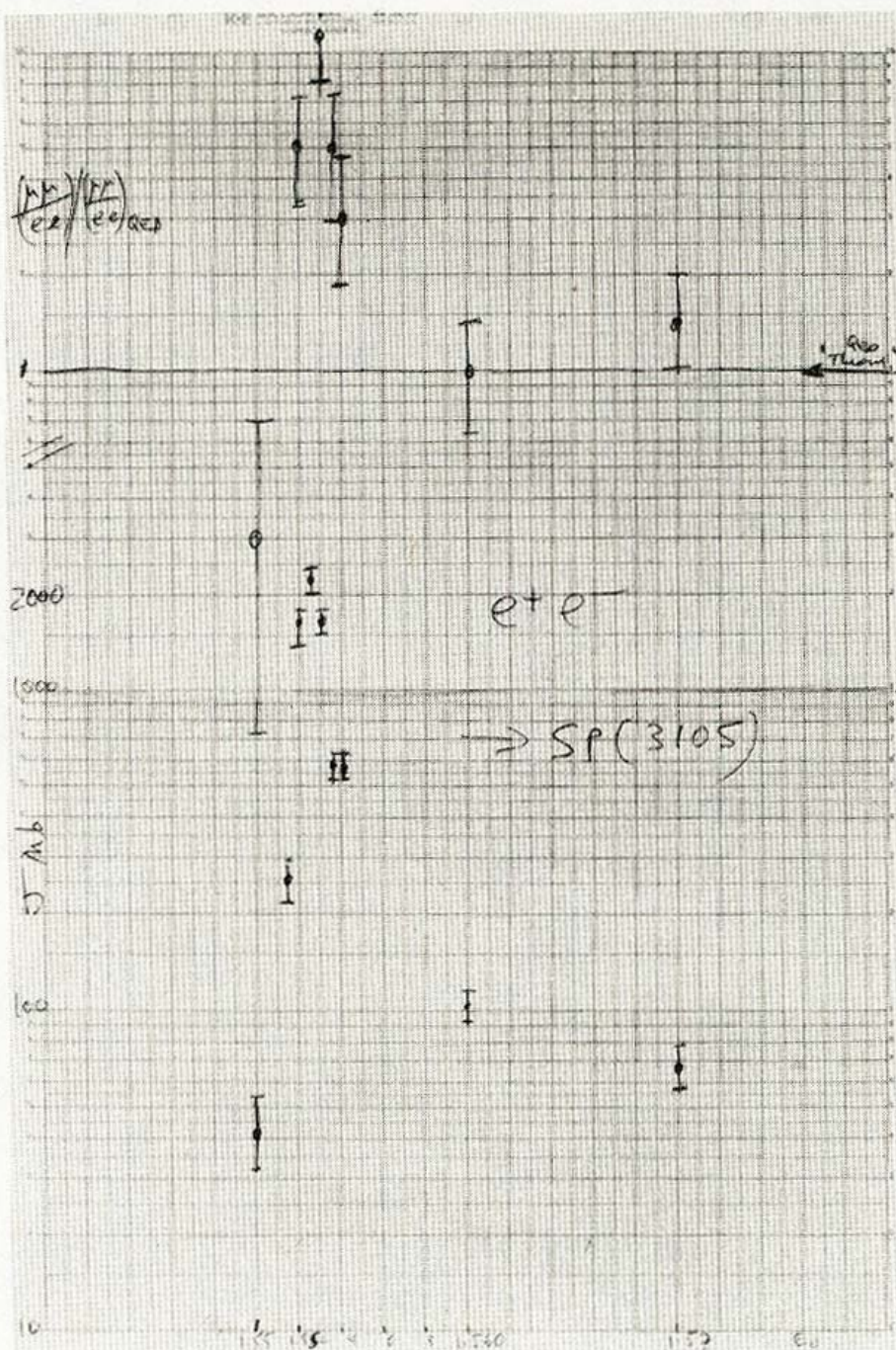


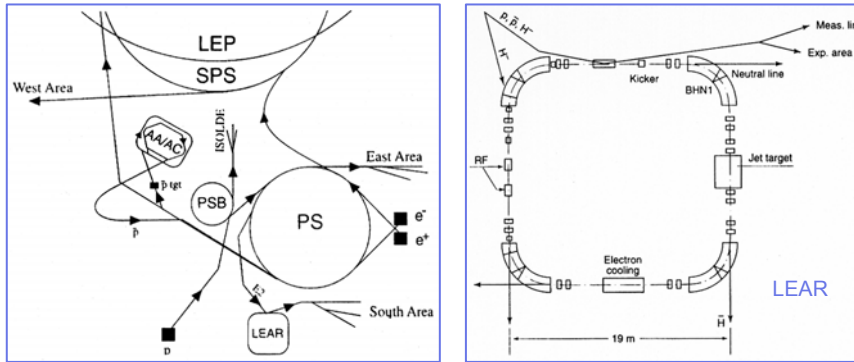
Fig. 6.

