

# Grundlagenphysik mit Freie-Elektronen-Lasern

A. Ringwald

<http://www.desy.de/~ringwald>



Physikalisches Kolloquium  
Jena, 17. Mai 2004

# 1. Einführung

- In konkreter Planung:

## Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich

- **SLAC** ( $\Rightarrow$  Linac **C**oherent **L**ight **S**ource)
- **DESY** ( $\Rightarrow$  Europäisches Röntgenlaserprojekt **XFEL**)

$\Rightarrow$  Neue Einsichten in **Natur-** und **Lebenswissenschaften**

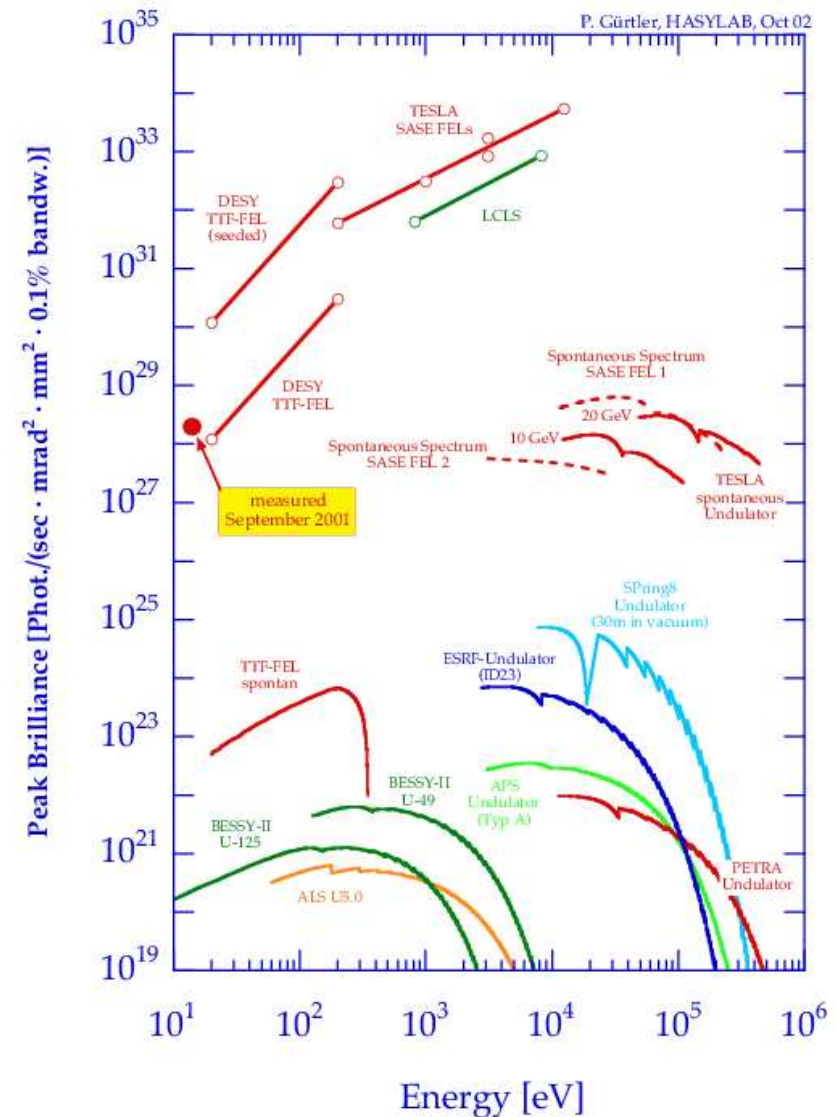
$\Leftarrow$  **Röntgenstrahlen:** Studium von **strukturellen** and **elektronischen** Materieeigenschaften auf **atomarer** Skala

## ● Spektrale Eigenschaften

- Hohe Leistung
- Kurze Pulslänge
- Enge Bandbreite
- Räumliche Kohärenz
- Stimmbare Wellenlänge

## ⇒ Anwendungen

- Atom- und Molekülphysik
- Physik der kondensierten Materie
- Materialwissenschaften
- Chemie
- Strukturelle Biologie
- Plasmaphysik
- **Grundlagenphysik?**



## Fahrplan:

### 2. Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich

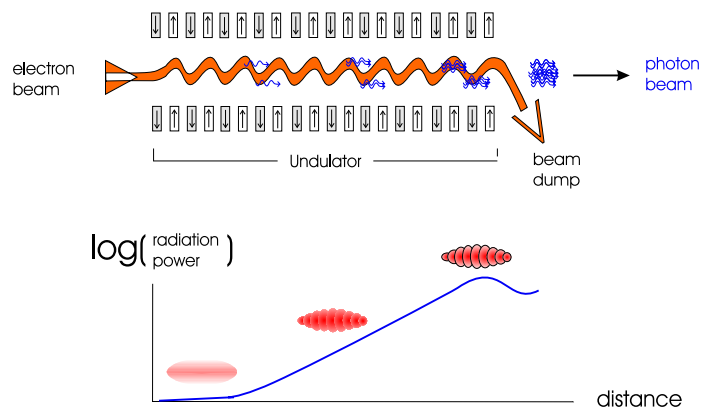
### 3. Grundlagenphysikalische Anwendungen

- **Kochen des Vakuums**
- **Unruh-Effekt**
- **Axionproduktion**

### 4. Zusammenfassung

## 2. Freie-Elektronen-Laser (FEL) im Röntgenbereich

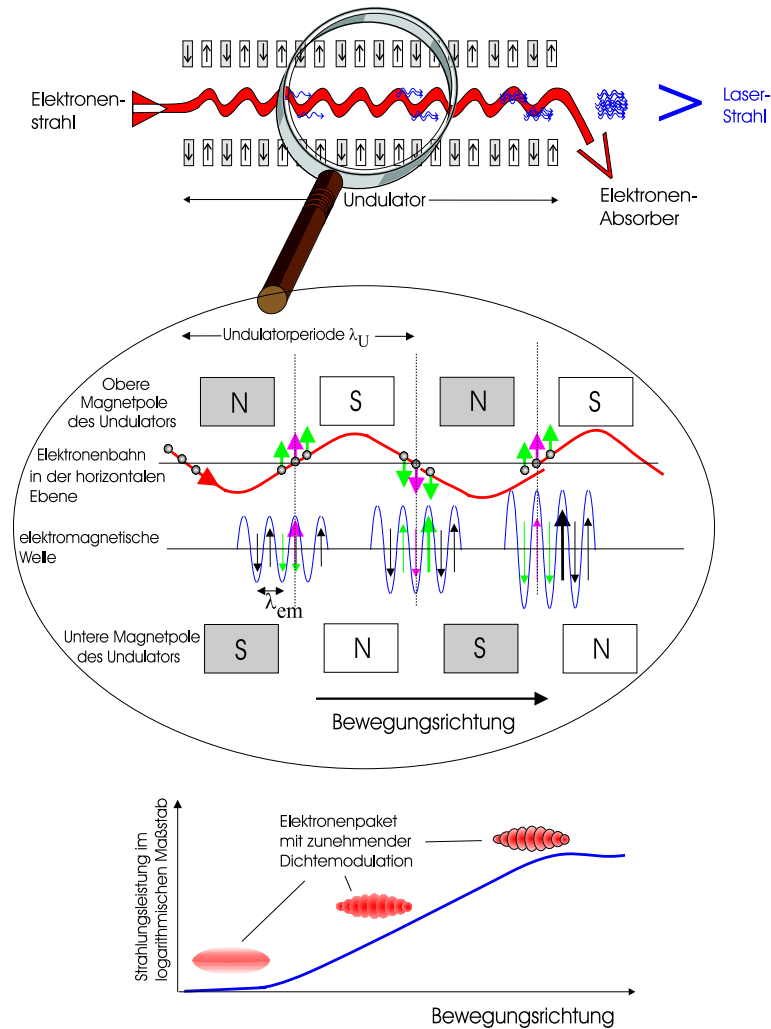
- Konventionelle Laser: Strahlung typischerweise im **optischen** Bereich
  - ⇐ stimulierte Emission von **atomar gebundenen Elektronen**
  - ⇐ Gebrauch von Spiegeln
- Verstärkungsmedium von **FELs** sind **freie (ungebundene) Elektronenbündel**, beschleunigt zu relativistischen Geschwindigkeiten, mit einer charakteristischen **longitudinalen Ladungsdichtemodulation** [Madey '71]



**FEL** im **Self Amplified Spontaneous Emission (SASE)** Modus

[Kodratenko, Saldin (1980); Bonifacio, Pellegrini (1984)]

– Grundlagenphysik mit Freie-Elektronen-Lasern –



[J. Roßbach/DESY]

A. Ringwald/DESY

Öffnungswinkel

5

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{m_e c^2}{E_e} = 2 \cdot 10^{-5} \left( \frac{25 \text{ GeV}}{E_e} \right)$$

Resonanzbedingung

$$\lambda_{em} = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K_U^2}{2} \right)$$

Undulatorparameter

$$K_U = \frac{e\lambda_U B_U}{2\pi m_e c} \sim 1$$

Strahlungsleistung

$$P \propto e^2 N_e^2 B_U^2 \gamma^2$$

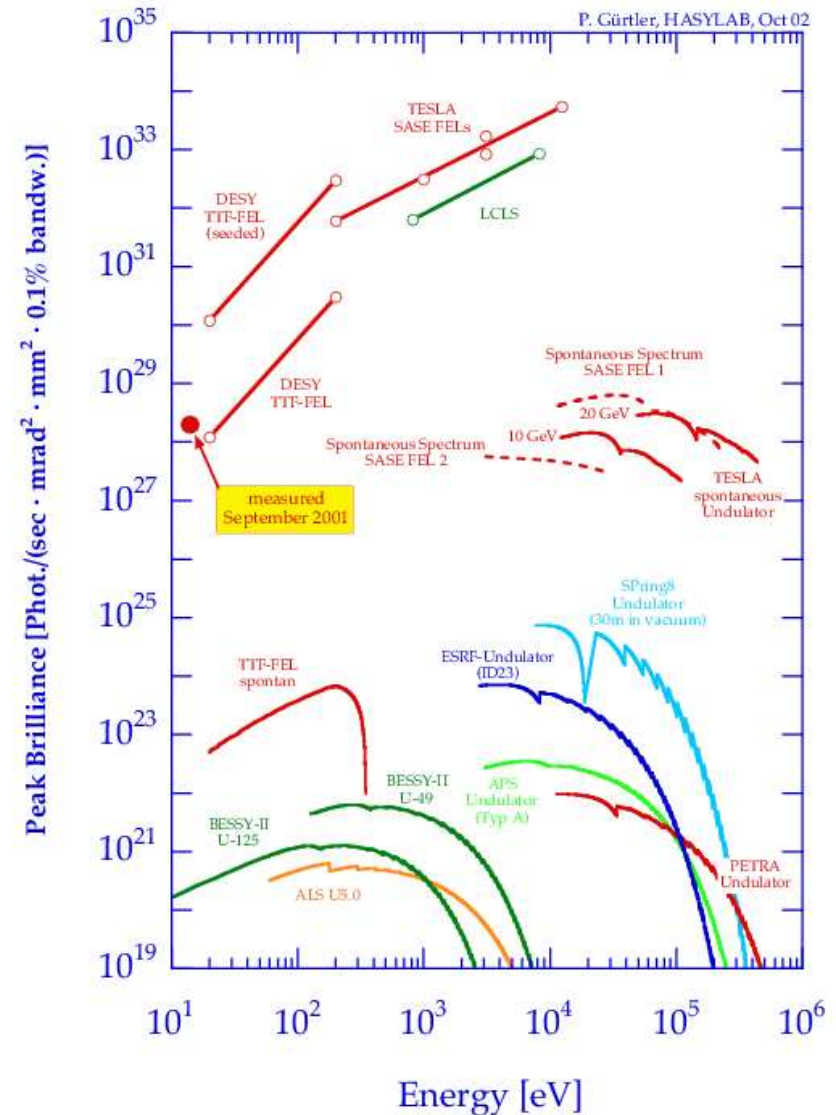
Verstärkung durch Kohärenz

$$N_e = 10^{9 \div 10}$$

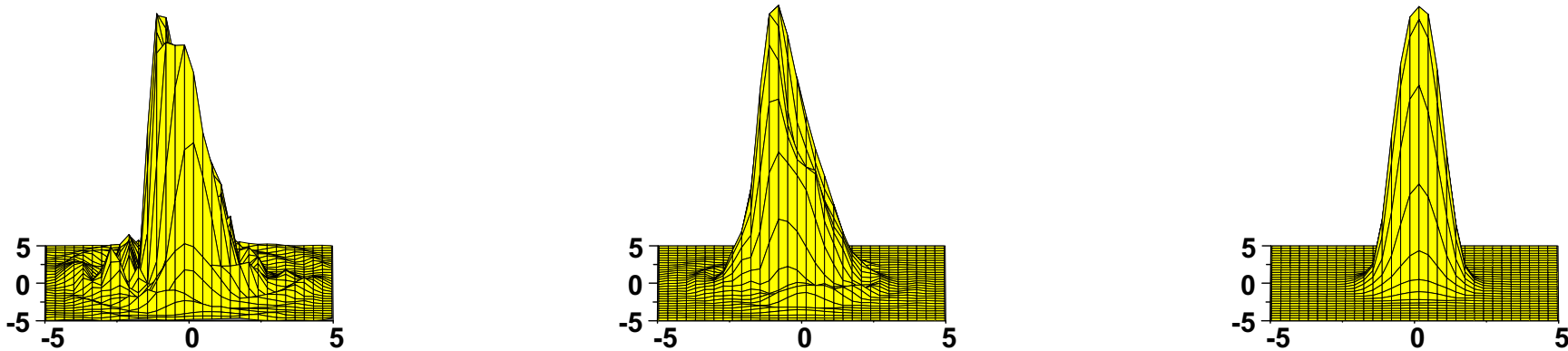
Physikalisches Kolloquium, Jena/D, Mai 2004

⇒ **Spektrale Eigenschaften**

- Hohe Leistung
- Kurze Pulslänge
- Enge Bandbreite
- Räumliche Kohärenz
- Stimmbare Wellenlänge



- **Transversale Verteilung der Strahlungsintensität** am Eingang (links), in der Mitte (Mitte), and am Ausgang (rechts) des Undulators