Semilog plot of the cross section for $e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$; the ψ (3100) stands out clearly. The radiative tail can also be seen extending to the high-energy side. At the top of the figure is the experimental muon pair to electron pair ratio compared to the same ratio calculated from quantum electrodynamics. This shows the rise in the muon pair cross section at the ψ (3100). [From SLAC-LBL logbook sketch by Gerson Goldhaber, November 10, 1974.]



➤ **SPSC/LEAR @ CERN**

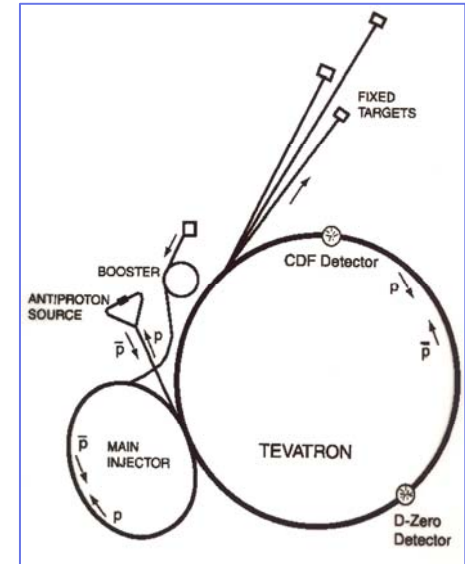
1981-1996



➤ **Fermilab (Antiproton Source) / ISR @ CERN**

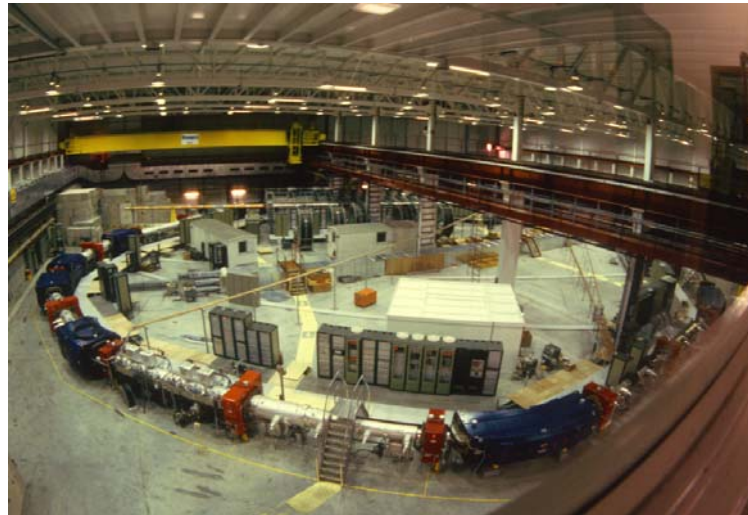
1986-2002

1981/83



➤ **AD @ CERN**

2001-today



12.06.2012

H. Koch, EvKiGe Enkirch
 Only low energy antiprotons; Pulsed beam (low d.c.)

Dirac-Gleichung

Dirac-Gleichung = Relativistisches Analogon zur Schrödinger-Gleichung

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = c \left(\frac{\hbar}{i} \boldsymbol{\alpha} \cdot \nabla + \beta \mu c \right) \psi(\mathbf{r}, t)$$
$$\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ \vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix}, \text{ z.B. } \alpha_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$
$$\beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Lösungen der Dirac-Gleichung:

$$\psi^{(+)}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(2\pi\hbar)^{3/2}} \int [u^{(R)}(\mathbf{p})a_R(\mathbf{p}) + u^{(L)}(\mathbf{p})a_L(\mathbf{p})] e^{(i/\hbar)(\mathbf{p}\cdot\mathbf{r} - E_p t)} d^3 p$$

$$\psi^{(-)}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(2\pi\hbar)^{3/2}} \int [v^{(R)}(\mathbf{p})b_R^\dagger(-\mathbf{p}) + v^{(L)}(\mathbf{p})b_L^\dagger(-\mathbf{p})] e^{(i/\hbar)(\mathbf{p}\cdot\mathbf{r} + E_p t)} d^3 p$$

Tab. 1.1 Die Bausteine der Materie

Teilchen		Spin	Ladung (in Einheiten der Elementarladung)	Masse *) MeV/c ²	Art der Wechselwirkung		
					stark	elektromagnetisch	schwach
d-Quark	(down)	1/2	-1/3	<100	ja	ja	ja
u-Quark	(up)	1/2	2/3	<100	ja	ja	ja
s-Quark	(seltsam)	1/2	-1/3	~400	ja	ja	ja
c-Quark	(charm)	1/2	2/3	~1500	ja	ja	ja
b-Quark	(bottom)	1/2	-1/3	~5000	ja	ja	ja
t-Quark	(top)	1/2	2/3	~174300			
Elektron-Neutrino	ν_e	1/2	0	<17 eV/c ²	nein	nein	ja
Elektron	e^-	1/2	-1	0.511	nein	ja	ja
Myon-Neutrino	ν_μ	1/2	0	<0.25	nein	nein	ja
Myon	μ^-	1/2	-1	105.66	nein	ja	ja
τ -Neutrino	ν_τ	1/2	0	<35	nein	nein	ja
τ -Lepton	τ^-	1/2	-1	1784	nein	ja	ja

*) Da die Quarks nicht als freie Teilchen vorkommen, sind ihre Massen nur im Zusammenhang mit Modellvorstellungen angebbbar.