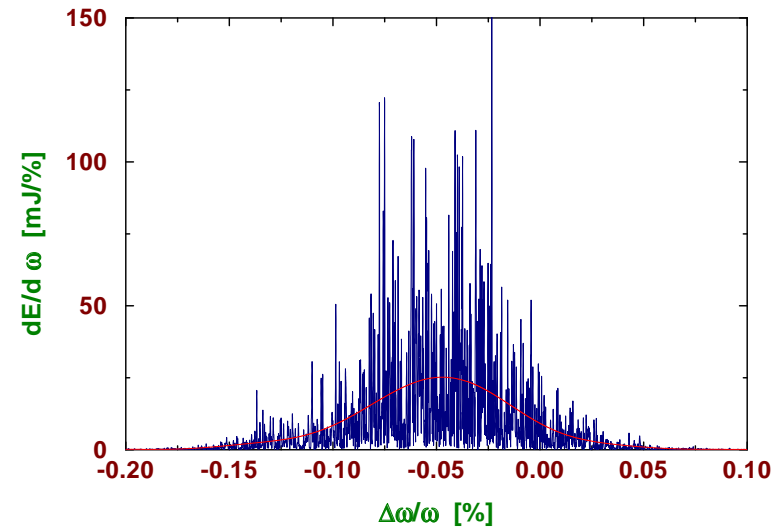
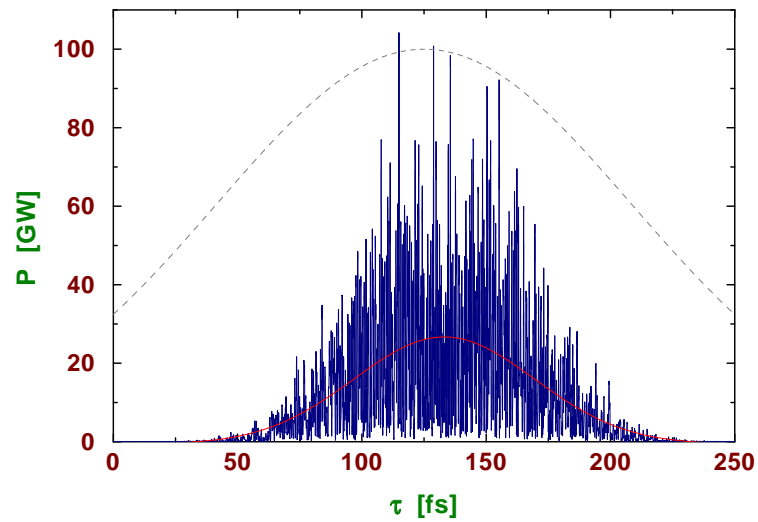


- **Räumliche Verteilung der Strahlungsintensität** in der Mitte (links) und am Ausgang (rechts) des Undulators





- **Zeitliche (links) and spektrale (rechts) Struktur eines Strahlungspulses eines SASE X-FELs** bei einer Wellenlänge von 0.1 nm



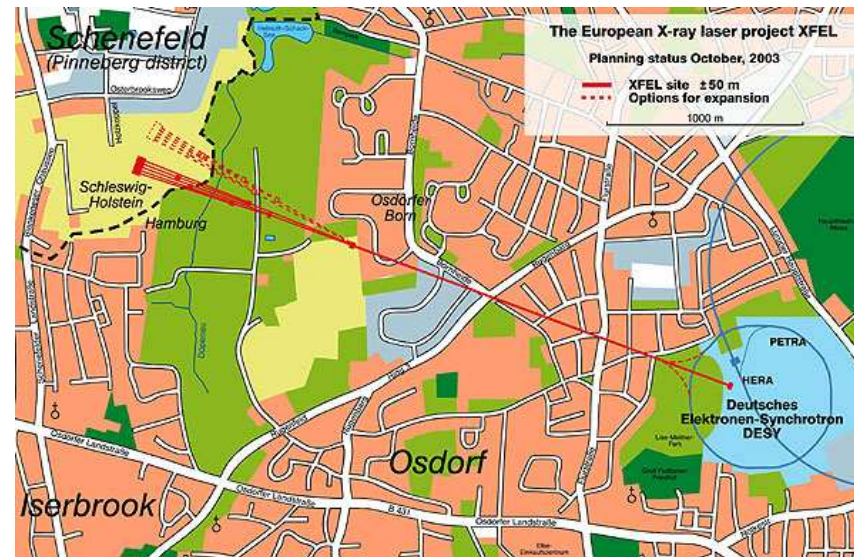
- Existierende und **geplante SASE FELs**

Wo?	$\lambda_{em}$	Jahr
Livermore	$\sim 1 \text{ mm}$	1986
LURE/Orsay	$5 \div 10 \text{ } \mu\text{m}$	1997
UCLA/LANL	$12 \text{ } \mu\text{m}$	1998
LEUTL/Argonne	530 nm	1999
	385 nm	2000
<b>TTF1 VUV-FEL</b> /DESY	$80 \div 180 \text{ nm}$	2000
<b>TTF2 VUV-FEL</b> /DESY	$6 \div 40 \text{ nm}$	2004
<b>LCLS</b> /SLAC	0.15 nm	2005 – 2008 Konstr.
<b>XFEL</b> /DESY	$0.085 \div 5.8 \text{ nm}$	2005 – 2011 Konstr.

**TTF**: TESLA Test Facility

**LCLS**: Linac Coherent Light Source

- **Das Europäische Röntgenlaserprojekt XFEL**



	Einh.	SASE 1	SASE 2	SASE 3	SASE 4	SASE 5
Wellenlänge	nm	0.1 ÷ 0.5	0.085 ÷ 0.133	0.1 ÷ 0.24	0.1 ÷ 1.0	0.4 ÷ 5.8
Bandbreite (FWHM)	%	0.08	0.07	0.08	0.08	0.29 ÷ 0.7
max. Leistung	GW	37	19	22	30	110 ÷ 200
durchschn. Leistung	W	210	110	125	170	610 ÷ 1100
Photonstrahlgr. (rms)	μm	43	47	53	47	25 ÷ 38
max. Leistungsdichte	W/m <sup>2</sup>	$6 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{19}$

### 3. Grundlagenphysikalische Anwendungen

- Grundlagenphysik mit **X-FELs**:
  - Paarerzeugung in starkem elektrischen Feld – **“Vakuumkochen”**
  - Unruh-Effekt – **“(Ereignis-)Horizontphysik”**
  - **Axionproduktion**

⇒ Starke elektrische Felder  $\mathcal{E}$   $\leftrightarrow$  große Strahlungsdichten  $P/(\pi\sigma^2)$

⇐ **Fokussierung** bis hinunter zur **Beugungsgrenze**,  $\sigma \gtrsim \lambda_{em} \sim 0.1 \text{ nm}$

⇒ Sehr **starke elektrische Felder** und **Beschleunigungen** möglich,

$$\mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 c \frac{P}{\pi\sigma^2}} = 1.1 \cdot 10^{17} \frac{\text{V}}{\text{m}} \left( \frac{P}{1 \text{ TW}} \right)^{1/2} \left( \frac{0.1 \text{ nm}}{\sigma} \right)$$

$$a = \frac{e\mathcal{E}}{m_e} = 1.9 \cdot 10^{28} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \left( \frac{P}{1 \text{ TW}} \right)^{1/2} \left( \frac{0.1 \text{ nm}}{\sigma} \right)$$

viel größer als mit optischen Lasern derselben Spitzenleistung  $P$

## Kochen des Vakuums

- **Spontane Teilchenerzeugung aus dem Vakuum**, induziert von einem **äußeren Feld**, zuerst diskutiert im Kontext der  $e^+e^-$  **Paarerzeugung in einem statischen, räumlich uniformen elektrischen Feld**

[Sauter (1931); Heisenberg,Euler (1936); Schwinger (1951); . . . ]

Faszinierendes, nichtlineares Phänomen in der Quantenfeldtheorie

- Theorie: jenseits der gewöhnlichen Störungstheorie
- Experiment: testet die Theorie in der Domäne sehr starker Felder

- Mechanismus hat viele Anwendungen in moderner Physik:

- Evaporation von schwarzen Löchern [Hawking (1975); Damour,Ruffini (1976); . . . ]
- Teilchenproduktion im frühen Universum [Parker (1969); . . . ]
- Teilchenproduktion in hadronischen Teilchenkollisionen

[Casher, Neuberger, Nussinov (1979); . . . ]

- In statischem, räumlich uniformen elektrischen Hintergrundfeld ist das Vakuum in der **Q**uanten**E**lektro**D**ynamik (**QED**) instabil:

⇒ “Funktensprühen”: spontane Erzeugung von  $e^+e^-$  Paaren  
– Für beobachtbare Rate, benötige enorme Feldstärke,

$$\mathcal{E}_c \equiv \frac{m_e c^2}{e \lambda_e} = \frac{m_e^2 c^3}{e \hbar} = 1.3 \cdot 10^{18} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

[Sauter (1931); Heisenberg, Euler (1936)]

so daß

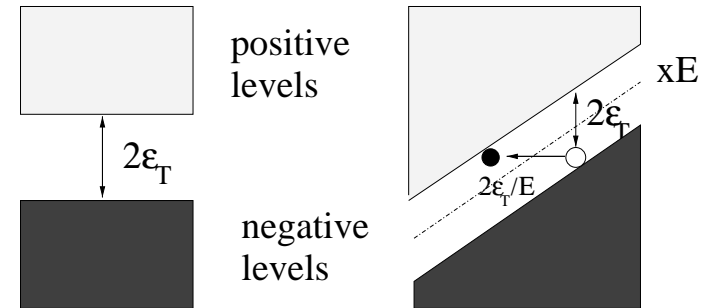
**Arbeit des Feldes**  
an **Einheitsladung**  $e$   $\approx$  **Ruheenergie**  
über **Comptonwellenlänge**  $\lambda_e$  **von  $e^+e^-$  Paar**

$$e \lambda_e \mathcal{E}_c = m_e c^2$$

- Für  $\mathcal{E} \ll \mathcal{E}_c$ :

[Schwinger (1951)]

- Paarerzeugung: **Quantentunneln**
- Rate **exponentiell unterdrückt**:



$$w = \frac{d^4 n_{e^+e^-}}{d^3x dt} \propto \exp \left[ -\pi \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}} \right] = \exp \left[ -\pi \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e \mathcal{E}} \right]$$

- Keine makroskopischen statischen Felder von der Größenordnung  $\mathcal{E}_c$
- In frühen 1970ern:
  - Kritische Felder in **Kernstößen mit**  $Z_1 + Z_2 \approx 1/\alpha$ ?

[Zel'dovich, Popov (1971); Müller, Rafelski, Greiner (1972)]

- Kritische Felder **am Fokus<sup>1</sup> oder in der Überschneidung von gekreuzten<sup>1</sup> intensiven optischen Lasern?**

[Bunkin, Tugov (1969); Brezin, Itzykson (1970); Popov (1971);...; Fried *et al.* (2001)]

<sup>1</sup>Keine Paarerzeugung in ebener Welle!

- **Am Fokus eines  $\sim 5$  Terawatt X-FEL** könnten 10% der kritischen Feldstärke erreicht werden: [Chen, Pellegrini (1998); Melissinos (1998); AR (2001)]

Laserparameter					
		Optisch	X-FEL		
		Fokus: Beugungsgrenze	Design <b>SASE 5</b>	Fokus: <b>Heute machbar</b>	Fokus: <b>Ziel</b>
Wellenlänge	$\lambda$	1 $\mu\text{m}$	0.4 nm	0.4 nm	0.15 nm
Photonenergie	$\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$	1.2 eV	3.1 keV	3.1 keV	8.3 keV
<b>max. Leistung</b>	$P$	<b>1 PW</b>	<b>110 GW</b>	<b>1.1 GW</b>	<b>5 TW</b>
<b>Spotradius</b> (rms)	$\sigma$	<b>1 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>26 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>21 nm</b>	<b>0.15 nm</b>
kohärente Spikelänge (rms)	$\Delta t$	500 fs $\div$ 20 ps	0.04 fs	0.04 fs	0.08 ps
Abgeleitete Größen					
max. Leistungsdichte	$S = \frac{P}{\pi\sigma^2}$	$3 \cdot 10^{26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$5 \cdot 10^{19} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$8 \cdot 10^{23} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$7 \cdot 10^{31} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
<b>max. electric field</b>	$\mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 c S}$	$4 \cdot 10^{14} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$1 \cdot 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{13} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{17} \frac{\text{V}}{\text{m}}$
max. elektrisches Feld/kritisches Feld	$\mathcal{E}/\mathcal{E}_c$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0.1
Photonenergie/ $e$ -Ruheenergie	$\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0.006	0.006	0.02
Adiabatizitätsparameter	$\eta = \frac{\hbar\omega}{e \mathcal{E} \lambda_e}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^2$	0.1

- Oder,  **$\sim 50$  Exawatt ( $= 5 \times 10^7$  TW) optischer Laser**



- Etwas Theorie zur Abschätzung der **kritischen Laserparameter** für einen beobachtbaren Effekt [AR (2001)]

⇒ Vereinfachte Näherung für das elektromagnetische Feld der Laserstrahlung:

- Paarerzeugung in der Überschneidung von zwei gekreuzten Laserstrahlen. Nehme an, daß dort das elektromagnetische Feld demjenigen in einer Antinode einer **stehenden Welle** ähnelt:

$$\mathbf{E}(t) = (0, 0, \mathcal{E} \cos(\omega t)), \quad \mathbf{B}(t) = (0, 0, 0), \quad \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$$

- Nehme an, daß für realistische Laser

$$\mathcal{E} \ll \mathcal{E}_c = \frac{m_e^2 c^3}{e \hbar}, \quad \hbar \omega \ll m_e c^2$$

⇒ Rate der spontanen  $e^+e^-$  Erzeugung in **semiklassischer** Weise ( $\hbar \ll 1$ ) berechenbar,

– mit verallgemeinerten WKB Methoden

[Brezin, Itzykson (1970)]

– mit imaginären-Zeit (Instanton) Methoden

[Popov (1971)];...

- Das Verhältnis

$$\eta \equiv \frac{\hbar \omega}{e \mathcal{E} \lambda_e} = \frac{\hbar \omega}{m_e c^2} \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}} = \frac{m_e c \omega}{e \mathcal{E}} \equiv \frac{\mathcal{E}_\omega}{\mathcal{E}}.$$

ist unabhängig von  $\hbar$  and spielt Rolle eines **Adiabatizitätsparameters**

- Laserfrequenz  $\omega$  tritt in semiklassischer Formel nur in Form des Adiabazitätsparameters  $\eta \equiv \hbar\omega/(e\mathcal{E}\lambda_e)$  auf. Grenzfälle:

$$w \equiv \frac{d^4 n_{e^+e^-}}{d^3x dt} \simeq \frac{c}{4\pi^3\lambda_e^4} \times \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_c}\right)^{\frac{5}{2}} \exp\left[-\pi \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}} \left(1 - \frac{1}{8}\eta^2 + \mathcal{O}(\eta^4)\right)\right], & : \eta \ll 1, \\ \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}\right)^{\frac{5}{2}} \sum_{n > 2\frac{m_e c^2}{\hbar\omega}} \left(\frac{e}{4\eta}\right)^{2n} e^{-2\left(n - 2\frac{m_e c^2}{\hbar\omega}\right)} \operatorname{Erfi}\left(\sqrt{2\left(n - 2\frac{m_e c^2}{\hbar\omega}\right)}\right) & : \eta \gg 1, \end{cases}$$

$\eta \ll 1$ : Adiabatischer Hochfeld-, Kleinfrequenz-Limit stimmt mit **nichtstörungstheoretischem Ergebnis von Schwinger** für ein statisches, räumlich uniformes Feld überein

$\eta \gg 1$ : Nicht-adiabatischer Kleinfeld-, Hochfrequenz-Limit ähnelt **störungstheoretischem Resultat**: entspricht  $\geq n$ -ter Ordnung Störungstheorie, wobei  $n$  die minimale Anzahl von Laserphotonen ist, die benötigt werden um ein  $e^+e^-$  Paar zu erzeugen:  $n \gtrsim 2m_e c^2/(\hbar\omega) \gg 1$

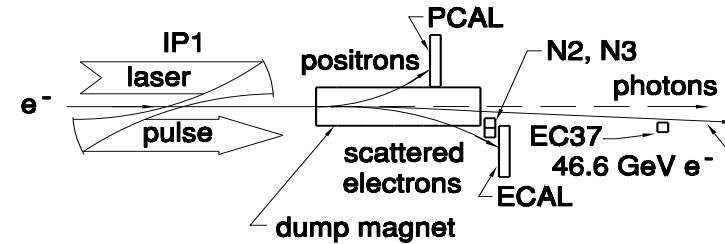
- Nichtstörungstheoretische Vakuum-Paarzeugung schon bei SLAC Experiment E-144 beobachtet?