Zusätzlich Boten-Teilchen: Photonen (γ), Intermediäre Bosonen (W^\pm, Z^0), Gluonen (g), Gravitonen

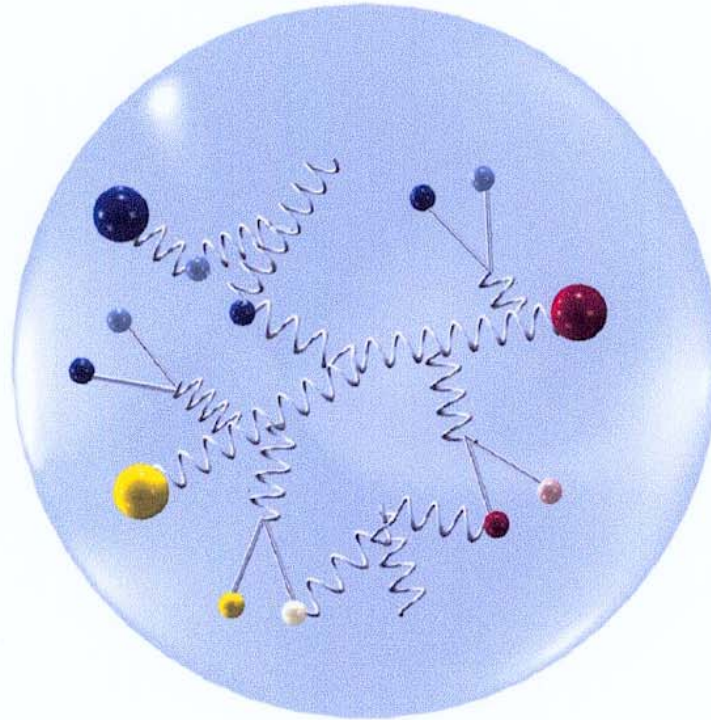


Figure 2.2. Schematic view into the nucleon, illustrating its complex structure. The three valence quarks of the nucleon are held together by exchanging gluons (symbolized by springs) which for tiny moments split into pairs of so called virtual quarks and antiquarks.