[Burke *et al.* (1997); Melissinos (1998)]

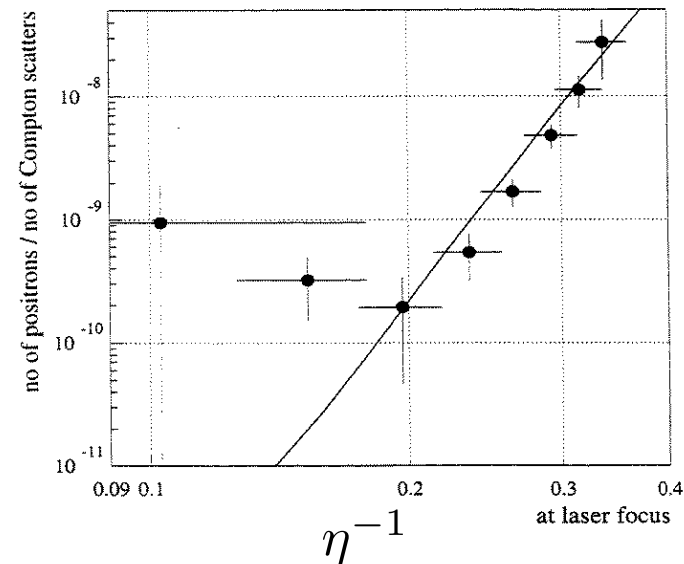
$\Leftarrow e^+e^-$  Paarerzeugung in Kollisionen von 46.6 GeV/c Elektronen mit TW optischen Laserpulsen  $\Rightarrow$  im Ruhesystem der einlaufenden Elektronen

$$\mathcal{E} \sim 5 \times 10^{17} \text{ V/m}, \quad \eta \sim 3$$

$\Rightarrow$  **Störungstheoretisches Multi-Photon-Regime**, aber nahe Schwinger-Regime



[Burke *et al.* (1997)]



- **Minimal-notwendige Leistung** für beobachtbaren Effekt: [AR (2001)]

	$\lambda$	$\sigma$	$\Delta t$	$P_{\min}$	$S_{\min}$	$\mathcal{E}_{\min}$
Fokussierter X-FEL: ( $\approx$ "Ziel")	0.1 nm	0.1 nm	0.1 ps	2.5 TW	$7.8 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$1.7 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
	0.1 nm	0.1 nm	0.1 fs	4.5 TW	$1.4 \cdot 10^{32} \text{ W/m}^2$	$2.3 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
Fokussierter X-FEL: ( $\approx$ "Heute machbar")	0.1 nm	20 nm	0.1 ps	38 PW	$3.0 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$1.1 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
	0.1 nm	20 nm	0.1 fs	55 PW	$4.3 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$1.3 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
Fokussierter optischer Laser: Beugungsgrenze	1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	10 ps	49 EW	$1.6 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$7.7 \cdot 10^{16} \text{ V/m}$
	1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	100 fs	58 EW	$1.8 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$8.3 \cdot 10^{16} \text{ V/m}$

s.a.: [Alkofer,Hecht,Roberts,Schmidt,Vinnik (2001); Roberts,Schmidt,Vinnik (2002); Bulanov,Narozhny,Mur,Popov (2004)]

- Brauche  $\sim$  **50 EW optischen Laser** oder **5 TW - 50 PW X-FEL**
- $\Leftarrow$  Mit heute verfügbaren Techniken erreichbare Leistungsdichten noch zu klein für beobachtbaren Effekt (cf. extra Tabelle)
- Denkbare **Verbesserungen** in **X-FEL** Technologie:
    - Röntgenoptik, um näher an Beugungsgrenze,  $\sigma \gtrsim \lambda$ , zu kommen
    - Energieextraktion, um Leistung zu vergrößern
- $\Rightarrow$  Schwinger-Effekt zum ersten Mal in Reichweite ( $\gtrsim$  2020)! Spannendes Rennen zwischen X-FEL und optischen Lasern!

Laserparameter					
		Optisch	X-FEL		
		Fokus: Beugungsgrenze	Design <b>SASE 5</b>	Fokus: <b>Heute machbar</b>	Fokus: <b>Ziel</b>
Wellenlänge	$\lambda$	1 $\mu\text{m}$	0.4 nm	0.4 nm	0.15 nm
Photonenergie	$\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$	1.2 eV	3.1 keV	3.1 keV	8.3 keV
<b>max. Leistung</b>	$P$	<b>1 PW</b>	<b>110 GW</b>	<b>1.1 GW</b>	<b>5 TW</b>
<b>Spotradius</b> (rms)	$\sigma$	<b>1 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>26 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>21 nm</b>	<b>0.15 nm</b>
kohärente Spikelänge (rms)	$\Delta t$	500 fs $\div$ 20 ps	0.04 fs	0.04 fs	0.08 ps
Abgeleitete Größen					
max. Leistungsdichte	$S = \frac{P}{\pi\sigma^2}$	$3 \cdot 10^{26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$5 \cdot 10^{19} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$8 \cdot 10^{23} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$7 \cdot 10^{31} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
<b>max. electric field</b>	$\mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 c S}$	$4 \cdot 10^{14} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$1 \cdot 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{13} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{17} \frac{\text{V}}{\text{m}}$
max. elektrisches Feld/kritisches Feld	$\mathcal{E}/\mathcal{E}_c$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0.1
Photonenergie/ $e$ -Ruheenergie	$\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0.006	0.006	0.02
Adiabatizitätsparameter	$\eta = \frac{\hbar\omega}{e\mathcal{E}\lambda_e}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^2$	0.1

## Unruh-Effekt

- Was ist der Unruh-Effekt?
  - Ein **beschleunigter** Beobachter sieht die Vakuumpfluktuationen als ein **Wärmebad** [Unruh (1976)]

$$T_{\text{Unruh}} = \frac{\hbar a}{2 \pi c k} = 4 \cdot 10^{-21} \text{ K} \left( \frac{a}{1 \text{ m/s}^2} \right)$$

- Ähnliche Situation für einen Beobachter in der Nähe eines **schwarzen Lochs** [Hawking (1975)]

$$T_{\text{Hawking}} = \frac{\hbar \kappa}{2 \pi k} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ K} \left( \frac{1 M_{\odot}}{M_{\text{SL}}} \right)$$

⇒ Studium der Physik schwarzer Löcher im Labor

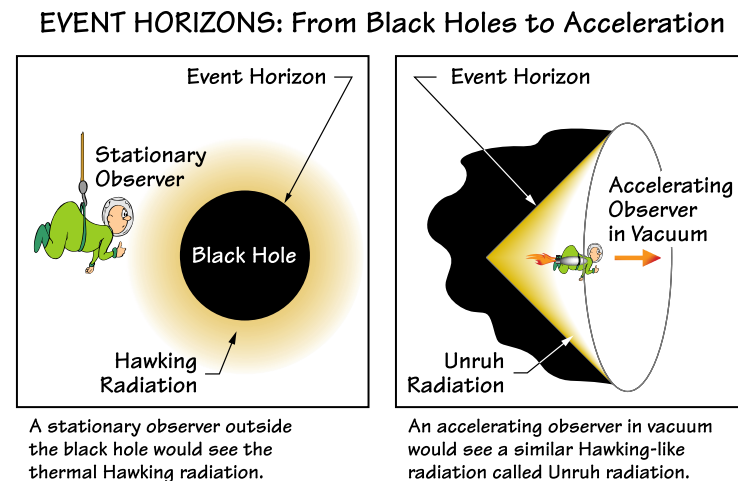


Fig. 1

[P. Chen/SLAC]

- **Experimentelle Nachweismöglichkeiten:**

[Rosu (1996)]

- Hydrodynamisches Analogon zur Schwarzschild-Metrik [Unruh (1981)]

- Depolarisation von Elektronen in Speicherringen [Bell, Leinaas (1983÷87)]

$T \approx 1200$  K am LEP/CERN; aber: zirkulärer vs. linearem Unruh-Effekt? Thermische Interpretation?

- Kristall-“Channeling” [Darbinian *et al.* (1989)]

$a \approx 10^{31}$  m/s<sup>2</sup> für ultra-relativistische Teilchen,  $\gamma \sim 10^8$ ; Bremsstrahlungsuntergrund problematisch

- Zentripetale Beschleunigung [Darbinian *et al.* (1990)]

brauche  $B \sim 5 \cdot 10^7$  G,  $\gamma \sim 10^9$ , um Synchrotronstrahlungsuntergrund zu überbieten

- **Lineare Beschleunigung am Fokus eines ultra-intensiven Lasers**

[Chen, Tajima (1999)]



- Beschleunige Elektron in stehender Laserwelle,  $a \approx 10^{26} \text{ m/s}^2$

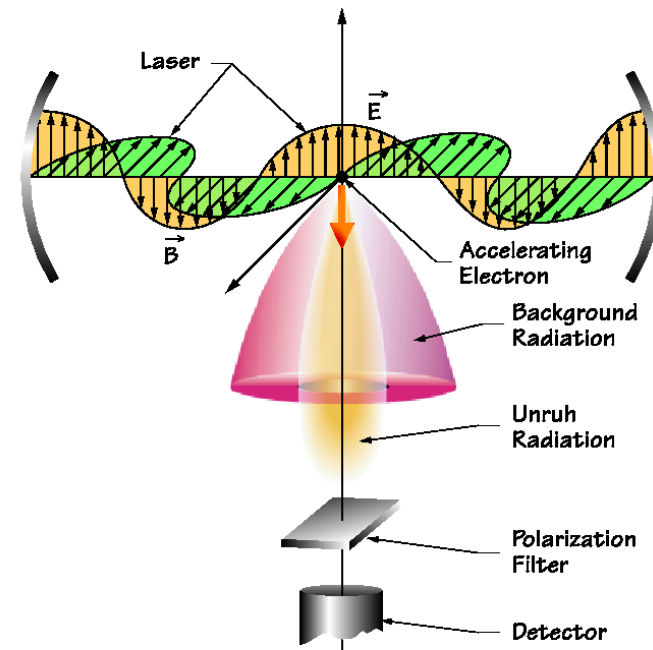
⇒ Modifizierte Nullpunktfluktuationen

$$\langle E_i(-\tau/2) E_j(+\tau/2) \rangle = \frac{4\hbar}{\pi c^3} \delta_{ij} \frac{(a/c)^4}{\sinh^4(a\tau/2c)}$$

⇒ Zusätzliche Zitterbewegung des Elektrons

⇒ Modifikation in emittierter Strahlung, zusätzlich zur klassischen Larmorstrahlung

- \* gekipptes thermisches Spektrum
- \* charakteristische Winkelabhängigkeit



Schematic Diagram for Detecting Unruh Radiation

[P. Chen/SLAC]

## Axionproduktion

- Was ist ein **Axion**?

[Peccei, Quinn (1977); S. Weinberg (1978); Wilczek (1978)]

- Hypothetisches, sehr leichtes, schwach gekoppeltes (pseudo-)skalares Teilchen,  $A^0$ : “Pseudo-Nambu-Goldstone-Boson”
- Natürliche Lösung des **starken CP Problems**:  
Wieso ist der effektive  $\theta$ -Parameter in der **QCD** Lagrange-Funktion

$$\mathcal{L}_\theta = \theta_{\text{eff}} \frac{\alpha_s}{8\pi} F^{\mu\nu a} \tilde{F}_{\mu\nu a}$$

so klein,  $\theta_{\text{eff}} \lesssim 10^{-9}$  ( $\Leftarrow$  elektrisches Dipolmoment des Neutrons)?

- **Peccei-Quinn-Skala**  $f_A$  bestimmt die Masse,

$$m_A = 0.62 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \times \left( \frac{10^{10} \text{ GeV}}{f_A} \right)$$

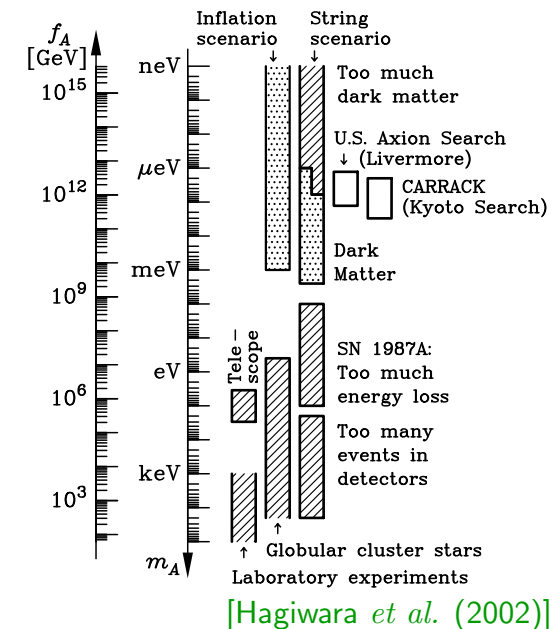
- Wechselwirkungen mit Standardmodellteilchen **modellabhängig**, z. B. Axion-Photon-Kopplung,

$$\mathcal{L}_{\text{WW}} = -g_{A\gamma} A \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}; \quad g_{A\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_A} \left( \frac{E}{N} - 1.92 \right)$$

## ● Astrophysikalische Einschränkungen

[Raffelt . . . ]

- Axionen werden in heißen Plasmen erzeugt und führen zu Energieverlusten durch Abstrahlung
- Lebenszeiten von Sternen  $\Rightarrow$  Einschränkungen an Wechselwirkungsstärken mit Photonen, Elektronen, Nukleonen  $\Rightarrow$  Einschränkungen an  $g_{A\gamma}$  ( $\Rightarrow f_A$  und  $m_A$ ).