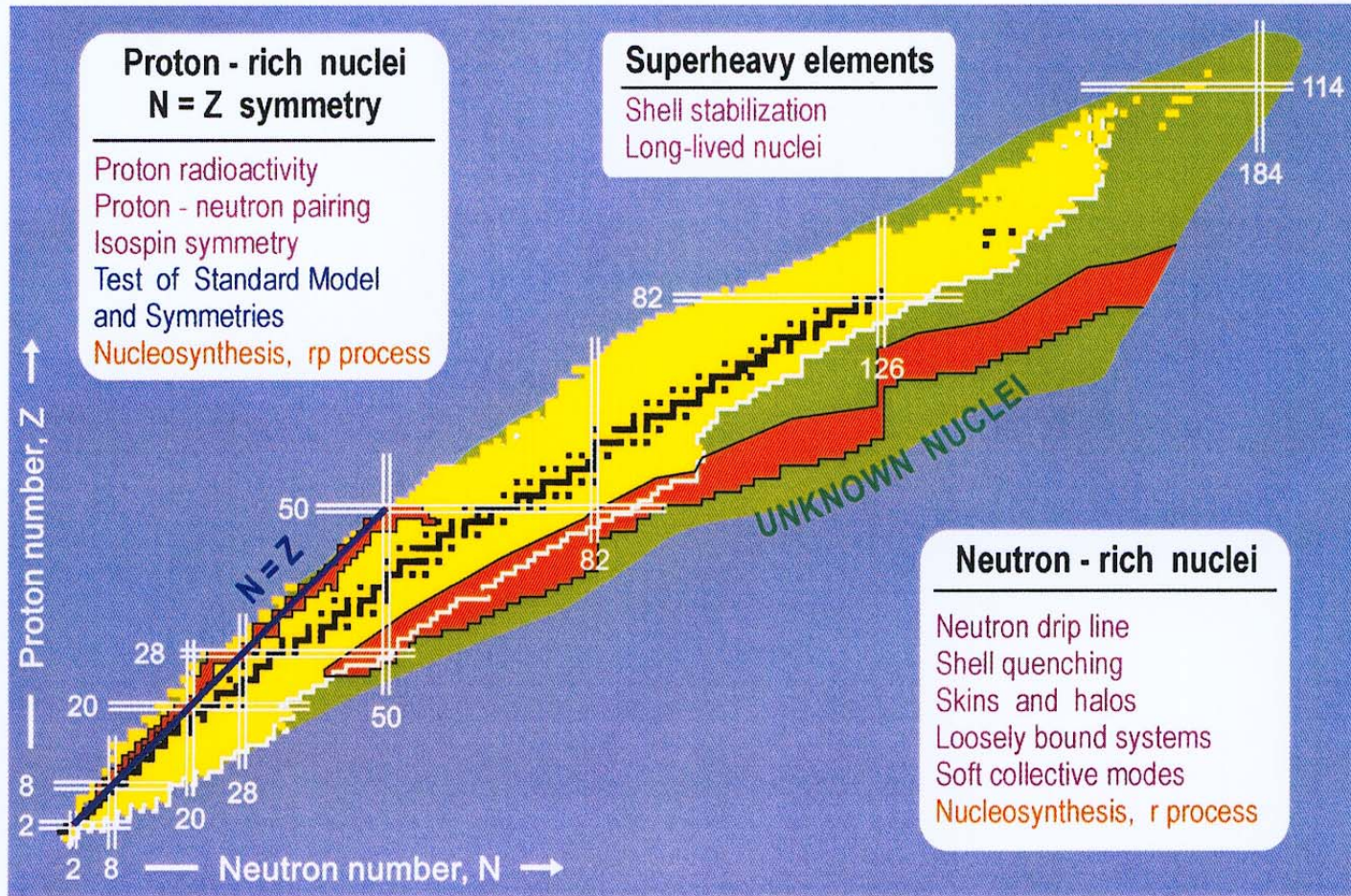


Figure 1.1: Chart of nuclei. Stable nuclei, as found on earth, are marked by black symbols. The yellow area covers unstable nuclei already produced in laboratories. Many more unstable, but bound nuclei may exist, the region of these **exotic nuclei** is given in green. Red areas cover specific stellar nucleosynthesis pathways, the r- and rp-processes. Magic proton and neutron numbers are indicated. The insets itemize some of the key questions to be addressed at next-generation exotic-beam facilities.

Asymmetrie zwischen Materie/Antimaterie im Universum

Experiment (Sichtbares Universum):

$$n_b - n_{\bar{b}} \approx n_b ; n_b/n_\gamma \approx 10^{-10}$$

- ↳ Materie und Antimaterie (nach Big Bang) haben annihiliert, aber:
Ein wenig Materie ist übrig geblieben (**Asymmetrie !**)

Voraussetzungen für Entstehung von Asymmetrie (Sakharov)

- Verletzung der Baryonen-Zahl Erhaltung
- C- und CP- Verletzung
- Abweichung vom thermischen Gleichgewicht

Neuere Messungen (K^0/\bar{K}^0 , B^0/\bar{B}^0 -System)

CP-Verletzung existiert, aber bei weitem zu klein um beobachtete Asymmetrie zu erklären

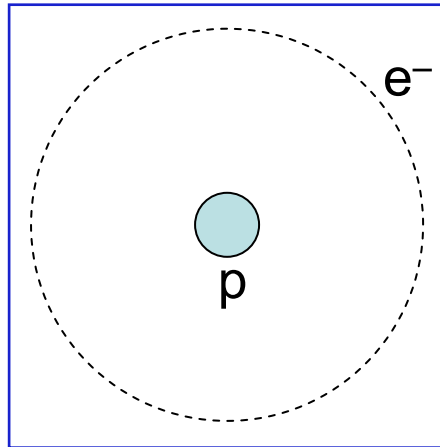
Neuestes Resultat (BaBar/SLAC/Stanford):

BaBar-Daten:

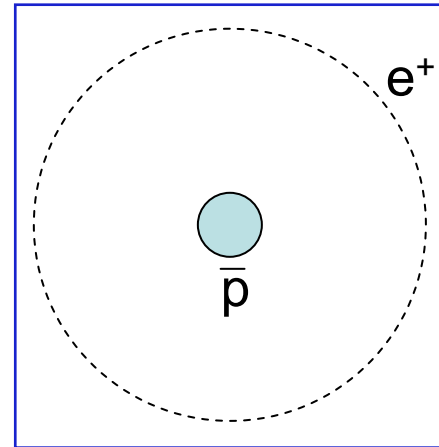
$$\begin{array}{l} B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \quad (u\bar{s} + \bar{u}d) \quad (910) \\ \bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+ \quad (\bar{u}s + ud) \quad (696) \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} B^0 \\ \bar{B}^0 \end{array}} \right\} \text{Zahlen sollten gleich sein bei CP-Erhaltung}$$

Anti-Wasserstoff

H-Atom:



$\bar{\text{H}}$ -Atom:

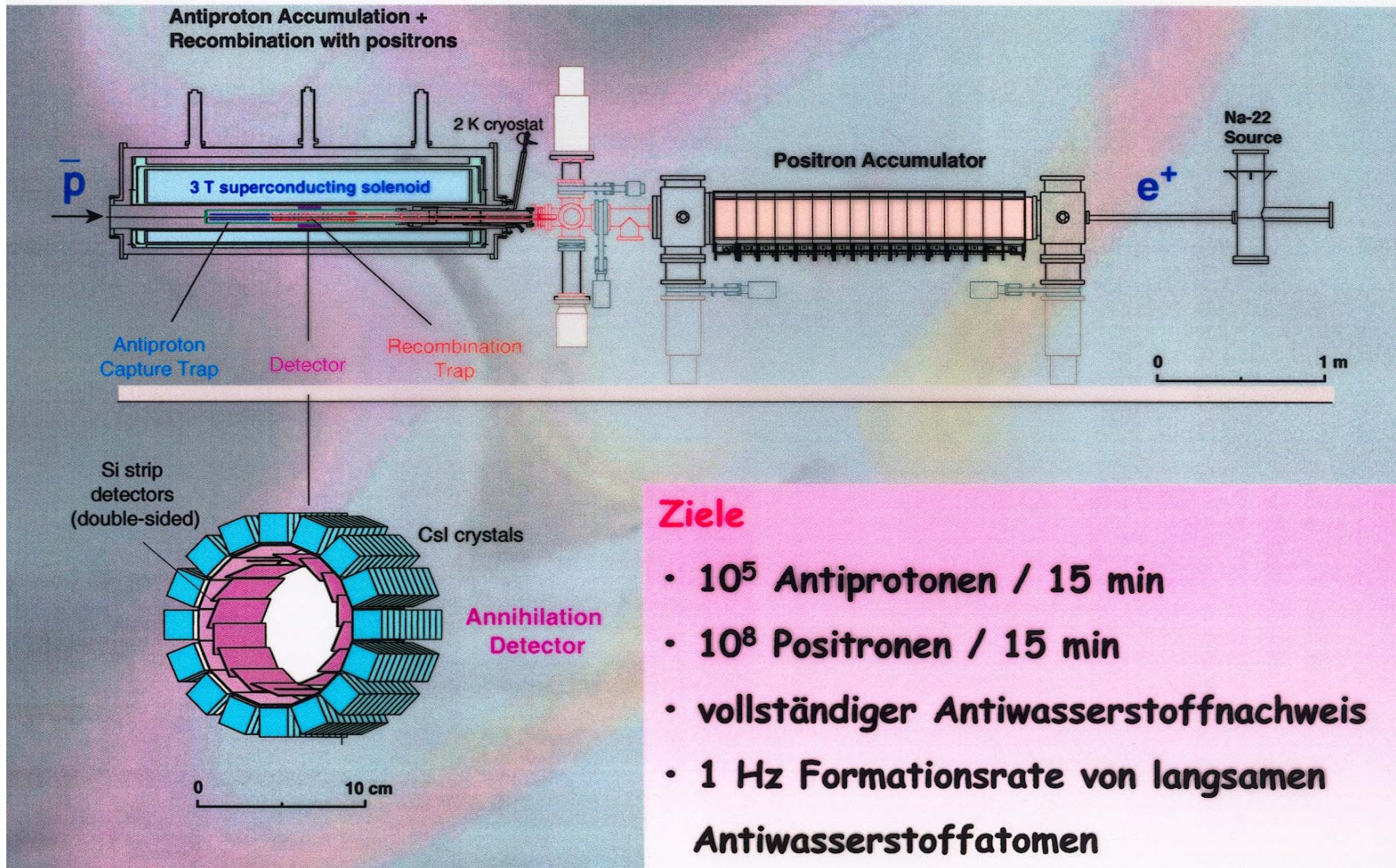


Erstmals bei CERN gefunden
Elektromagnetische Falle

Zukunft: Test der CPT-Symmetrie

ATHENA Apparatur

ATHENA/AD-1: Antiwasserstoff Produktion und Spektroskopie



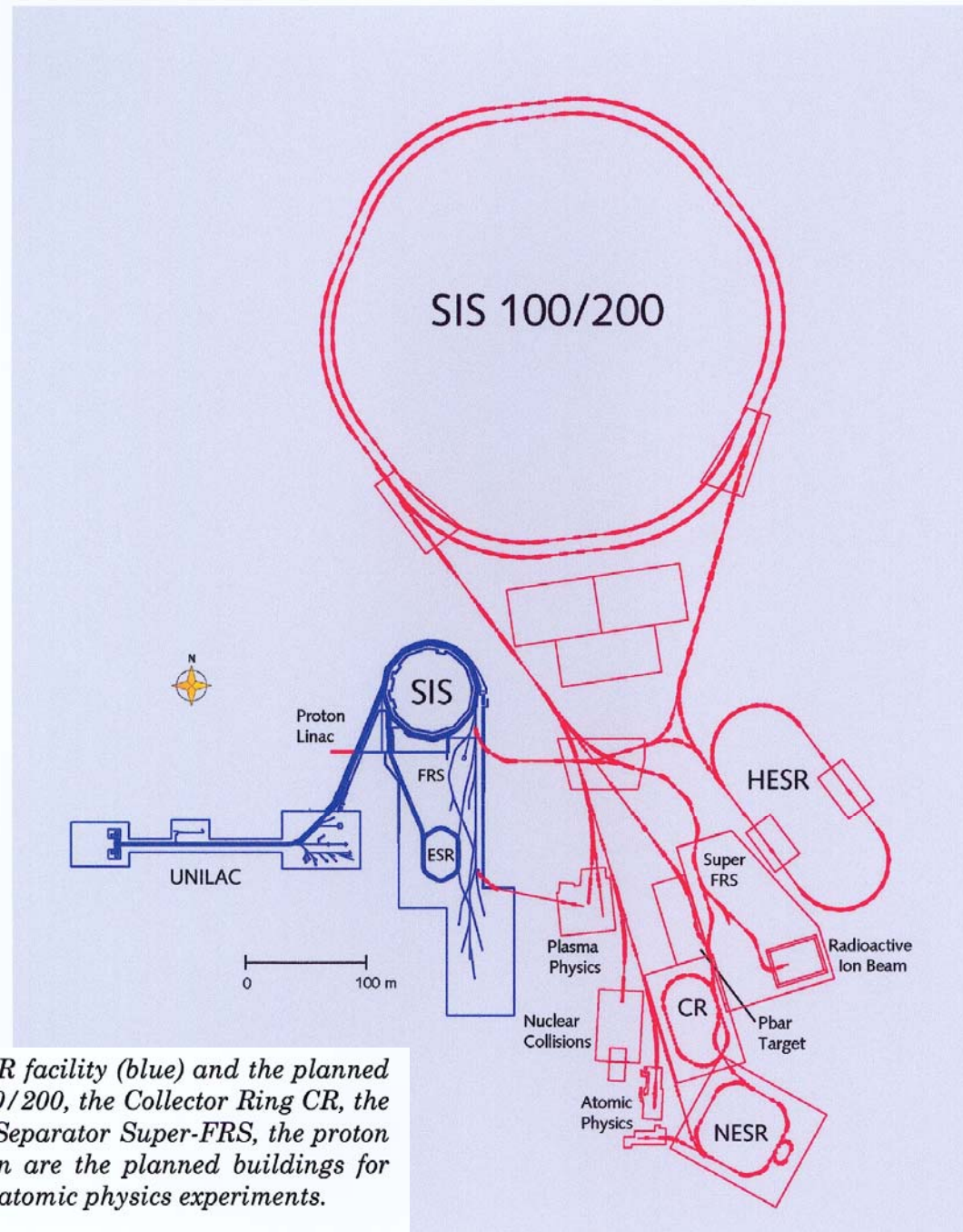
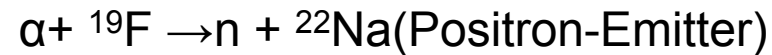


Figure 2.1: Present layout of the existing UNILAC/SIS18/ESR facility (blue) and the planned new facilities (red): the Super-conducting Synchrotrons SIS100/200, the Collector Ring CR, the New Experimental Storage Ring NESR, the Super Fragment Separator Super-FRS, the proton linac, and the High-Energy Storage Ring HESR. Also shown are the planned buildings for plasma physics, nuclear collisions, radioactive ion beams, and atomic physics experiments.