## ● Experimentelle Grenzen

Stärkste Grenzen:

Produktion im **frühen Universum** oder in **astrophysikalischen Quellen**;

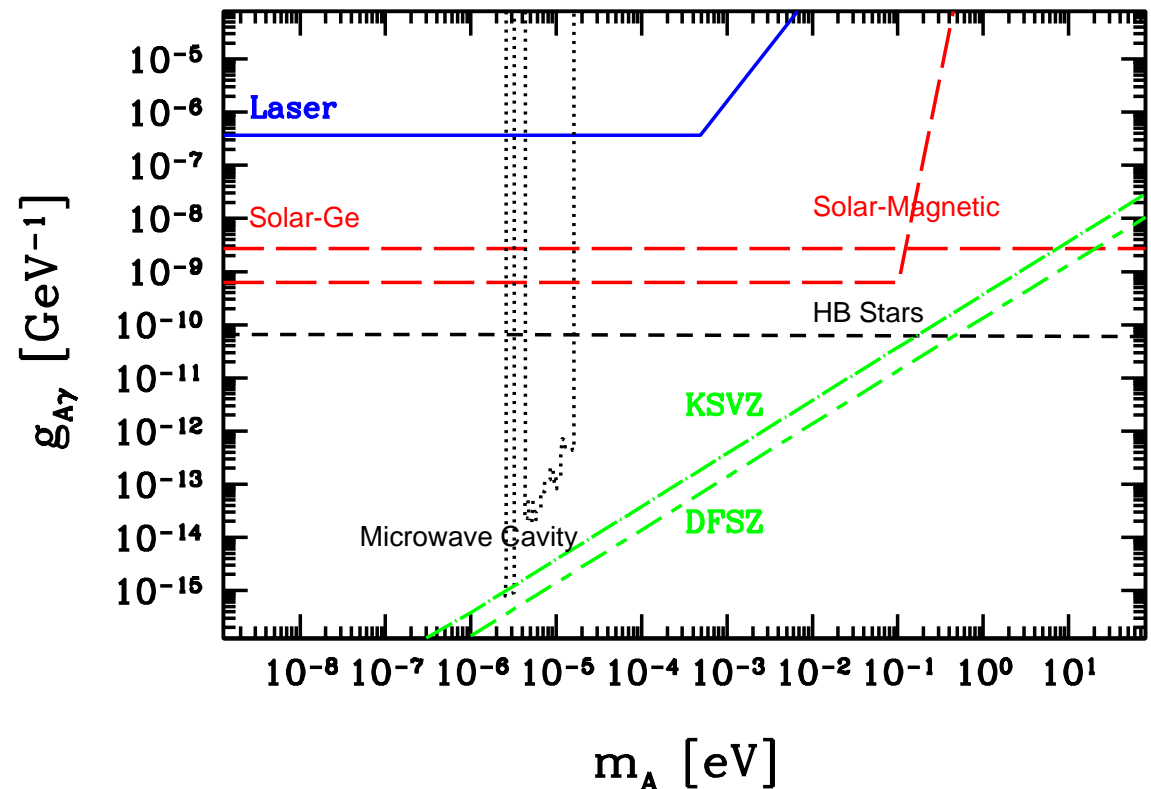
Detektion im Labor:

- Suche nach **dunkler Materie**
  - \* Mikrowellen-Hohlraum-Experimente
- Suche nach **solaren Axionen**
  - \* **Solar-magnetisch**  
(**CAST**: Verbesserung um eine GrO in 2004)
  - \* **Solar-Germanium**

Viel schwächer:

**Reine Laborexperimente** (Detektion **und** Produktion im Labor):

- **Laserexperimente**



[PDG (2002); AR '03]

## Photonregeneration

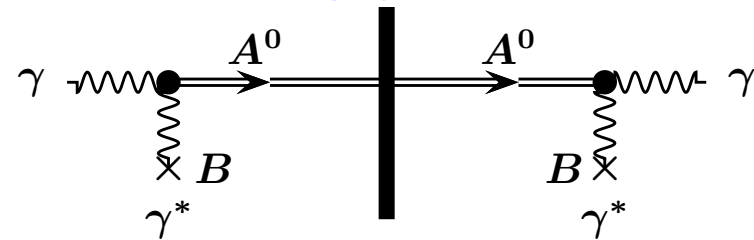
- **Produktion:** Polarisiertes Laserstrahl in supraleitendem Dipolmagneten, so daß  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B} \Rightarrow$  Konversion  $\gamma \rightarrow A$
- Absorbieren Laserstrahl in Wand
- **Detektion:** Nachweis der hinter der Wand in einem zweiten Magnetfeld durch Rückkonversion ( $A \rightarrow \gamma$ ) entstandenen Photonen

$$\text{Rate} \propto \frac{1}{16} \underbrace{(g_{A\gamma} B \ell)^4}_{P_{\gamma \leftrightarrow A}^2} \frac{\langle P \rangle}{\omega} \epsilon$$

Kohärenzbedingung

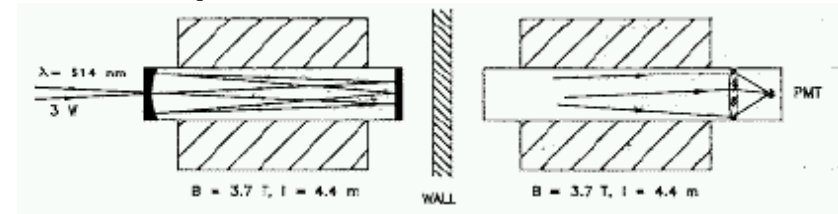
$$m_A \ll 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \left( \frac{\hbar \omega}{1 \text{ eV}} \frac{1 \text{ m}}{\ell} \right)^{1/2}$$

“Durch die Wand scheinendes Licht” 28



[Ansel'm (1985); Van Bibber *et al.* (1987)]

### Pilotexperiment:



[Cameron *et al.* (1993)]

$$B = 3.7 \text{ T}, \ell = 4.4 \text{ m}, \langle P \rangle = 3 \text{ W}, \lambda = 514 \text{ nm}$$

$$\Rightarrow g_{A\gamma} < 6.7 \cdot 10^{-7} \text{ GeV}^{-1} \text{ for } m_A < 10^{-3} \text{ eV}$$

⇒ Sensitivität eines **X-FEL** Photonregenerationsexperiments:

– **SASE-5:**

$$\langle P \rangle = 1.1 \text{ kW} \quad , \quad \lambda = 5.8 \text{ nm}$$

$$B = 10 \text{ T} \quad , \quad \ell = 10 \text{ m}$$

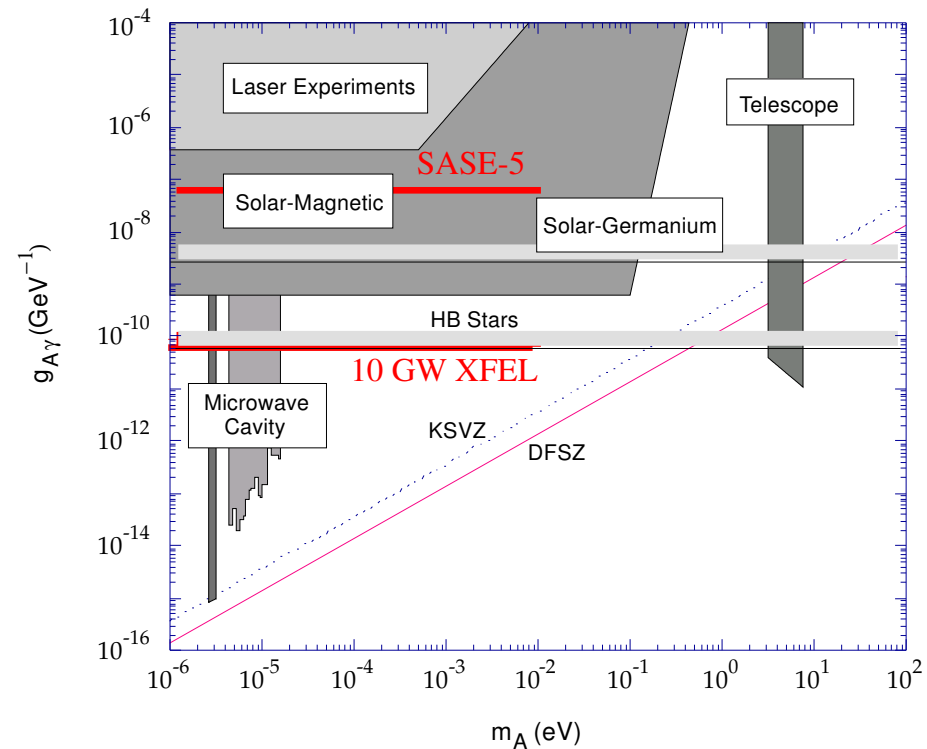
– **10 GW X-FEL:**

$$\langle P \rangle = 10 \text{ GW} \quad , \quad \lambda = 5.8 \text{ nm}$$

$$B = 40 \text{ T} \quad , \quad \ell = 40 \text{ m}$$

- Unrealistisch: nur gültig, wenn Kohärenzlänge  $l_c \gg \ell$ ; realistisch derzeit  $l_c \lesssim 30 \mu\text{m} \Rightarrow$  Reduktion der Sensitivität um Faktor  $(\ell/l_c)^{1/2} \gtrsim 1000$  [AR (2003)]

⇒ Astrophysikalische Grenzen für **X-FEL** außer Reichweite

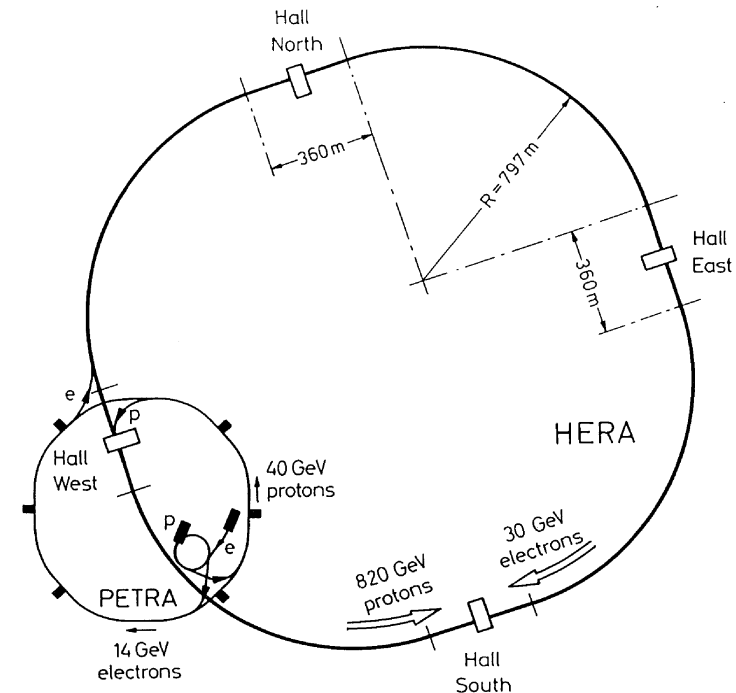


- Einzigartige Gelegenheit für Suchen nach Axionen:

- Ende 2006 wird **HERA** außer Betrieb genommen.

- ⇒ Seine  $\approx 400$  supraleitenden **Dipolmagnete**, mit jeweils  $B = 5 \text{ T}$  und  $\ell = 10 \text{ m}$ , können **wiederverwertet** werden und

- ⇒ für **Photonregenerationsexperiment** benutzt werden [AR'03]



- Sensitivitäten eines **optischen** Photonregenerationsexperiments mit **wiederverwerteten HERA Magneten**

– **in HERA-Tunnel:**

$$\langle P \rangle = 10 \text{ W} \quad , \quad \hbar\omega = 1 \text{ eV}$$

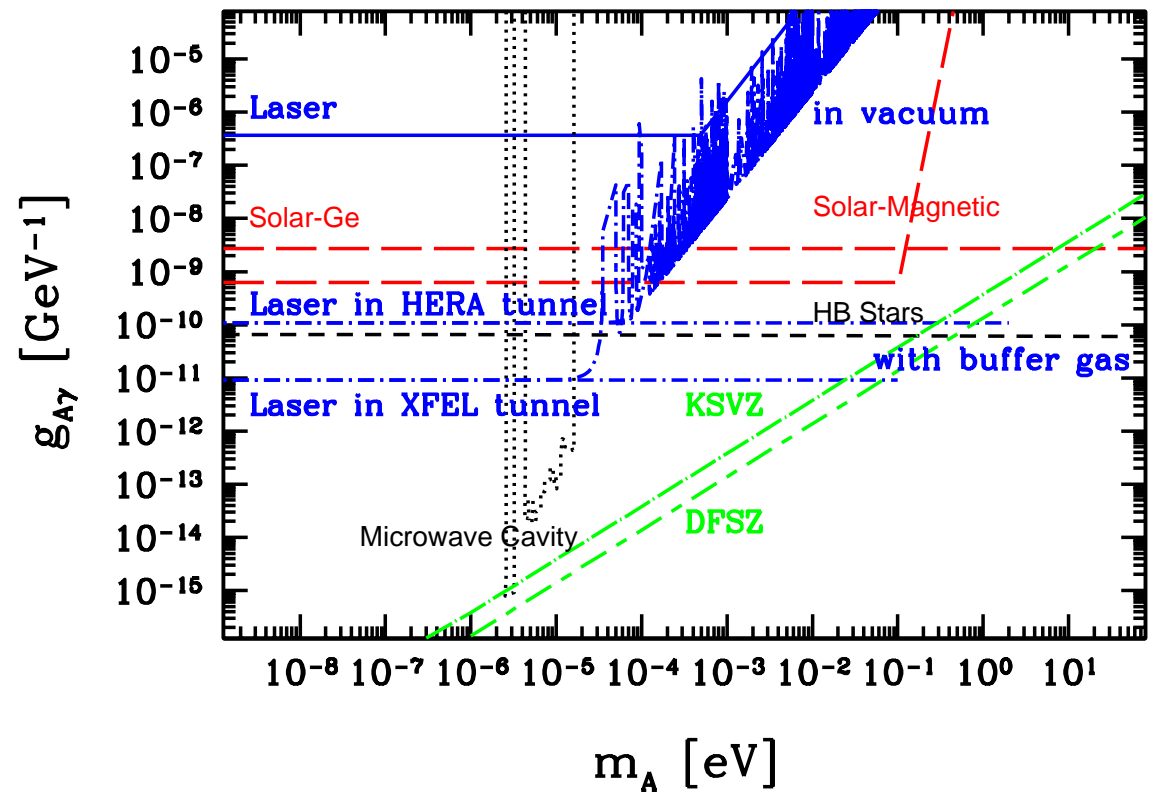
$$B = 5 \text{ T} \quad , \quad \ell = 17 \times 10 \text{ m}$$

– **in XFEL-Tunnel:**

$$\langle P \rangle = 10 \text{ W} \quad , \quad \hbar\omega = 1 \text{ eV}$$

$$B = 5 \text{ T} \quad , \quad \ell = 200 \times 10 \text{ m}$$

⇒ Kompetitiv mit astrophysikalischen Grenzen



[AR '03]



## 4. Zusammenfassung

- **SASE FELs im Röntgenbereich:**
  - können gebaut werden:
    - ← **TESLA Test Facility und VUV-FEL** bei DESY
    - Konstruktion von **LCLS** am SLAC
    - Aufbau des **Europäischen Röntgenlaserlabors XFEL** bei DESY
  - haben zahlreiche Anwendungen:
    - \* Materialwissenschaften
    - \* Chemie
    - \* Biologie
    - \* ...
    - \* Plasmaphysik
    - \* **Grundlagenphysik**

- Grundlagenphysikalische Ambitionen bei DESY dadurch nicht erschöpft:

⇒ Teilchenphysikalisches Zukunftsprojekt:

## TESLA – TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator