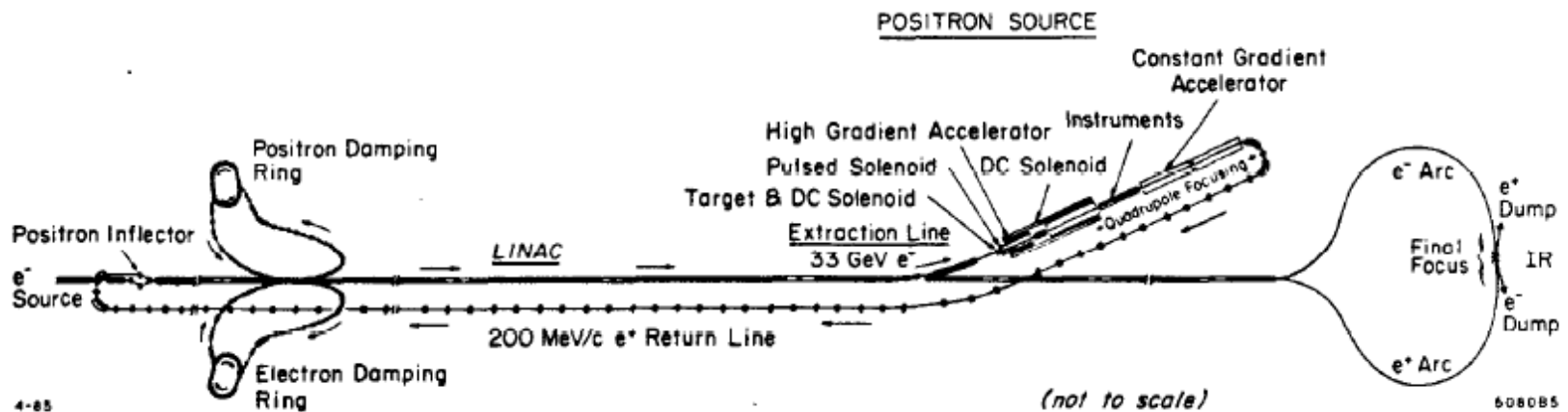
Erzeugung von Positronen

Kleine Energien (PET-Scan, Antiwasserstoff)

Radioaktive Kerne (Positronenemitter) werden mit Zyklotron hergestellt



Grosse Energien (Positronen für Beschleuniger)



Antiwasserstoff/Alpha-Experiment



Das ALPHA-Antimaterie-Experiment am Cern

AD: 30000 p^- /Versuch

^{22}Na -Quelle: 2 Mio e^+ /Versuch

Mischung von p^- und e^+ in Ioffe-Falle (1s)

Danach: Elimination geladener Teilchen

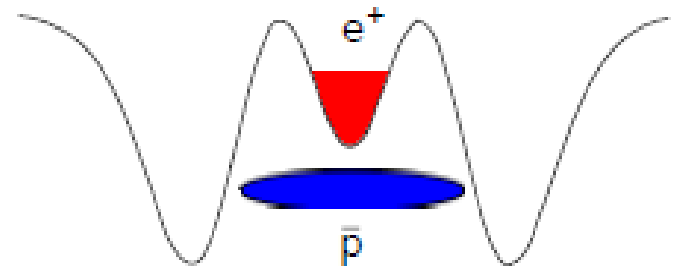
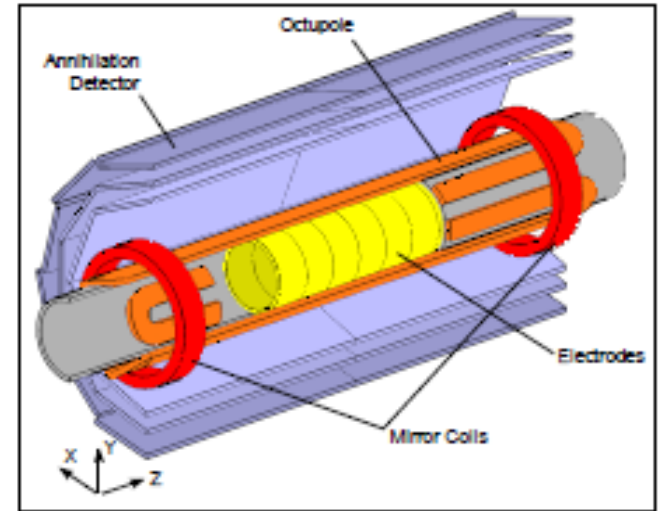
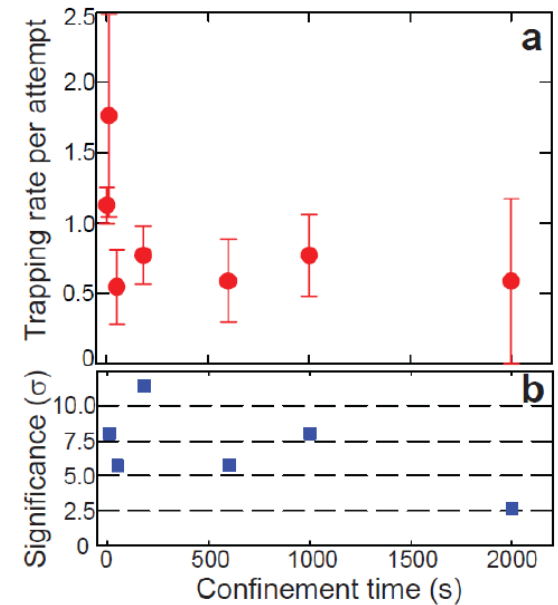


Fig. 4 A schematic representation of a nested Penning trap, showing the electric potential as a function of the axial coordinate. In this example, positrons (e^+) are held in the central well, while antiprotons (\bar{p}) are confined in the outer well.

Nach Is: Ca. 6000 Antiwasserstoffatome erzeugt
Ein kleiner Teil davon (ca. 300) wird
elektromagnetisch eingefangen und verbleibt
in der Falle

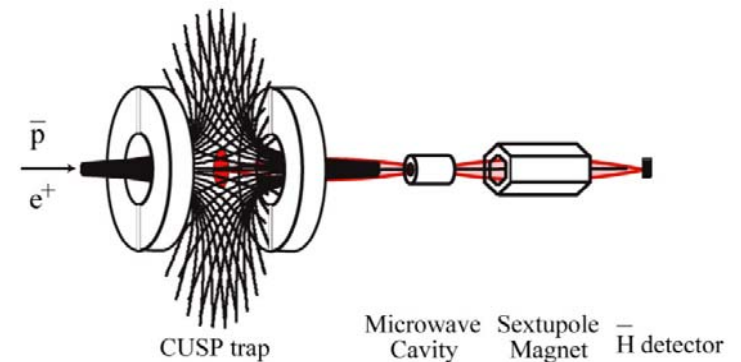
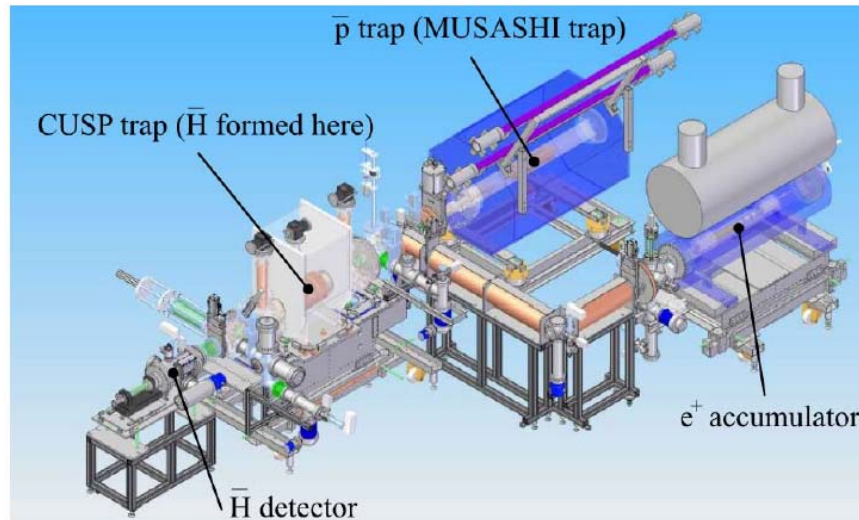
Die Falle wird nach 0.4 ,10.4 ,... 1000 ,2000 s
geöffnet und die in der Falle befindlichen
Antiwasserstoffatome annihilieren

Die beobachteten Antiwasserstoffatome
verbleiben bis zu 2000 s in der
Falle und sind dann im Grundzustand



Asacusa-Experiment/AD:

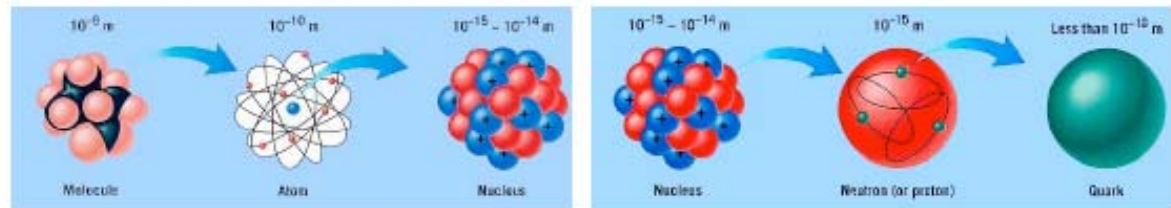
Andere Falle als ALPHA(Cusp)→Strahl von (polarisierten)
Antiwasserstoffatomen(70/Füllung)



Beste Voraussetzungen für Atrap/Alpha/Asacusa für Präzisionsmessungen am Antiwasserstoff

Mass aller Dinge: $\Delta_{2s-1s}(\text{H-Atom}) = 2\,466\,061\,102\,474\,870(36) \text{ Hz } (10^{-14})$

Materieteilchen und ihre Wechselwirkungen



Quarks

Quarks (q)	Masse [MeV/c ²]	Ladung/e	Radien [m]
u	5	+ 2/3	+ Anti-Teilchen ($\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$)
d	7	- 1/3	
s	95	- 1/3	
c	1250	+ 2/3	
b	4200	- 1/3	
t	174200	+ 2/3	

Quarks kommen nur in Zweier ($q\bar{q}$) und Dreier-Kombinationen (qqq) vor (Hadronen)

Baryonen: qqq

Proton = uud

Antiproton = $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$

Mesons : $q\bar{q}$

π^+ = $u\bar{d}$

π^- = $\bar{u}d$

Radien der Quarks: $< 10^{-19}$ m

Radien der Hadronen: $\approx 10^{-15}$ m

Nur Proton/Antiproton stabil, Neutron stabil im Kern